

الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية  
République Algérienne démocratique et populaire

وزارة التعليم العالي و البحث العلمي  
Ministère de l'enseignement supérieur et de la recherche scientifique

جامعة سعد دحلب البليدة  
Université SAAD DAHLAB de BLIDA

كلية التكنولوجيا  
Faculté de Technologie

قسم الإلكترونيك  
Département d'Électronique



## Mémoire de Master

Filière Électronique  
Spécialité Instrumentation

présenté par

Yagoub Mohamed Amine

&

Hoceine Abdelmadjid

# Localisation de défauts dans les réseaux électriques

Proposé par : Ykhlef Farid

Année Universitaire 2017-2018

## Remerciements

---

*Au* terme de ce travail, nous tenons à remercier **Dieu** le tout  
puissant  
Pour nous avoir donnés la santé, la volonté, le courage et la  
patience, sans  
lesquels ce travail n'aurait pas été réalisé.

Nos remerciements s'adressent à nos chers parents pour leur  
amour, aide, soutien, et encouragement que dieu les garde en  
bonne santé.

Un grand remerciement à notre encadreur <MR ykhlef>  
pour sa disponibilité et la qualité de son encadrement ainsi que  
pour le temps et l'aide qu'il nous a accordés tout au long de la  
réalisation de ce travail .

Nous voulons remercier toute personne ayant participé de près ou  
de loin à la réussite  
de ce travail trouve ici l'expression de notre profonde sympathie.

Nos derniers mots s'adressent au membre jury et toute l'équipe de  
notre option.

---

## ملخص

يصف هذا العمل استخدام تحويل الموجات لتحليل عوارض خطأ الشبكة الكهربائية لتحديد موقع الخطأ. تستخدم نظرية الموجات المتنقلة لالتقاط زمن الإزاحة العابر على طول الخطوط التي يتم رصدها بين نقطة العطل والتابع. يتم توفير القرار الزمني لمكونات عالية التردد من العابرين خطأ من تحويل الموجات. وترتبط هذه المعلومات بوقت انتقال الإشارات المتحللة بالفعل في مكوناتها النموذجية. يُستخدم وضع الهواء لجميع أنواع الأعطال ، بينما يُستخدم الوضع الأرضي لحل المشكلات المرتبطة بحالات معينة. أثبتت عملية تحويل الموجات أنها مميزة لتحديد انعكاسات الموجة التصاعديّة للفشل ، بغض النظر عن نوع الفالق والممانعة. يستخدم برنامج ماطلاب لاختبار و التحقق من صحة طريقة توطين الأخطاء المقترحة للأعطال التقليدية في نظام الطاقة

**كلمات المفاتيح:** أخطاء نظام الطاقة ، العابرين الكهرومغناطيسية ، تحويل الموجات ، تحديد موقع العطل ، موجات السفر

---

## Résumé

Ce travail décrit l'utilisation de la transformée en ondelettes pour analyser les transitoires de défaut du réseau électrique afin de déterminer l'emplacement du défaut. La théorie des ondes mobiles est utilisée pour capturer le temps de déplacement des transitoires le long des lignes surveillées entre le point de défaut et le relais. La résolution temporelle des composantes hautes fréquences des transitoires de défaut est fournie par la transformée en ondelettes. Cette information est liée au temps de parcours des signaux qui sont déjà décomposés en leurs composantes modales. Le mode aérien est utilisé pour tous les types de défauts, tandis que le mode sol est utilisé pour résoudre les problèmes associés à certains cas particuliers. La transformée en ondelette s'avère être un excellent discriminant pour identifier les réflexions d'onde progressive de la défaillance, quel que soit le type de défaut et l'impédance. On utilise logiciel MATLAB/SIMULINK pour tester et valider l'approche de localisation des défauts proposée pour les défauts typiques du système d'alimentation.

**Mots-clés:** Défaut réseau électrique, transitoires électromagnétiques, Transformée en ondelettes, localisation des défauts, ondes de déplacement

---

---

**Abstract**

This work describes the use of wavelet transform for analyzing power system fault transients in order to determine the fault location. Traveling wave theory is utilized in capturing the travel time of the transients along the monitored lines between the fault point and the relay. Time resolution for the high frequency components of the fault transients, is provided by the wavelet transform. This information is related to the travel time of the signals which are already decomposed into their modal components. Aerial mode is used for all fault types, whereas the ground mode is used to resolve problems associated with certain special cases. Wavelet transform is found to be an excellent discriminant for identifying the traveling wave reflections from the fault irrespective of the fault type and impedance. MATLAB / SIMULINK is used to test and validate the proposed fault localization approach for typical faults in the power system.

**Keywords:** Power System Faults, Electromagnetic Transients, Wavelet Transform, Fault Location, Traveling Waves.

---

**Table des matières****Introduction générale**

Motivations du mémoire .....	1
Localisation de défaut basée sur les ondelettes.....	2
Cadre du mémoire.....	3

**Chapitre 1 : localisation de défauts dans les réseaux électriques**

1.1 Introduction.....	4
1.2 Modèle de lignes de transmission.....	5
1.2.1 Modèles de ligne de transmission pour un régime permanent .....	5

<i>a</i> Modèle de la ligne courte.....	6
<i>b</i> Modèle de la ligne moyenne.....	6
<i>c</i> Modèle de ligne longue.....	7
1.2.2 Théorie des ondes mobiles et modèles de lignes de transmission pour un état transitoire.....	10
<i>a</i> Equation d'onde de ligne de transmission et modèle de ligne idéal .....	10
<i>b</i> Diagramme de treillis.....	13
1.3 Examen général des techniques de localisation des défauts.....	14
1.3.1 Méthodes basé sur les équations différentielles.....	14
1.3.2 Méthodes basé sur les hautes fréquences.....	15
1.4 Conclusion.....	16

## **Chapitre 2 : localisation des défauts basé sur la transformée en ondelette**

2.1 Introduction .....	17
2.2 Principes fondamentaux de la transformation en ondelettes.....	18
2.2.1 C'est quoi une onde.....	18

2.2.2 Types d'ondes.....	18
2.2.3 Ondes progressive périodiques.....	19
2.2.4 Modélisation d'une onde progressive.....	19
2.2.5 Transformation continue en ondelettes (cwt).....	21
2.2.6 Transformation discrète en ondelettes (dwt).....	22
<i>a</i> Ondelette de Daubechies.....	24
<i>b</i> Ondelette de Symlet.....	24
<i>c</i> Ondelette de Coiflet.....	25
<i>d</i> Ondelette Biorthogonales .....	25
<i>e</i> Ondelette de Meyer.....	26
<i>f</i> Ondelette Chapeau Mexicain.....	26
<i>g</i> Ondelette Morlet.....	27
<i>h</i> Ondelette de Shannan.....	27
2.3 Emplacement de défaut utilisant la transformation d'ondelette.....	28
2.3.1 Enregistrement synchronisé à deux extrémités.....	29
2.3.2 Enregistrement à une seul fin .....	30
<i>a</i> Approche I : défauts non mis à la terre .....	30
<i>b</i> Approche II : défaillances à la terre .....	31
2.4 Conclusion.....	32

## Chapitre 3 : simulation et résultats

3.1 Présentation de logiciel.....	33
3.2 Présentation de simulink .....	33
3.3 Présentation de bibliothèque simscape powerSysteme....	34
3.3.1 Bibliothèque « Simscape Components » .....	35
3.3.2 Bibliothèque « Specialized Technology » .....	35
3.4 Les phases de test .....	39
3.5 Conclusion générale.....	44
Références.....	46

### Liste des figures

Figure (1.1) : Modèle de la ligne courte.....	6
Figure (1.2) : Modèle de la ligne moyenne .....	6
Figure (1.3) : Ligne de transmission monophasée.....	7
Figure (1.4) : Un élément dx de la ligne de transmission de la figure (1.3).....	8
Figure (1.5) : Modèle de ligne exacte.....	9
Figure (1.6) : Modèle à temps discret pour une ligne de transmission sans perte.....	12
Figure (1.7) : Diagramme de réseau pour une panne près du nœud B.....	14
Figure (2.1) : La transformée en ondelettes discrète .....	22
Figure( 2.2) : Décomposition DWT .....	23
Figure (2.3) : Neuf nombre de La famille Daubechies .....	24
Figure (2.4) : Sept nombre de la famille Symlet .....	24

Figure (2.5) :Ondelette de la famille Coiflet .....	25
Figure (2.6) :Ondelette Biorthogonal .....	25
Figure (2.7) :Ondelette de Meyer .....	26
Figure (2.8) :Ondelette Chapeau Mexicain .....	26
Figure (2.9) :Ondelette Morlet .....	27
Figure (2.10) Ondelette de Shannon .....	27
Figure (3.1) :La fenêtre Matlab .....	33
Figure (3.2) :La fenêtre Simulink .....	34
Figure (3.3) :Le système étudié .....	38
Figure (3.4) :Courbe de courants .....	40
Figure (3.5) cdA1 & cdB1.....	40
Figure (3.6) EcA & EcB.....	41
Figure (3.7) EcA & EcB zoom.....	41



## **Listes des acronymes et abréviations.**

(EMS) Energy Management Systems.

(SCADA) Supervisory Control and Data Acquisition.

(MOV) Metal Oxide Varistor.

(DWT) discrete wavelet transformation.

(WFT) Windowed Fourier Transform.

(CWT) Continuous Wavelet Transformation.

(GPS) Global Positioning System.

(WTC) Discrete wavelet transform coefficients.

## Liste des tableaux

Tableau 1 Analyse par l'onde db8 avec la courbe Ec.....	42
Tableau 2 Analyse par l'onde db8 avec la courbe cd.....	42
Tableau 3 Analyse par l'onde db6 avec la courbe Ec.....	42
Tableau 4 Analyse par l'onde db6 avec la courbe cd.....	43
Tableau 5 Analyse par l'onde db4 avec la courbe Ec.....	43
Tableau 6 Analyse par l'onde db4 avec la courbe cd.....	43
Tableau 7 Analyse par l'onde db8 avec la courbe Ec avec 1 source.....	44
Tableau 8 Analyse par l'onde db4 avec la courbe Ec avec 1 source.....	44



# Introduction générale

---

## Motivations du mémoire

L'énergie électrique est l'une des ressources les plus nécessaires du monde industriel. La population mondiale s'accroît énormément, engendrant ainsi une pénurie croissante d'énergie électrique non seulement pour les pays développés, mais aussi pour les pays en voie de développement et les pays sous-développés. Ainsi, l'utilisation des ressources mondiales existantes nécessite une planification minutieuse et un fonctionnement optimal des réseaux électriques.

Habituellement, les unités de production du courant alternatif sont éloignées des zones de consommation en raison de la localisation des ressources, ce qui pose le problème de la transmission de l'énergie produite à travers les lignes de transmission sur de longues distances. La génération de puissance est effectuée à des dizaines de kilovolts en raison des limites de construction en utilisant des transformateurs élévateurs. Ces niveaux de tension élevés sont utilisés pour la transmission en raison de la nécessité de limiter les courants de ligne et de réduire les pertes de transmission pour une quantité donnée de puissance transmise. Néanmoins, la distribution se fait à des dizaines de kilovolts nécessitant des transformateurs abaisseurs. Outre les générateurs, les transformateurs élévateurs, les lignes de transmission et les transformateurs abaisseurs de distribution, les systèmes d'alimentation comportent divers autres dispositifs et systèmes d'augmentation de l'efficacité et de la prévention des échecs [1].

Étant donné que les systèmes d'alimentation électrique sont construits comme des réseaux interconnectés, à mesure que la taille de ces systèmes augmente, leur fonctionnement devient plus compliqué et les systèmes deviennent plus vulnérables aux perturbations. L'objectif principal des systèmes de gestion de l'énergie est de

garder le système intact et d'assurer le fonctionnement fiable des systèmes d'alimentation. Les systèmes de gestion tels que les systèmes de supervision et d'acquisition de données (SCADA) permettent non seulement de surveiller les grands systèmes d'alimentation en collectant des données en temps réel depuis les appareils de mesure, mais également de contrôler le système et d'afficher les informations d'une manière organisée. La principale préoccupation d'un gestionnaire de réseau de transport est la sécurité du système.

Par conséquent, un tel système devrait traverser différents types de perturbations possibles. Ces perturbations peuvent survenir en raison de défauts permanents ou temporaires entraînant des surtensions, des surintensités, des creux de tension, etc. Les systèmes actuels permettent de maintenir le bon fonctionnement des réseaux électriques. Lorsqu'un défaut survient le long d'une ligne de transmission, les dispositifs de protection (relais, disjoncteurs, etc.) réagissent pour protéger le système des impacts transitoires du défaut en mettant hors service la ligne de transmission défaillante. Ainsi, une action est requise pour effacer la faute. Par exemple, si une ligne de transmission est déconnectée ou si une tour de transmission est endommagée, des réparations seront nécessaires. Cependant, l'emplacement précis et opportun de la source de la perturbation facilite grandement le travail de l'équipe de réparation. Sur les marchés de l'électricité concurrentiels, les services publics sont soucieux de minimiser les interruptions de service et les temps d'arrêt grâce à une localisation rapide et précise des défauts dans les lignes électriques.

L'objectif principal de ce travail de master est l'étude d'un système de localisation de défauts dans les réseaux électriques de transmission. La méthodologie optée pour réaliser un tel système, est basée sur la transformation en ondelettes.

## **Localisation de défaut basée sur les ondelettes**

La technique employée est basée sur la théorie des ondes progressives (tensions ou courants). Une fois que la tension (le courant) est obtenue, une transformation discrète en ondelettes (DWT) sera appliquée pour extraire les informations sur les transitoires et l'emplacement exact des défauts. Tout cela est obtenu en utilisant la connaissance des ondes de traçage via les diagrammes de Bewley [2] [3].

## **Cadre du mémoire**

Ce travail rentre dans le cadre de supervision des réseaux électriques intelligents (Smart-Grids). L'application d'une méthode de localisation permet de définir l'emplacement du défaut le long des lignes de transmission.

Le reste de ce mémoire est organisé comme suit :

Le premier chapitre donnera une introduction à la localisation des défauts dans les systèmes électriques. Les modèles de ligne de transmission sont examinés en même temps que la théorie des ondes progressives. Une revue générale des méthodes de localisation des défauts est donnée ainsi que les méthodes existantes de localisation des défauts basées sur les ondes progressives. Le chapitre deux introduira un aperçu général de la théorie des ondelettes et ses applications dans le réseau électrique. La localisation des défauts à l'aide de la transformée en ondelettes discrète fera aussi l'objet de ce chapitre. Le troisième chapitre décrira les étapes de la simulation et les résultats de localisation de défauts dans un réseau électrique. Enfin, une conclusion achèvera ce manuscrit.

# Chapitre 1 Localisation de défauts dans les réseaux électriques

---

## 1.1 Introduction

La localisation des défauts dans les systèmes de transmission et de distribution d'énergie fait gagner du temps et des ressources pour les services d'électricité, puisque la recherche visuelle des lignes en défaut est coûteuses et parfois peu concluantes. Ces informations précises ainsi obtenues permettent à l'opérateur du système de guider le personnel de maintenance d'opérer sur le terrain [4].

Les systèmes de communication peuvent rassembler et fournir rapidement ces informations de localisation de panne aux opérateurs du système. Les systèmes de localisation des défauts permettent de donner la distance séparant la panne à une extrémité de la ligne de transmission. Cependant, le personnel de terrain peut utiliser ces données pour détecter l'emplacement du défaut dans la carte du réseau électrique interconnecté [4]. La localisation rapide et précise des défauts est également très importante pour la restauration rapide de l'énergie fournie aux clients (consommateurs). Les opérateurs d'un système d'alimentation électrique peuvent identifier et isoler les sections défectueuses sur les lignes à charge en ouvrant les disjoncteurs ou les commutateurs. Par la suite, l'énergie est rétablie aux charges des sections de lignes de transmission saines [5].

La section suivante de ce chapitre présente des généralités sur les modèles de lignes de transmission. Les méthodes existantes de localisation des défauts sont brièvement passées en revue, suivies d'une description détaillée de la théorie des ondes progressives et des techniques de localisation des défauts par ondes progressives.

## 1.2 Modèle de lignes de transmission

Les lignes de transmission sont des liens essentiels entre les unités de production d'énergie et celles de la distribution dans les zones de consommation. Un défaut ou une commutation transitoire se propage le long de la ligne de transmission d'un point à un autre. Le comportement correct des systèmes électriques de puissance pendant les transitoires ne peut être compris par une modélisation précise des lignes de transmission. Bien que les lignes de transmission ont une géométrie simple avec des paramètres simples; résistance série,  $R$ , inductance série,  $L$ , capacité parallèle,  $C$ , et résistance parallèle,  $1/G$  (conductance,  $G$ ).

La modélisation d'une ligne peut être compliquée en raison des éléments suivants:

- Les paramètres de ligne ( $R, L, 1/G$  et  $C$ ) ne sont pas localisés mais distribués le long de la ligne de transmission,
- Les paramètres de série,  $R$  et  $L$ , ne sont pas constants mais dépendent de la fréquence [6,7],
- La masse se comporte comme un fil de retour, constituant une structure asymétrique des conducteurs couplés à la terre.

Les ondes progressives, initiées par un défaut ou par une commutation se propageant le long des conducteurs de la ligne de transmission, peuvent avoir des vitesses multiples avec des amplitudes différentes en raison de la nature multi-conductrice, asymétrique, dépendante, distribuée et dépendante de la fréquence de la ligne de transmission [7]. Dans ces circonstances, les modèles des lignes de transmission peuvent être examinés sous deux thèmes principaux: les modèles à régime permanent et les modèles à états transitoires [8].

### 1.2.1 Modèles de lignes de transmission pour un régime permanent

Trois modèles de fonctionnement en régime permanent sont brièvement décrits dans les sections suivantes. Les modèles sont développés en utilisant une ligne de transmission monophasée. Ces modèles seront facilement généralisés aux systèmes multiconducteurs en remplaçant les scalaires par des matrices.



### a Modèle de la ligne courte

Le modèle de ligne courte dans le domaine fréquentiel est généralement utilisé pour les lignes de transmission de longueur inférieure à 80 km. Ce modèle utilise des paramètres de ligne localisée et une admittance parallèle,  $y = G + j\omega C$  négligée.

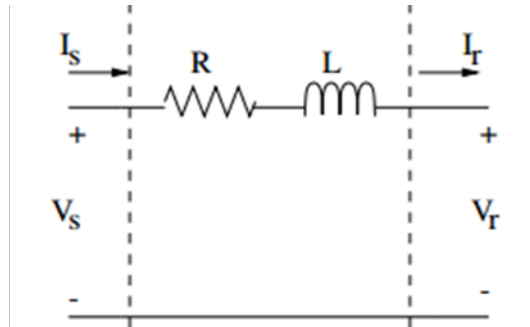


Figure 1.1. Modèle de la ligne courte

Sur la figure (1.1), l'impédance série de la ligne est  $z = R + j2\pi fL$  [ $\Omega/m$ ] où  $f$  est la fréquence de l'alimentation, 50 Hz. L'impédance totale est  $Z = z \cdot l$  [ $\Omega$ ], où  $l$  est la longueur totale de la ligne.  $V_s = V_r + I_s \cdot Z$  et le courant d'entrée  $I_s$  est égal au courant de sortie  $I_r$ .

### b Modèle de la ligne moyenne

Ce modèle est également connu sous le nom de modèle nominal  $\pi$ . Le modèle à ligne moyenne est généralement préféré pour les lignes de transmission dont les longueurs varient entre 80 km et 240 km. Ce modèle utilise également des paramètres de ligne localisée, cependant, contrairement à la susceptance parallèle de modèle de ligne courte,  $B = j\omega C$ , est pris en compte tandis que la conductance parallèle,  $G$ , est négligée comme le montre la figure (2.2).

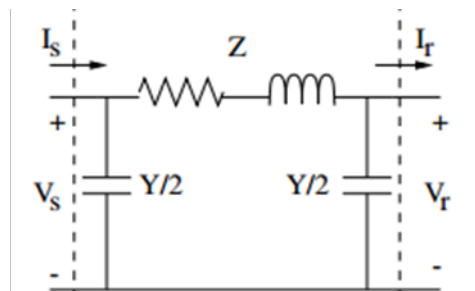


Figure 1.2. Modèle de la ligne moyenne.

L'impédance série est  $z = R + j2\pi fL$  et l'impédance totale série est  $Z = z \cdot l$  où  $l$  est la longueur totale de la ligne. L'admittance parallèle de ligne est  $y = j2\pi fC$  [S/m] et l'admittance totale parallèle est  $Y = y \cdot l$  [S]. Le courant à travers l'impédance série est  $I_r + V_r \cdot Y/2$  et la tension finale d'émission  $V_s = V_r + Z \cdot (I_r + V_r \cdot Y/2)$ . Le courant d'entrée  $I_s$  est  $I_s = I_r + V_r \cdot Y/2 + V_s \cdot Y/2$ .

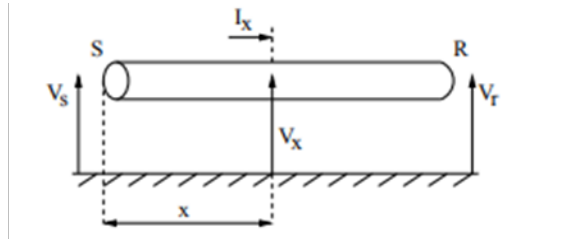
Si les expressions sont réarrangées, la structure suivante dans le domaine fréquentiel est obtenue:

$$\begin{bmatrix} V_s \\ I_s \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} A & B \\ C & D \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_r \\ I_r \end{bmatrix} \quad (1.1)$$

où  $A = D = 1 + ZY/2$ ,  $B = Z$  et  $C = Y(1 + ZY/4)$ .

### c Modèle de ligne longue

Ce modèle est également connu modèle exact  $\pi$  (modèle  $\pi$  équivalent). Pour simplifier, le modèle est développé pour une ligne de transmission monophasée sur la figure (1.3).



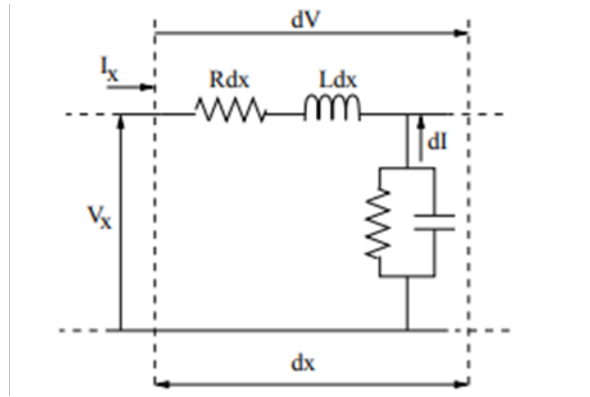
**Figure 1.3.** Ligne de transmission monophasée.

Un élément  $dx$  infinitésimal de la ligne de transmission est également donné à la figure (1.4) où  $dx \rightarrow 0$ .

Les équations de ligne peuvent être écrites dans le domaine fréquentiel comme suit en fonction de la tension,  $dV$  et du courant,  $dI$ :

$$-\frac{dV(x, \omega)}{dx} = (R + j\omega L) \cdot I = zI \quad (1.2)$$

$$-\frac{dI(x, \omega)}{dx} = (G + j\omega C) \cdot V = yV \quad (1.3)$$



**Figure 1.4.** Un élément  $dx$  de la ligne de transmission de la figure (1.3).

Tous les paramètres de la ligne sont donnés par unité de longueur. Les paramètres séries linéaires  $R$  et  $L$  dépendent en général de la fréquence tandis que l'admittance  $y = G + j\omega C$  est supposée constante en pratique. Les équations de propagation suivantes peuvent être obtenues dans le domaine fréquentiel.

En combinant les équations (1.2) et (1.3):

$$+ \frac{d^2V(x, \omega)}{dx^2} = (zy) V \quad (1.4)$$

$$+ \frac{d^2I(x, \omega)}{dx^2} = (yz) I \quad (1.5)$$

Une fois les équations (1.4) et (1.5) résolues, les tensions et les courants le long de la ligne de transmission sont liés comme suit:

$$V_x + Z_c I_x = (V_s + Z_c I_s) \cdot e^{-\gamma x} \quad (1.6)$$

où  $x$  est un point quelconque de la ligne de transmission,  $Z_c = \sqrt{\frac{R+j\omega L}{G+j\omega C}}$  et  $\gamma = \frac{1}{m} \sqrt{(R+j\omega L)(G+j\omega C)}$ .

Dans l'équation (1.6),  $Z_c$  est appelée impédance caractéristique (impédance de surtension) et  $\gamma$  est appelée constante de propagation. Il peut être interprété à partir de l'équation (1.6) que la quantité,  $V_s + Z_c I_s$ , est transmise à un point quelconque,  $x$ , le long de la ligne de transmission en fonction de la fonction de propagation,  $e^{-\gamma x}$ .

Les tensions et les courants peuvent être liés en utilisant l'équation (1.6) comme:

$$V_r + Z_c I_r = (V_s + Z_c I_s) \cdot e^{-\gamma l} \quad (1.7)$$

où  $V_r$  et  $I_r$  reçoivent respectivement la tension et le courant de sortie. Si  $V + Z_c I$  est appelée fonction de ligne directe  $F$ , alors l'équation (1.7) est exprimée de façon compacte comme suit :

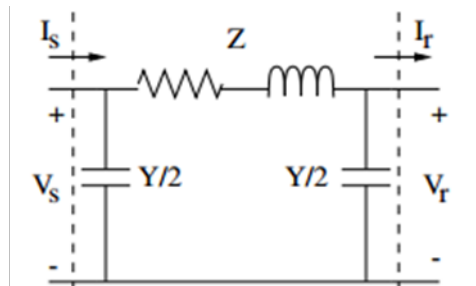
$$F_r = F_s \cdot e^{-\gamma l} \quad (1.8)$$

L'équation (1.7) peut être utilisée pour dériver des modèles de ligne de transmission à la fois pour les analyses en régime permanent et transitoire [6].

En utilisant l'équation (1.7), la relation entre les tensions finales d'émission et de réception peut être exprimée sous la forme de l'équation (1.1) pour l'analyse en régime permanent :

$$A = D = \cosh(\gamma l), B = Z_c \sinh(\gamma l) \text{ et } C = \sinh(\gamma l) / Z_c$$

$\pi$ -circuit peut également être dérivé en utilisant le formulaire ABCD comme le montre la figure (1.5).



**Figure 1.5.** Modèle de ligne exacte.

$$Z = z \cdot l \cdot \frac{\sinh \gamma l}{\gamma l} \quad (1.9)$$

$$Y = y \cdot l \cdot \frac{\tanh \gamma l / 2}{\gamma l / 2} \quad (1.10)$$

Ici  $z$  et  $y$  sont l'impédance série et l'admittance parallèle par unité de longueur comme dans les équations (1.2) et (1.3). Notez que les composantes de circuit- $\pi$   $Z$  et  $Y$  dépendent toutes les deux de la fréquence. Pour les modèles de ligne moyenne, les

facteurs de correction hyperboliques dans les équations (1.2) et (1.3),  $\frac{\sinh \gamma l}{\gamma l}$  et  $\frac{\tanh \gamma l/2}{\gamma l/2}$  approchent 1 approximant le modèle  $\pi$  exact au modèle nominal  $\pi$  (où  $Z = z \cdot l$  et  $Y = y \cdot l$ ).

## 1.2.2 Théorie des ondes mobiles et modèles de lignes de transmission pour un état transitoire

Comme indiqué précédemment, pour les solutions à fréquence unique telles que le fonctionnement en régime permanent, les paramètres de circuit  $\pi$  exacts,  $Z$  et  $Y$ , sont calculés dans le domaine fréquentiel en utilisant les équations (1.9) et (1.10). Cependant, comme ces paramètres sont en fonction de la fréquence, il est difficile de les approximer pour les analyses des états transitoires dans le domaine temporel. Une structure de circuit simple de lignes de transmission pour les études transitoires dans le domaine temporel est dérivée en considérant l'effet de découplage entre les extrémités émettrice et réceptrice d'une ligne de transmission qui est due au temps de déplacement,  $\tau$ , des ondes le long de la ligne. Cela signifie que les extrémités d'émission et de réception d'une ligne de transmission sont déconnectées les unes des autres à un instant  $t$ .

### *a Équations d'onde de ligne de transmission et modèle de ligne idéal*

Les équations de ligne de transmission introduites dans les équations (1.2) à (1.5) dans le domaine fréquentiel, sont étudiées pour l'analyse du domaine temporel en considérant une ligne de transmission sans perte avec des paramètres distribués. L'élément  $dx$  infinitésimal de la figure (1.4) est supposé être sans perte où la résistance en série,  $R$ , et la conductance parallèle,  $G$ , sont ignorées. Les équations de ligne de transmission dans le domaine temporel sont alors données comme :

$$\frac{dV}{dx} = -L \frac{dI}{dt} \quad (1.11)$$

$$\frac{dI}{dx} = -C \frac{dV}{dt} \quad (1.12)$$

Une fois différenciées par rapport à  $x$ , les équations suivantes sont obtenues à partir des équations (1.11) et (1.12):

$$\frac{d^2V}{dx^2} = LC \frac{d^2I}{dt^2} \quad (1.13)$$

$$\frac{d^2V}{dx^2} = LC \frac{d^2I}{dt^2} \quad (1.14)$$

Les équations (1.13) et (1.14) constituent les équations d'onde de la ligne de transmission qui sont bien connues. Alembert a montré que ces équations sont satisfaites avec [9]:

$$v(x, t) = F\left(t - \frac{x}{v}\right) + B\left(t + \frac{x}{v}\right) \quad (1.15)$$

$$i(x, t) = \frac{1}{Z_c} \left[ F\left(t - \frac{x}{v}\right) - B\left(t + \frac{x}{v}\right) \right] \quad (1.16)$$

où  $v = 1 / \sqrt{LC}$  est la vitesse d'onde progressive de la ligne sans perte,  $Z_c = \sqrt{L/C}$  est l'impédance caractéristique et  $F$  et  $B$  sont les fonctions d'onde progressive avant et arrière qui sont arbitraires et déterminées par les conditions aux limites. Si on multiplie l'équation (1.16) par  $Z_c$  et on ajoute ou on soustrait de l'équation (1.15), les expressions suivantes sont obtenues:

$$v(x, t) + Z_c i(x, t) = 2Z_c F\left(t - \frac{x}{v}\right) \quad (1.17)$$

$$v(x, t) - Z_c i(x, t) = 2Z_c B\left(t + \frac{x}{v}\right) \quad (1.18)$$

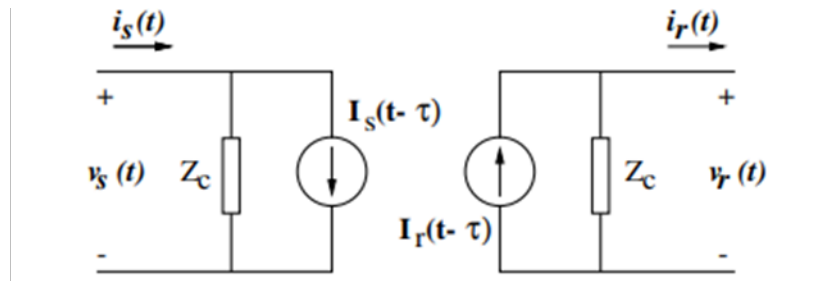
Le côté gauche de l'équation (1.17),  $v + Z_c i$  reste constant lorsque l'argument  $t - x/v$  est constant. Ainsi,  $v + Z_c i$  reste constant pour un observateur fictif se déplaçant à la vitesse  $v$  dans la direction  $x$  positive le long de la ligne de transmission. Si le temps de parcours  $\tau = l / v$  est le temps de passage de l'extrémité émettrice à la fin de la réception de la ligne, la valeur de  $(v + Z_c i)$  à l'instant  $t$  à l'émission doit être la valeur à l'instant  $t + \tau$  à la réception. De même,  $(v - Z_c i)$  dans l'équation (1.18) reste constant quand  $t + x/v$  est constant. Alors,  $v - Z_c i$  reste constant pour un observateur fictif se déplaçant à une vitesse,  $v$ , dans la direction  $x$  négative. Par conséquent, la valeur de  $(v - Z_c i)$  à l'instant  $t$  à la réception doit être la valeur à

l'instant  $t + \tau$  à la fin de l'émission. Ceux-ci peuvent être exprimés respectivement comme suit [9]:

$$v_s(t) + Z_c i_s(t) = v_r(t + \tau) + Z_c i_r(t + \tau) \quad (1.19)$$

$$v_r(t) - Z_c i_r(t) = v_s(t + \tau) - Z_c i_s(t + \tau) \quad (1.20)$$

Notez que pour une ligne de transmission sans perte où  $\gamma = j\omega\sqrt{LC}$ , l'équation (1.19) est la transformation de Laplace inverse de (1.7) étant donné que  $\tau = l/v = l\sqrt{LC}$  et  $\gamma l = j\omega\tau$ . Suite à ces manipulations, une ligne de transmission idéale (sans perte) dans le domaine temporel est représentée par:



**Figure 1.6.** Modèle à temps discret pour une ligne de transmission sans perte.

Les manipulations nécessaires conduisent aux formules explicites des courants terminaux en termes de sources de courant équivalentes,  $I_s$  et  $I_r$  comme suit:

$$i_s(t) = I_s(t - \tau) + \frac{v_s(t)}{Z_c} \quad (1.21)$$

$$i_r(t) = I_r(t - \tau) - \frac{v_r(t)}{Z_c} \quad (1.22)$$

Les mises à jour du passé des sources actuelles sont données comme suit:

$$I_s(t) = I_r(t - \tau) - \frac{2}{Z_c} v_r(t) \quad (1.23)$$

$$I_r(t) = I_s(t - \tau) + \frac{2}{Z_c} v_s(t) \quad (1.24)$$

Dans les simulations transitoires en domaine temporel, les paramètres de circuit à temps continu tels que  $L$  et  $C$  sont transformés en paramètres temporels discrets. Une

inductance localisée,  $L$  est exprimée par la connexion en parallèle d'une résistance  $RL = 2L / \Delta t$  ( $\Delta t$  est la taille du pas de simulation) et un terme du passé d'une source de courant. Le courant circulant à travers une inductance localisée est explicitement donné comme suit:

$$i(t) = \frac{v(t)}{2L/\Delta t} + I_L(t - \Delta t) \quad (1.25)$$

$$I_L(t - \Delta t) = i(t - \Delta t) + \frac{v(t - \Delta t)}{2L/\Delta t} \quad (1.26)$$

De même, un modèle discret pour une capacité localisée  $C$  est exprimé par la connexion en parallèle d'une résistance  $RC = \Delta t / 2C$  et un terme du passé d'une source de courant. Le courant circulant à travers une capacité localisée est donné comme:

$$i(t) = \frac{v(t)}{\Delta t/2C} - I_C(t - \Delta t) \quad (1.27)$$

$$I_C(t - \Delta t) = i(t - \Delta t) + \frac{v(t - \Delta t)}{\Delta t/2C} \quad (1.28)$$

### ***b Diagramme de treillis***

Les transitoires déclenchés par défaut ou par commutation sont composés d'ondes progressives. Pendant que ces ondes se propagent le long des lignes, des réflexions se produisent en raison des discontinuités telles que le point de défaut, la réception ou l'envoi des bornes de l'extrémité d'une ligne. Ces transitoires continuent de rebondir entre le point de défaut et les bornes jusqu'à ce qu'un état stable post-défaut soit atteint. La modification des transitoires du nœud terminal ne peut être comprise qu'en utilisant la fameuse méthode du diagramme en treillis [2]. La figure (1.7) montre un exemple où une ligne sans perte monophasée est considérée avec un défaut à proximité du nœud B. Le diagramme de treillis montre plusieurs réflexions et réfractions initiées par le défaut.

Les instants d'arrivée des ondes en marche arrière et avant sont indiqués dans le diagramme. Supposons que le défaut est éloigné de  $l$  du nœud A. L'instant d'arrivée de



l'onde progressive vers l'avant sur le nœud B est,  $t_1 = (l - x)/v$ , et l'instant d'arrivée de l'onde arrière sur le nœud A est,  $t_2 = x/v$  où  $l$  est la longueur totale de la ligne et  $v$  est la vitesse de l'onde progressive. Cette information sera utilisée pour localiser le défaut.

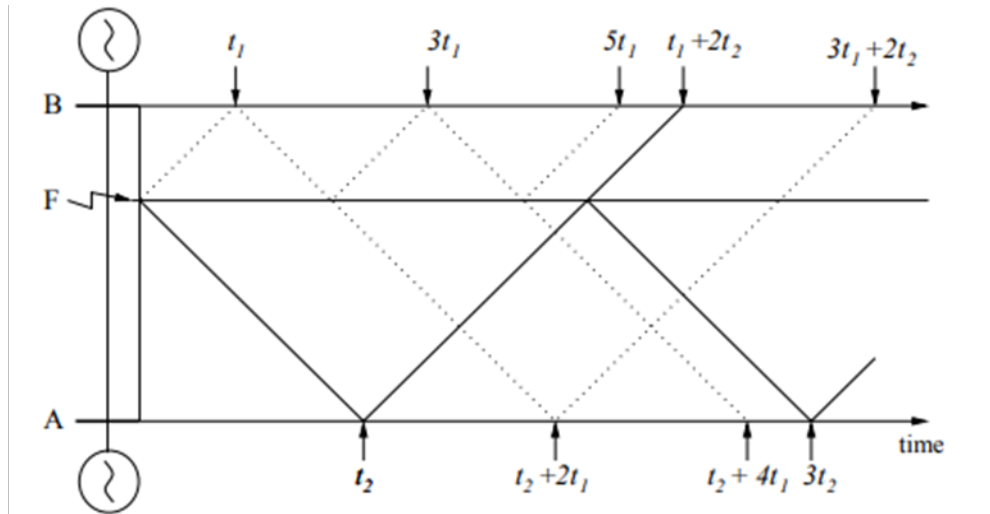


Figure 1.7. Diagramme de réseau pour une panne près du nœud B.

### 1.3 Examen général des techniques de localisation des défauts

Toutes les méthodes de localisation de défauts nécessitent une tension simple ou double et des informations de courant pour chaque phase. De nombreuses techniques de traitement du signal requises pour la protection des lignes sont également nécessaires pour les techniques de localisation des défauts. Les techniques de localisation de défauts les plus courantes seront brièvement passées en revue dans les sous-sections suivantes.

#### 1.3.1 Méthodes basées sur les équations différentielles

Le principal avantage des méthodes de localisation de défauts utilisant des solutions d'équations différentielles est qu'elles n'ont pas besoin d'estimer les phaseurs de tension et de courant. L'idée de base est de résoudre les équations différentielles des lignes de transmission et, par conséquent, d'estimer l'impédance de défaut. Une fois l'impédance de défaut calculée, la distance à l'erreur est facilement déterminée. Les auteurs de la référence [10] utilisent le modèle de ligne courte où l'équation différentielle de ligne est donnée comme:

$$V_{x_1}(t) - V_{x_2}(t) = \left( x_2 - x_1 \left[ R I(t) + L \frac{dI(t)}{dt} \right] \right) \quad (1.29)$$

où  $x_1$  et  $x_2$  sont deux endroits différents le long de la ligne.

La référence [11] utilise un modèle de ligne longue (modèle  $\pi$  exact) pour résoudre les équations suivantes:

$$\frac{dV}{dx} + L \frac{dI}{dt} = -Ri \quad (1.30)$$

$$C \frac{dV}{dt} + \frac{dI}{dx} = 0 \quad (1.31)$$

où  $V$  est la tension de phase,  $I$  est le courant de phase,  $R$  est la résistance en série,  $L$  est l'inductance en série,  $C$  est la capacité de la ligne.

D'après la section sur les modèles de ligne de transmission, le modèle de ligne courte est simple mais utile pour les lignes très courtes. La négligence de la capacité de la ligne entraîne des résultats de localisation de défaut inexacts. Les méthodes de localisation de défauts utilisant un modèle de ligne exact sont plus précises, mais elles sont sensibles à la transposition, au couplage de ligne, à l'angle de création de défaut, aux changements des paramètres dans différentes gammes de fréquences.

### 1.3.2 Méthodes basées sur les hautes fréquences

Les méthodes basées sur les hautes fréquences utilisent les transitoires très rapides initiés par un défaut. Les transitoires rapides sont composés de très hautes fréquences variant de kHz à MHz par rapport à la fréquence en régime permanent, 50 Hz. Ces transitoires évoluent en fonction des ondes de déplacement vers l'avant et vers l'arrière qui se propagent le long des lignes de transmission avec une vitesse proche de la vitesse de la lumière. La localisation des défauts par ondes de déplacement pour les lignes de transmission est initialement formulée dans la référence [12] en définissant un discriminateur identifiant le défaut, qu'il soit situé devant ou derrière le relais. Les auteurs de la référence [13] ont proposé une autre technique calculant la variation des signaux de tension et de courant et utilisant une trajectoire  $\Delta V - R\Delta I$  pour localiser le défaut. La référence [14] a proposée des méthodes basées sur la corrélation calculant le délai entre l'onde progressive et sa réflexion à partir de la localisation d'un défaut

par une fonction de corrélation croisée. La référence [15] propose une méthode utilisant la technique d'estimation du maximum de vraisemblance pour estimer les temps d'arrivée des ondes progressives.

Un bref aperçu des méthodes de localisation des défauts par ondes progressives peut être trouvé dans [16] donne un aperçu complet des algorithmes de localisation de défauts basés sur les ondes progressives.

Récemment, des techniques sophistiquées de traitement du signal ont été introduites pour surmonter les complexités des méthodes d'ondes progressives basées sur la corrélation. Une telle technique est initialement introduite par Magnago et Abur dans [17] et étendue à des topologies de réseau électrique plus complexes dans [18] et [19]. Magnago et Abur ont proposé l'utilisation de la technique de transformation en ondelettes pour extraire les informations sur les transitoires des signaux de tension. Cette technique est brièvement passée en revue au prochain chapitre.

L'approche par ondes progressives est l'approche la plus rapide parmi les techniques de localisation de défauts; cependant, les techniques de localisation de défauts basées sur les ondes progressives sont sensibles aux défauts de proximité où le défaut est situé très près des bornes. Un autre inconvénient de ces méthodes est que les existences de discontinuités le long des lignes de transmission augmentent la réalisation de l'onde progressive.

## **1.4 Conclusion**

Dans ce chapitre, un contexte détaillé des lignes de transmission des réseaux électriques pour la localisation des défauts a été présenté, suivi d'une description sur les modèles de ligne de transmission pour les analyses en régime permanent et transitoire. En plus, la théorie des ondes mobiles a été examinée pour étudier la progression des ondes. Le chapitre suivant passe en revue les limites des transformations à base de Fourier, ainsi que les informations de base sur la transformation par ondelettes. À la fin du prochain chapitre, une technique de localisation de défauts basée sur les ondes progressives utilisant l'analyse par ondelettes sera également expliquée.

# Chapitre 2 Localisation des défauts basée sur la transformée en ondelette

---

## 2.1 Introduction

La théorie des ondelettes est initialement développée au début du 20<sup>ème</sup> siècle. Cependant, elle est devenue très populaire dans divers domaines tels que l'acoustique, la prédiction des tremblements de terre dans les années 1980 et l'analyse et la synthèse des signaux non stationnaires.

L'analyse par ondelettes est basée sur l'expansion des fonctions en termes d'un ensemble de fonctions de base. Contrairement à l'analyse de Fourier, l'analyse par ondelettes étend les fonctions non pas en termes de polynômes trigonométriques, mais en termes de petites ondes, ondelettes, en appliquant des translations et des dilatations. Contrairement à l'analyse de Fourier, qui donne une représentation d'un signal en fréquence, l'analyse par ondelettes fournit une représentation à la fois en temps et en fréquence. L'analyse en ondelettes spécifie le temps d'occurrence et la fréquence d'une perturbation transitoire sur un signal. Les sections suivantes fournissent la description des fondamentaux de la transformation en ondelettes, suivie des applications de la transformée en ondelettes dans les réseaux électriques. L'analyse est résumée par un examen d'une technique de localisation de défauts basée sur les ondes progressives utilisant l'analyse par ondelettes [20] [21].

## 2.2 Principes fondamentaux de la transformation en ondelettes

### 2.2.1 C'est quoi une onde

Une onde est la propagation d'une perturbation produisant sur son passage une variation réversible des propriétés physiques locales du milieu. Elle se déplace avec une vitesse déterminée qui dépend des caractéristiques du milieu de propagation.

Physiquement parlant, une onde est un champ, c'est-à-dire une zone de l'espace dont les propriétés sont modifiées. On affecte alors à chaque point de l'espace des grandeurs physiques scalaires ou vectorielles.

Comme tout concept unificateur, l'onde recouvre une grande variété de situations physiques très différentes.

### **2.2.2 Types d'ondes**

On distingue plusieurs catégories d'ondes :

Les ondes longitudinales, où les points du milieu de propagation se déplacent localement selon la direction de la perturbation (exemple type : la compression ou la décompression d'un ressort, le son dans un milieu sans cisaillement : eau, air...)

Les ondes transversales, où les points du milieu de propagation se déplacent localement perpendiculairement au sens de la perturbation, de sorte qu'il faut faire intervenir une grandeur supplémentaire pour les décrire (exemple type : les ondes des tremblements de terre, les ondes électromagnétiques). On parle pour décrire ceci de polarisation.

Le milieu de propagation d'une onde peut être tridimensionnel (onde sonore, lumineuse, etc.), bidimensionnel (onde à la surface de l'eau), ou unidimensionnel (onde sur une corde vibrante).

Une onde peut posséder plusieurs géométries : plane, sphérique. Elle peut également être progressive, stationnaire ou évanescence (voir Propagation des ondes). Elle est progressive lorsqu'elle s'éloigne de sa source, elle s'en éloigne indéfiniment si le milieu est infini, si le milieu est borné elle peut se réfléchir sur les bords, sur la sphère (comme la Terre par exemple) les ondes peuvent revenir au point de départ en faisant un tour complet.

D'un point de vue plus formel, on distingue également les ondes scalaires qui peuvent être décrites par un nombre variable dans l'espace et dans le temps (le son dans les fluides par exemple), et les ondes vectorielles qui nécessitent un vecteur à leur description (la lumière par exemple), voire des ondes tensorielles (d'ordre 2) pour les ondes gravitationnelles de la relativité générale.

Si l'on définit les ondes comme associées à un milieu matériel, les ondes électromagnétiques sont exclues. Pour éviter de les exclure on peut définir les ondes comme des perturbations d'un milieu, au sens large, matériel ou vide. Dans ce dernier cas c'est une perturbation électromagnétique qui peut se propager dans le vide (de matière).

### **2.2.3 Ondes progressives périodiques**

Le cas le plus simple d'onde progressive périodique est une onde dite « monochromatique » et « unidimensionnelle »

Si l'on prend un cliché du milieu à un moment donné, on voit que les propriétés du milieu varient de manière sinusoïdale en fonction de la position. On a donc une périodicité spatiale ; la distance entre deux maxima est appelée longueur d'onde, et elle est notée  $\lambda$ . Si l'on prend des photographies successives, on voit que ce « profil » se déplace à une vitesse nommée vitesse de phase mais si l'on se place à un endroit donné et que l'on relève l'intensité du phénomène en fonction du temps, on voit que cette intensité varie selon une loi elle est aussi sinusoïdale, le temps qui s'écoule entre deux maxima est appelé période il est noté  $T$ .

### **2.2.4 Modélisation d'une onde progressive**

Une onde progressive unidimensionnelle se modélise par une fonction  $A(X, t)$  d'amplitude  $A$ ,  $X$  étant la position dans l'espace (vecteur) et  $t$  l'instant considéré.

Une très grande famille des solutions d'équations de propagation des ondes est celle des fonctions sinusoïdales, sinus et cosinus (elles ne sont pas les seules). On montre également que tout phénomène périodique continu peut se décomposer en fonctions sinusoïdales (série de Fourier), et de manière générale toute fonction

continue (transformée de Fourier). Les ondes sinusoïdales sont donc un objet d'étude simple et utile.

Dans ce cadre, une onde sinusoïdale peut s'écrire :

$$A(x, t) = A_0 \sin(\omega t - kx + \theta) \quad (2.1)$$

Où :

- amplitude : le facteur,  $A_0$
- phase : l'argument du sinus,  $\omega t - kx + \theta$
- tandis que  $\theta$ , est la phase à l'origine lorsque  $t$ , et  $x$ , sont nuls. La phase absolue d'une onde n'est pas mesurable. La lettre grecque  $\omega$ , désigne la pulsation de l'onde ; on note qu'elle est donnée par la dérivée de la phase par rapport au temps :

$$\frac{\partial}{\partial t}(\omega t - kx + \theta) = \omega$$

Le vecteur  $k$  est le vecteur d'onde, lorsque l'on se place sur un seul axe ce vecteur est un scalaire et il est appelé nombre d'onde : c'est le nombre d'oscillations que l'on dénombre sur  $2\pi$  unités de longueur.

On a pour la norme du vecteur d'onde :

$$k = \frac{2\pi}{\lambda} \quad (2.2)$$

La pulsation s'écrit en fonction de la fréquence  $f$  :

$$\omega = 2\pi f = \frac{2\pi}{T}$$

La vitesse de phase vaut enfin :

$$c = \frac{\lambda}{T} = \frac{\omega}{k}$$

Une autre écriture permet de ne faire apparaître que la période temporelle  $T$  et la longueur d'onde  $\lambda$  :

$$A(x, t) = A_0 \sin\left(2\pi \frac{t}{T} - 2\pi \frac{x}{\lambda} + \theta\right) \quad (2.3)$$

Dans les réseaux électriques de nombreux signaux non périodiques peuvent contenir des composantes transitoires sinusoïdales et impulsionnelles.

Pour de tels types de signaux, une résolution temps-fréquence est nécessaire, le spectre de ces signaux ne peut pas être extrait par la transformée de Fourier rapide (TFR). Pour surmonter la limitation de la TFR, l'analyse en ondelettes est utilisée. La transformée en ondelettes est adaptée aux signaux à large bande. Elle a une propriété multi-résolution qu'il va ajuster les largeurs de temps à sa fréquence. Pour des fréquences plus élevées, les ondelettes se rétrécissent et les fréquences plus basses s'élargissent.

### 2.2.5 Transformation continue en ondelettes (CWT)

Dans la transformée continue en ondelettes, l'ondelette mère est continuellement dilatée et translation. Cela produira des informations redondantes substantielles.

Le paramètre de mise à l'échelle  $a$  est inversement proportionnel à la fréquence. Si  $a$  est grand, l'ondelette mère est de basse fréquence, et si  $a$  est petit, l'ondelette mère est de haute fréquence. L'information de l'onde tandis que les échelles basses fournissent l'information de détail de l'onde.

La transformée en ondelette continue d'un signal  $s(t)$  est donné par :

$$WT(s(t), a, b) = \frac{1}{\sqrt{a}} \int_{-\infty}^{+\infty} s(t) \theta^*\left(\frac{t-b}{a}\right) dt \quad (2.4)$$

où,  $a$  est la constante d'échelle (dilatation) et  $b$  est une constante de décalage temporel.  $\theta$  est la fonction d'ondelette mère, et l'astérisque indique la conjugaison complexe.



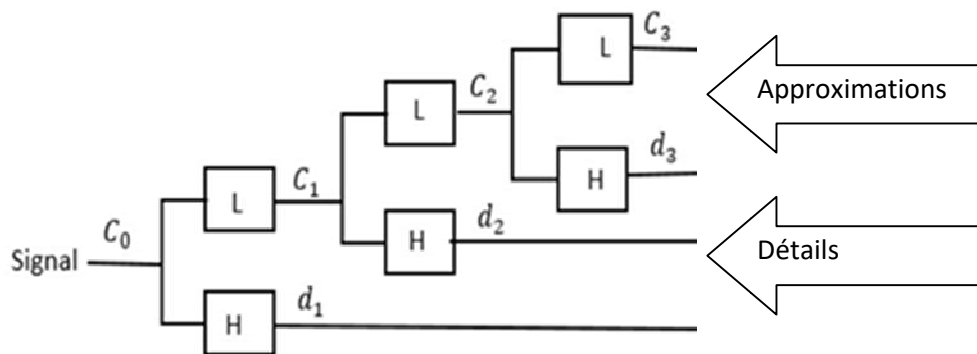
## 2.2.6 Transformation discrète en ondelettes (DWT)

La transformée en ondelettes discrète est utilisée pour trouver la transformée en ondelettes des formes d'onde des échantillons. La transformée discrète en ondelettes (DWT) est donnée par :

$$WT(s(n), a, b) = \frac{1}{\sqrt{a_0^m}} \sum_n s(n) \theta^* \left( \frac{n - ka_0^m}{a_0^m} \right) \quad (2.5)$$

où,  $a, b$  de sont remplacés par  $a_0^m$  et  $ka_0^m$  respectivement et  $k, m$  sont des entiers.

La transformée en ondelettes discrète basée sur la banque de filtres est représentée sur la figure (2.1).

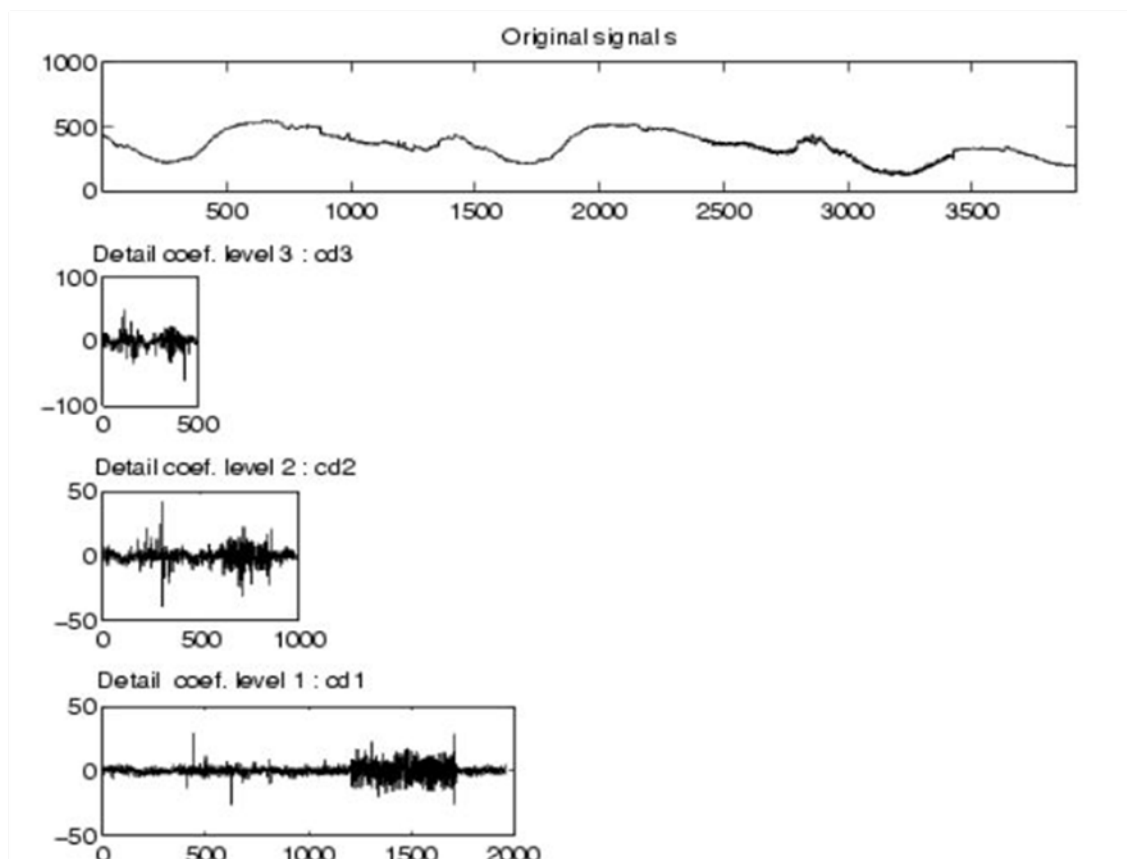


**Figure 2.1.** Transformée en ondelettes discrète.

La figure (2.1) montre que la transformée en ondelettes discrète a des filtres passe-bande et passe-bas à chaque étape d'échelle. Signal  $C_0$  est décomposé par les filtres passe-haut et passe-bas en deux signaux  $C_1$  et  $d_1$  à l'échelle 1.  $C_1$  est une version lissée du signal original. Il contient seulement de faibles composants de fréquence. Le coefficient de la transformée en ondelettes  $d_1$  est une version détaillée du signal original [22]. Comme il est filtré par un filtre passe-bande, il a des composantes de fréquence plus élevée.  $d_1$  est aussi la différence entre les signaux d'origine  $C_0$  et  $C_1$ . Le nombre d'échantillons dans  $C_1$  et  $d_1$  sont la moitié de celui de  $C_0$  pour la même période d'observation car les filtres passe-haut et passe-bas décomposent le signal par facteur de deux [22]. Le signal  $d_1$  présente une occurrence détaillée de perturbation.

A l'échelle 2, la décomposition est faite de la même manière au signal  $C_1$  [22]. De même,  $C_2$  est une version lissée de  $C_1$  et  $C_3$  est une version lissée de  $C_2$ .

Le nombre d'échantillons à l'échelle 2 est la moitié de celui de l'échelle 1 et le nombre d'échantillons à l'échelle 3 est la moitié de celui de l'échelle 2, mais la période d'observation est la même pour toutes les échelles. L'ondelette mère oscille rapidement en peu de temps du temps à l'échelle 1. De cette manière, le signal est dilaté avec différentes résolutions à différents niveaux pour une meilleure observation de l'événement de perturbation. À des échelles plus élevées en raison de la dilatation des signaux, l'ondelette mère oscille moins. Donc, l'ondelette mère devient moins localisée dans le temps à des échelles supérieures. Pour cette raison, des perturbations transitoires rapides et courtes sont détectées à des échelles inférieures. De même, des perturbations transitoires longues et lentes sont détectées à des échelles supérieures.



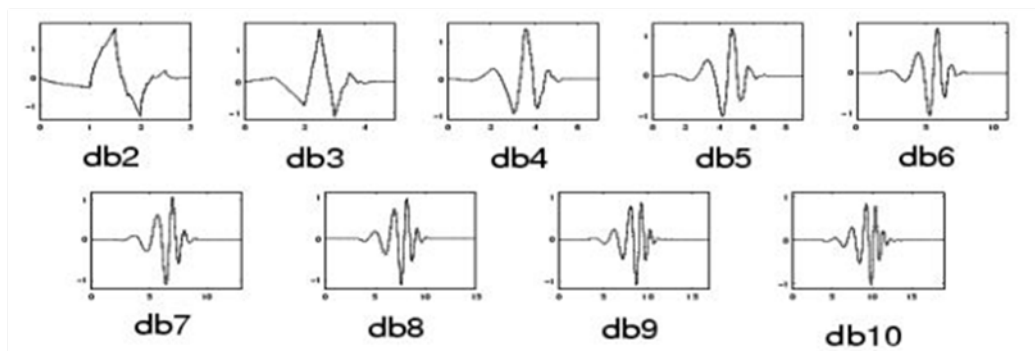
**Figure 2.2.** Décomposition DWT.

Il existe plusieurs de familles d'ondelettes :

**a Ondelette de Daubechies**

La famille d'ondelettes de Daubechies fournit les ondelettes mères les plus appropriées pour les études sur les transitoires électromagnétiques du système d'alimentation

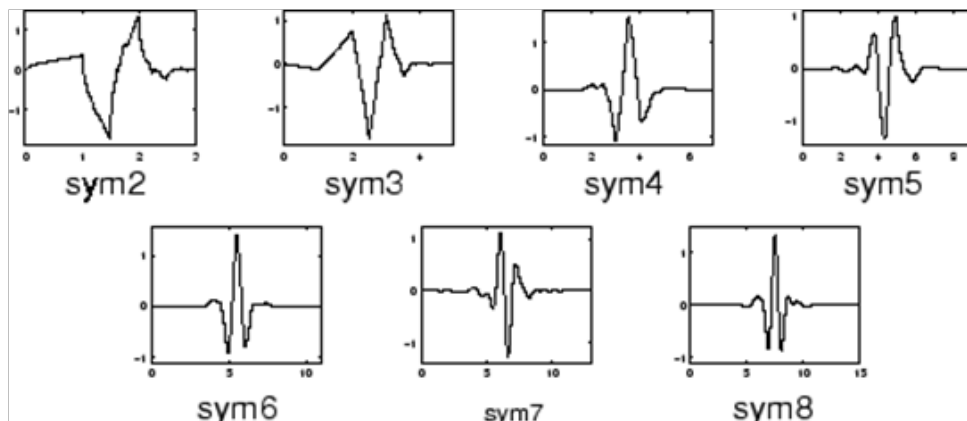
L'ondelette de Daubechies est utilisée pour détecter et localiser l'événement de perturbation [22]. L'ondelette de Daubechies possède de nombreux coefficients de filtrage tels que Daub4, Daub6, Daub8 et Daub10.



**Figure 2.3.** Neuf membres de la famille Daubechies.

**b Ondelette de Symlet**

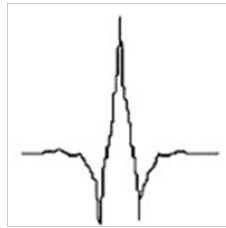
En mathématiques appliquées, les ondelettes de Symlet sont une famille d'ondelettes. Ils sont une version modifiée des ondelettes de Daubechies avec une symétrie accrue.



**Figure 2.4.** Sept membres de la famille Symlet.

### **c Ondelette de Coiflet**

Les Coiflets sont des ondelettes discrètes conçues par Ingrid Daubechies, à la demande de Ronald Coifman pour avoir des fonctions d'échelle avec des moments de fuite. L'ondelette est proche de la symétrie, ses fonctions d'ondelettes ont des moments de fuite et des fonctions d'échelle.



**Figure 2.5.** Ondelette de la famille Coiflets.

### **d Ondelettes Biorthogonales**

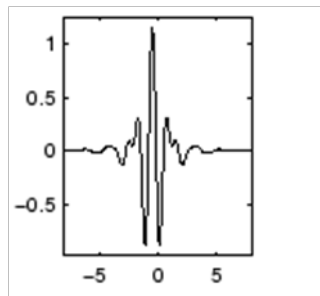
Une ondelette mère associée à une base d'ondelettes orthogonales doit vérifier un ensemble de contraintes théoriques assez fortes. La seule ondelette orthogonale qui soit symétrique est l'ondelette de Haar. En revanche si on n'impose pas que l'ondelette d'analyse soit égale à celle de synthèse on a plus de souplesse dans le choix des propriétés de l'ondelette. En particulier il est possible de construire des ondelettes biorthogonales symétriques avec plus d'un moment nul. Cette symétrie est intéressante en particulier sur les images car les propriétés des artefacts d'une compression en ondelettes sont liées aux propriétés des ondelettes. De plus on peut choisir des ondelettes d'analyse avec beaucoup de moments nuls et des ondelettes de synthèse plus régulières. Un dernier avantage de s'affranchir de l'orthogonalité est de pouvoir fournir des formules analytiques.



**Figure 2.6.** Ondelette Biorthogonal (gauche), Ondelette de Haar (droite).

### ***e Ondelette de Meyer***

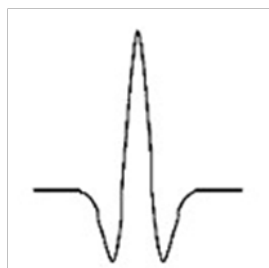
L'ondelette de Meyer est une ondelette orthogonale proposée par Yves Meyer. En tant que type d'ondelette continue, elle a été appliquée dans un certain nombre de cas, tels que les filtres adaptatifs, les champs aléatoires fractals et la classification multi-défauts.



**Figure 2.7.** Ondelette Meyer.

### ***f Ondelette chapeau mexicain***

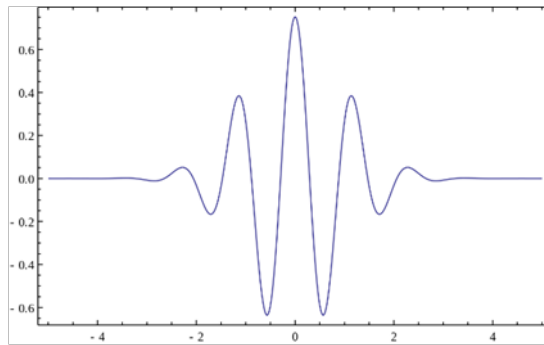
En mathématiques et en analyse numérique, l'ondelette chapeau mexicain est le négatif normalisé de la dérivée seconde d'une fonction gaussienne, c'est-à-dire à l'échelle et à la normalisation près, la seconde d'un polynôme d'Hermite. C'est un cas particulier de la famille des ondelettes continues (l'ondelette utilisée dans la transformée en ondelettes continue) connue sous le nom d'ondelettes hermitienne. Elle est généralement dénommée "chapeau mexicain" aux États-Unis, car la forme de sa courbe rappelle un chapeau typique du Mexique. Dans la nomenclature technique, cette fonction est connue sous le nom d'ondelettes Ricker, souvent utilisée pour le traitement des données sismiques.



**Figure 2.8.** Ondelette chapeau mexicain.

### ***g* Ondelette Morlet**

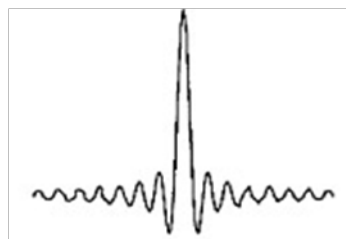
En mathématiques, l'ondelette de Morlet est une ondelette composée d'une exponentielle complexe (porteur) multipliée par une fenêtre gaussienne (enveloppe). Cette ondelette est étroitement liée à la perception humaine, à la fois auditive et vision.



**Figure 2.9.** Ondelette Morlet.

### ***h* Ondelette de Shannon**

En analyse fonctionnelle, une ondelette de Shannon peut être de type réel ou complexe. L'analyse du signal par les filtres passe-bande idéaux définit une décomposition connue sous le nom d'ondelettes de Shannon (ou ondelettes sinc). Les systèmes Haar et sinc sont des duels de Fourier l'un de l'autre.



**Figure 2.10.** Ondelette de Shannon.

Le travail de la référence [22] a montré que les ondelettes de Daub4 et de Daub6 sont meilleures pour l'étude des perturbations du réseau électrique. Celles-ci elles sont courtes et rapides. Les ondelettes Daub8 et Daub10 conviennent mieux aux perturbations qui sont transitoires et lentes. Dans notre travail, l'ondelette Daub4 a été utilisée.

## 2.3 Emplacement de défaut utilisant la transformation d'ondelette

Considérons une ligne de transmission monophasée sans perte de longueur  $l$ , connectée entre les nœuds A et B, avec une impédance caractéristique  $Z_c$  et une vitesse d'onde progressive  $v$ . Si un défaut se produit à une distance  $x$  du nœud A, cela apparaît comme une injection brutale au point de défaut. Cette injection se déplacera comme une surtension le long de la ligne dans les deux directions et continuera de rebondir entre le point de défaut et les deux nœuds terminaux jusqu'à ce que l'état stationnaire de défaut soit atteint. Par conséquent, les transitoires de défaut enregistrés aux bornes de la ligne contiendront des changements brusques à des intervalles correspondant aux temps de déplacement des signaux entre le défaut et les bornes. En utilisant la connaissance de la vitesse des ondes progressives le long de la ligne donnée, la distance au point de défaut peut être déduite facilement. C'est l'idée essentielle derrière les méthodes d'ondes itinérantes. Contrairement aux méthodes basées sur les corrélations où les composantes d'onde progressive avant et arrière sont calculées et utilisées pour l'autocorrélation.

Dans l'approche basée sur les ondelettes, le signal électrique (tension ou courant) à l'emplacement du relais est directement analysé. Dans les lignes de transmission triphasées, les ondes progressives sont mutuellement couplées et, par conséquent, une seule vitesse d'onde progressive n'existe pas. Afin de mettre en œuvre la méthode des ondes progressives dans les systèmes triphasés, les signaux de domaine de phase sont d'abord décomposés en leurs composantes modales au moyen des matrices de transformation modale. Dans cette étude, tous les modèles de lignes de transmission sont supposés être entièrement transposés, et donc la matrice de transformation réelle et constante bien connue de Clarke donnée par l'équation suivante est utilisée.

$$\begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 2 & -1 & -1 \\ 0 & \sqrt{3} & -\sqrt{3} \end{bmatrix}$$

Les signaux de phase sont transformés en leurs composantes modales en utilisant cette matrice de transformation comme suit:

$$S_{mode} = T.S_{phase}$$

où  $S_{mode}$  et  $S_{phase}$  sont respectivement les signaux de signaux modaux et de phase (tensions ou courants).

La transformation de Clarke est réelle et elle peut être utilisée avec n'importe quelle ligne transposée. Si la ligne étudiée n'est pas transposée, alors une matrice de transformation basée sur un vecteur propre, qui dépend de la fréquence, devra être utilisée. Cette matrice doit être calculée à une fréquence égale ou proche de la fréquence des transitoires de défaut initiaux.

Les signaux de phase enregistrés sont d'abord transformés en leurs composantes modales. Le premier mode (mode 1) est généralement désigné sous le nom de mode masse (ou sol), et son amplitude n'est pas significative que pendant les failles ayant un chemin vers la terre. Par conséquent, ce composant ne peut pas être utilisé pour tous les types de défauts. Le second mode (mode 2), également connu sous le nom de mode aérien, est cependant présent pour tout type de défaut. En conséquence, le problème de localisation de défaut est formulé essentiellement sur le mode aérien, en utilisant occasionnellement le signal de mode masse afin de distinguer certaines situations particulières, ce qui sera discuté dans la section suivante. En fonction du schéma de communication existant entre les deux extrémités de la ligne, le problème de localisation des défauts peut être résolu de deux manières différentes décrites ci-dessous.

### **2.3.1 Enregistrement synchronisé à deux extrémités**

Les signaux d'erreur sont enregistrés simultanément aux deux extrémités de la ligne par deux canaux distincts qui utilisent tous les deux la même référence temporelle synchronisée à l'aide de récepteurs **GPS** (Global Positioning Satellite). Les formes d'onde enregistrées seront transformées en signaux modaux, après quoi les signaux modaux seront analysés en utilisant leurs transformées en ondelettes. Soit  $t_A$  et  $t_B$  correspondent aux instants où les coefficients d'ondelettes du signal modal à l'échelle 1, montrent leurs pics initiaux pour les signaux enregistrés sur les nœuds A et B respectivement. En supposant que les signaux enregistrés aux deux extrémités de la



ligne sont entièrement synchronisés, le délai entre les temps de détection de défaut aux deux extrémités, c'est-à-dire  $t_d = t_B - t_A$ , peut être déterminé [23].

La distance entre le point de défaut et le nœud A sera alors donnée par:

$$x = \frac{l - v \cdot t_d}{2} \quad (2.6)$$

où,  $l$  est la longueur de la ligne,  $x$  est la distance à la panne du nœud A, et  $v$  est la vitesse des ondes progressives.

### 2.3.2 Enregistrement à une seule fin

Une configuration plus robuste qui ne nécessite pas de synchronisation de fin distante se produit lorsque l'emplacement de défaut est déterminé uniquement sur la base des signaux enregistrés à une extrémité de la ligne. Cependant, dans un tel cas, du fait de l'absence de toute autre référence de temps, toutes les mesures de temps se feront par rapport à l'instant où le défaut a été détecté pour la première fois. Par conséquent, les calculs d'emplacement des défauts seront basés sur les temps de réflexion des ondes progressives à partir du point de défaut. Malheureusement, pour les défauts impliquant une mise à la terre, non seulement les réflexions provenant du point de défaut, mais aussi du bus d'extrémité distant seront observées à l'extrémité émettrice de la ligne. Il convient donc de concevoir des algorithmes appropriés afin de distinguer les fautes proches et distantes qui peuvent produire des motifs de réflexion similaires pour les défauts liés à la terre. Les sections suivantes décrivent notre approche proposée pour accomplir cette tâche.

#### *a Approche I: Défauts non mis à la terre*

Il a été observé depuis longtemps que les défauts non mis à la terre tels que la ligne à ligne ou triphasée non mise à la terre, ne provoquent pas de réflexions significatives du bus d'extrémité distant pendant les transitoires de défaut. Ainsi, en mesurant le retard temporel entre les deux pics consécutifs des coefficients de transformée en ondelettes du signal de défaut enregistré à l'échelle 1, et en prenant le produit de la vitesse de l'onde et la moitié de ce retard, la distance au défaut peut facilement être calculée pour ces types de fautes. La distance de défaut sera donnée par l'équation:

$$x = \frac{v \cdot t_d}{2} \quad (2.7)$$

où  $x$  est la distance au défaut,  $v$  est la vitesse de l'onde (pour le mode utilisé), et  $t_d$  est la différence de temps entre deux pics consécutifs des coefficients de transformée en ondelettes.

### ***b Approche II: Défaillances à la terre***

Lorsque le défaut implique une connexion à la masse, les signaux de fin d'émission peuvent contenir des réflexions significatives provenant du bus d'extrémité distant en plus de celles provenant du point de défaut. En outre, en fonction de l'emplacement du défaut, les réflexions provenant de l'extrémité distante peuvent arriver avant ou après celles réfléchies par le point de défaut. Il peut être facilement vérifié en utilisant la méthode du diagramme de treillis, que les réflexions d'extrémité distante arriveront plus tard que les réflexions d'erreur si l'erreur se produit dans la moitié de la longueur de la ligne, près de l'emplacement du relais.

L'inverse sera vrai si le défaut est situé dans la seconde moitié de la ligne. On observe que, dans le premier cas, le coefficient de transformée en ondelettes à la masse (WTC) pour l'échelle 1, montre des pics significatifs, alors que le dernier cas en mode masse WTC pour l'échelle 1 reste insignifiant en dessous du seuil de détection choisi

Par conséquent, tout d'abord, une décision est prise sur la mise à la terre ou non de la faute, sur la base de l'échelle 2 WTC des signaux du mode masse. Si ces coefficients sont significatifs, alors le défaut sera considéré comme un défaut à la terre. La prochaine décision sera prise sur laquelle la moitié de la ligne est réellement située. Ceci est fait en observant l'échelle 1 WTC des signaux du mode masse. Des coefficients insignifiants impliquent que le défaut est dans la moitié distante de la ligne, et vice versa.

Si le défaut est déterminé comme étant dans la moitié proche de la ligne, alors  $t_d$  dans l'équation (2.4) sera simplement l'intervalle de temps entre les deux premiers pics de l'échelle 1 WTC pour le mode aérien.

Si le défaut est suspecté d'être dans la seconde moitié de la ligne, alors  $t_d$  dans l'équation (3.4) sera remplacé par:

$$t_d = 2. \tau - t_x \quad (2.8)$$

où  $\tau$  est le temps de parcours pour toute la longueur de ligne, et  $t_x$  est l'intervalle de temps entre les deux premiers pics du mode aérien WTC à l'échelle 1.

## 2.4 Conclusion

Dans ce chapitre nous nous sommes intéressés aux principes de base de la transformée en ondelettes suivie de l'application des ondelettes dans l'analyse des réseaux électriques. Enfin, une méthode de localisation des défauts basée sur les ondes progressives utilisant l'analyse par ondelettes proposée dans [17] a été bien détaillée dans ce chapitre.

Dans le prochain chapitre, nous allons présenter les différentes étapes de simulation ainsi que les résultats de localisation obtenus.

# Chapitre 3 Simulation et résultats

## 3.1 Présentation du logiciel

Le logiciel Matlab est un logiciel de manipulation de données numériques et de programmation dont le champ d'application est essentiellement les sciences appliquées. Son objectif, par rapport aux autres langages, est de simplifier au maximum la transcription en langage informatique d'un problème mathématique, en utilisant une écriture la plus proche possible du langage naturel scientifique.

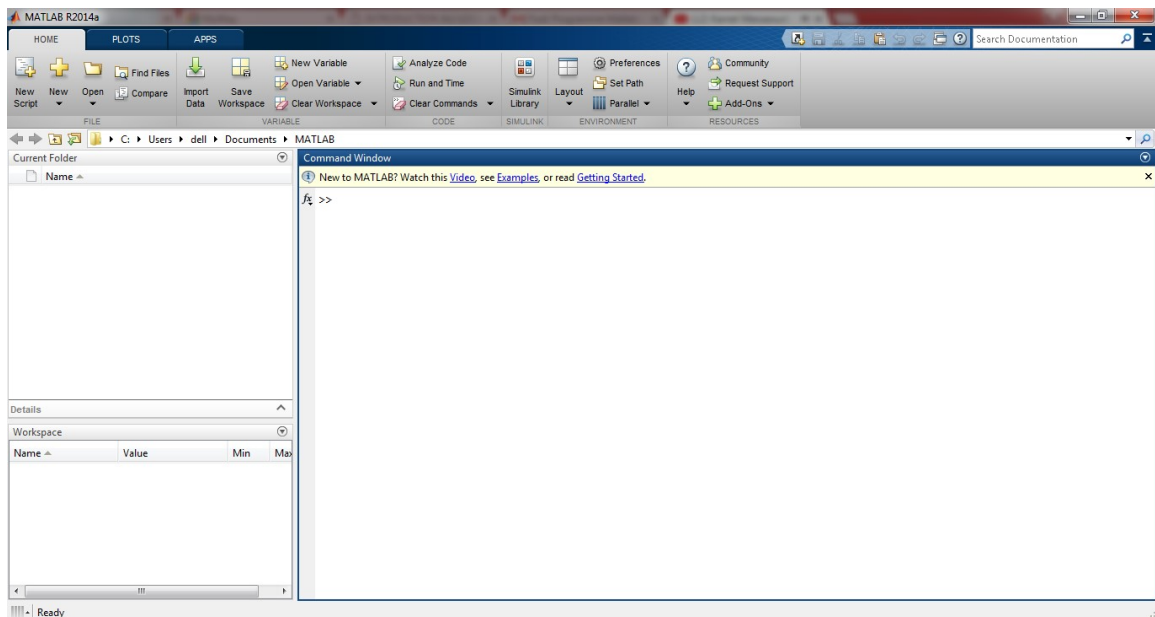
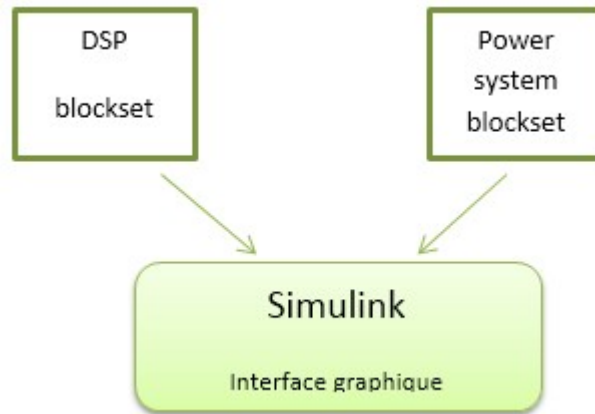


Figure (3.1) : fenêtre de MATLAB.

## 3.2 Présentation de Simulink

Simulink est l'extension graphique de MATLAB permettant de représenter les fonctions mathématiques, et la modélisation, la simulation et l'analyse de système dynamiques (variable en fonction du temps) à partir de blocs.



**Blocksets:**

Ce sont des collections de blocs Simulink développés pour des domaines d'application spécifiques (DSP Blockset, Power System Blockset, etc.).

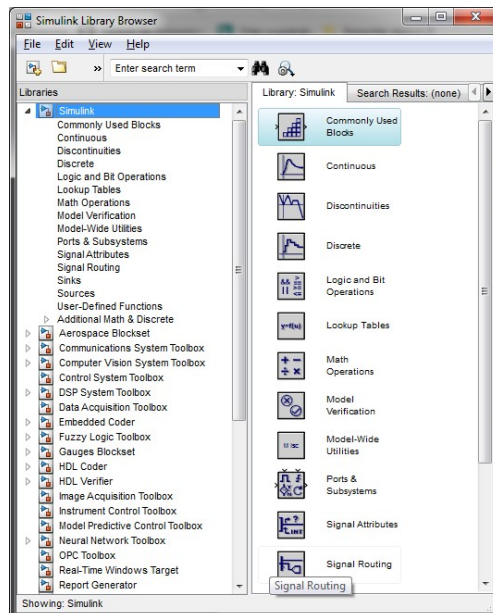
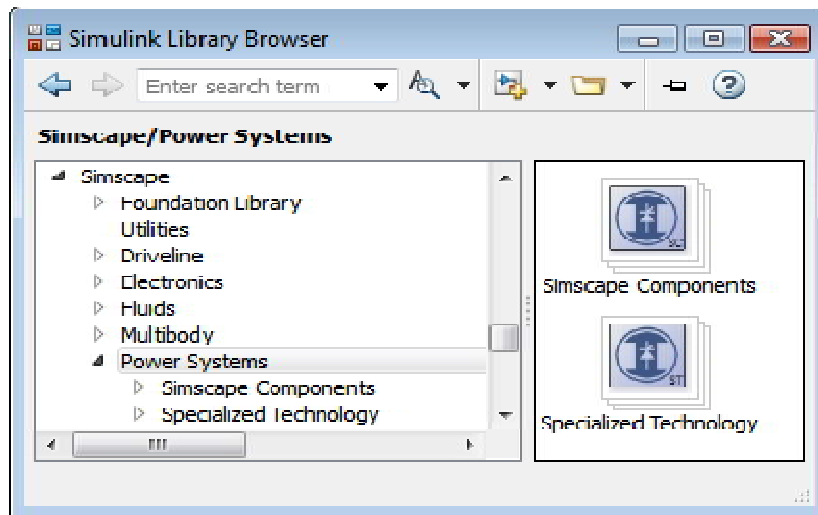


Figure (3.2) : La fenêtre Simulink

Dans notre travail on utilise la bibliothèque simscape.

**3.3 Présentation de la bibliothèque simscape power system**

Simscape Power System contient deux bibliothèques de blocs de niveau supérieur, représentant deux technologies différentes.



### 3.3.1 Bibliothèque « Simscape Components »

La bibliothèque de Simscape Components de Simscape Power System contient des blocs Simscape spécifiquement développés pour travailler avec des composants électriques polyphasés. Outre les composants Simscape Foundation, le produit contient un composant électrique triphasé et on peut l'utiliser pour développer nos propres blocs triphasés personnalisés avec Simscape. On peut également afficher et personnaliser la source pour plusieurs blocs. La bibliothèque principale de Simscape Components est appelée `pe_lib`. Elle contient des blocs Simscape avec des ports électriques triphasés et monophasés, ainsi que des ports de rotation et de translation mécaniques. Ces blocs sont organisés en sous-bibliothèques en fonction de leur fonction. On peut connecter ces blocs directement à d'autres blocs Simscape, à partir de la bibliothèque Foundation ou des autres produits complémentaires.

Les ports électriques triphasés des blocs Simscape Components sont regroupés par défaut pour prendre en charge les diagrammes à une seule ligne. Ils peuvent éventuellement être développés pour séparer les phases, par exemple, pour injecter un défaut ligne par terre dans le circuit.

### 3.3.2 Bibliothèque « Specialized Technology »

La bibliothèque de Specialized Technology de Simscape Power System contient des modèles d'équipements électriques typiques tels que les transformateurs, les lignes, les machines et l'électronique de puissance. Ces modèles ont fait leurs preuves et

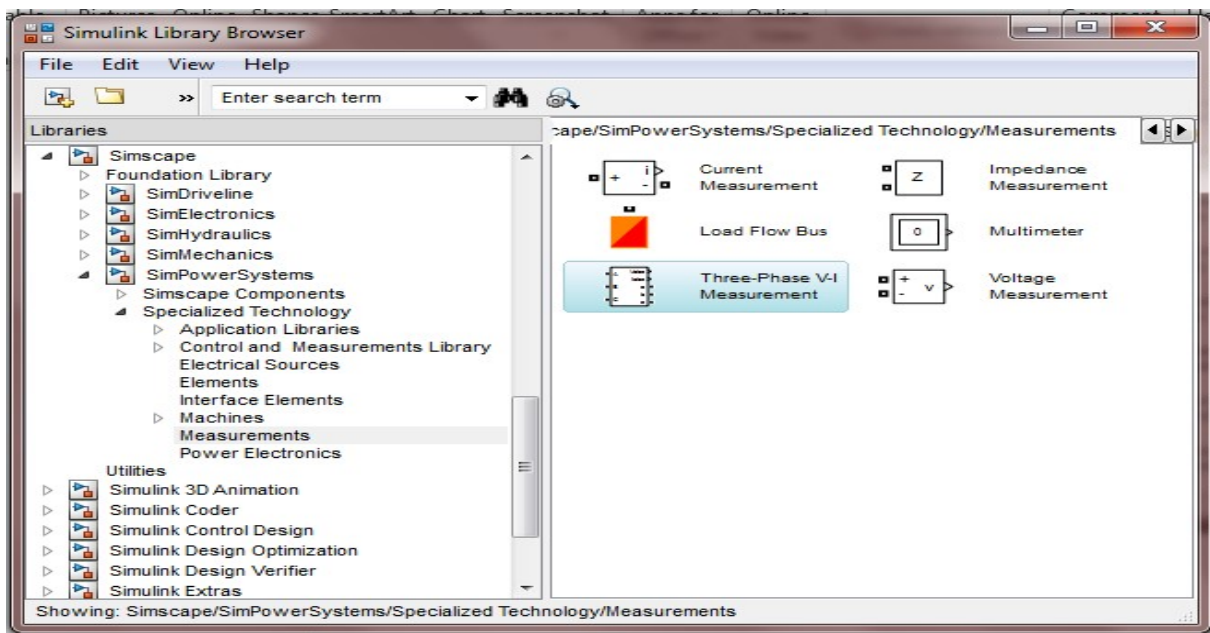
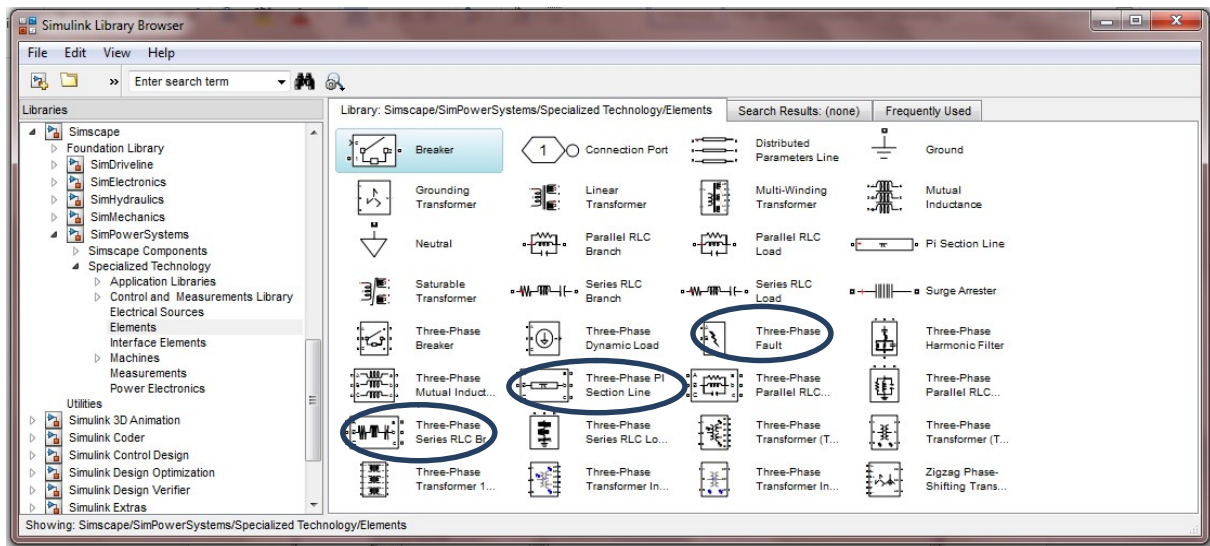
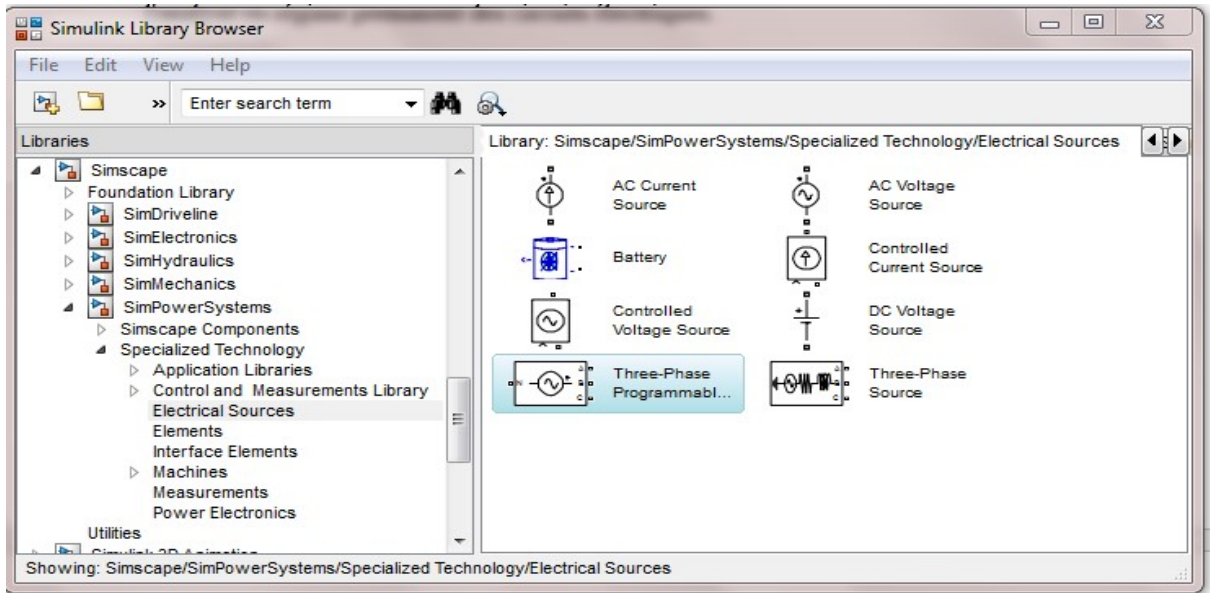
proviennent des manuels scolaires. Leur validité repose sur l'expérience du laboratoire d'essais et de simulations de systèmes électriques d'Hydro-Québec, un important service public nord-américain situé au Canada, ainsi que sur l'expérience de l'École de technologie supérieure et Université Laval. Les fonctionnalités du logiciel Simscape Power System pour la modélisation d'un système électrique type sont illustrées dans des exemples de fichiers. Pour les utilisateurs qui souhaitent actualiser leurs connaissances de la théorie des systèmes d'alimentation, il existe également des études de cas d'auto-apprentissage.

La principale bibliothèque spécialisée est appelée `simscape powersystems_ST`. Il contient des sous-bibliothèques de blocs organisés en fonction de leur comportement. La sous-bibliothèque des blocs fondamentaux contient le bloc `Powergui`, qui contient des outils pour l'analyse en régime permanent des circuits électriques. La différence entre la bibliothèque Simulink et `simpower` est : Simulink est l'outil le plus générique permettant de modéliser graphiquement des systèmes. Bien que le Simpower est une toolbox de Simulink donc plus spécifique au domaine électrique. Bien entendu les 2 peuvent cohabiter dans un même modèle.

Exemple : localisation de défaut

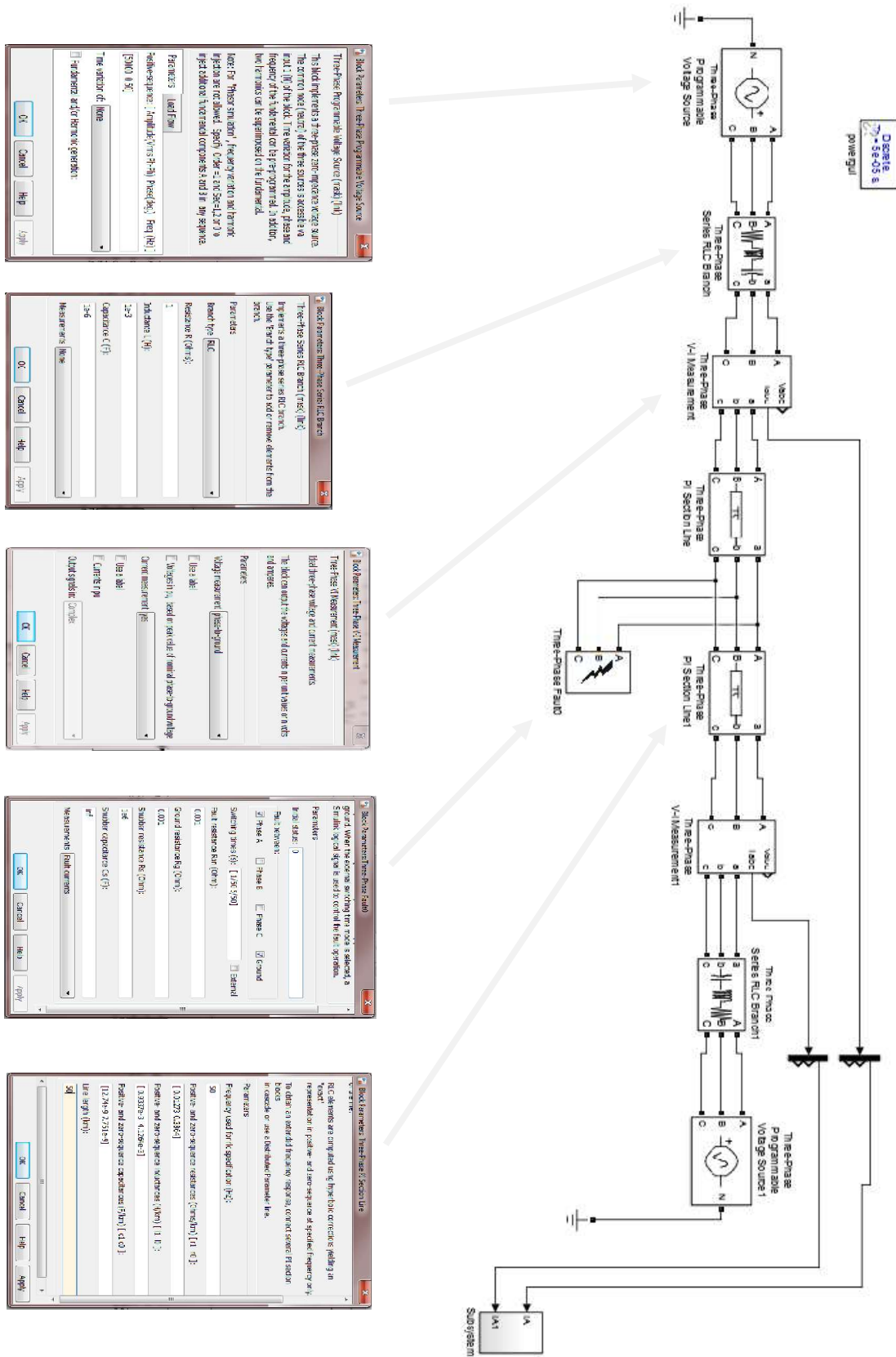
Pour étudier la localisation de défaut et évaluer ses performances, une ligne de transmission triphasé entre deux sources est considérée figure (3.3). Des techniques de simulation des lignes de transmission peuvent être utilisées pour générer les formes d'ondes du courant et de la tension pour différents types de conditions de défaut.

Voilà les étapes de modélisation de notre système :





Ensuite on les-connecte et on le programme pour obtenir notre réseau.



Figure(3.3) :le système étudié.

### 3.4 Les phases de test

Durant notre étude on a testé notre réseau avec plusieurs types d'onde selon les cas suivants : une source et deux sources. Sachant que les autres paramètres sont constants. On teste notre réseau avec l'onde daubechie 8 avec des distances de défaut différentes.

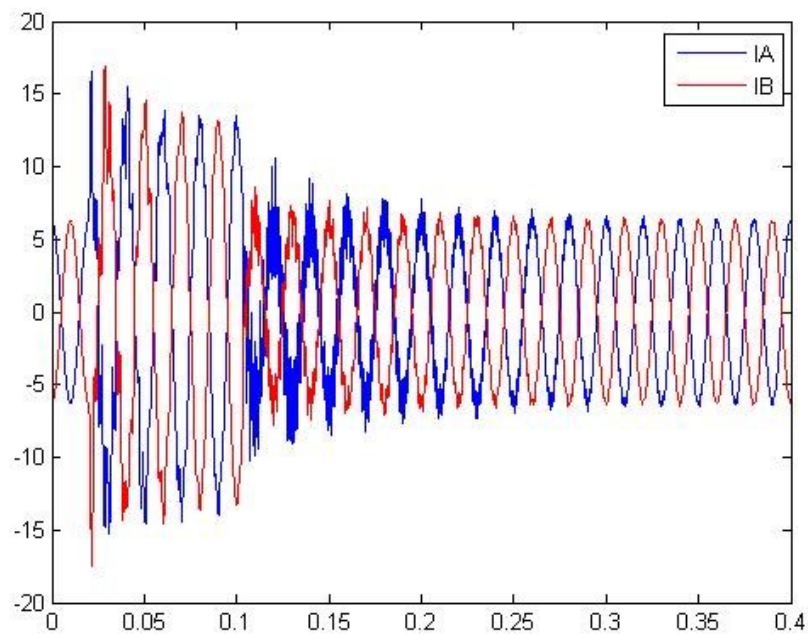


Figure (3.4) : courbe de courants

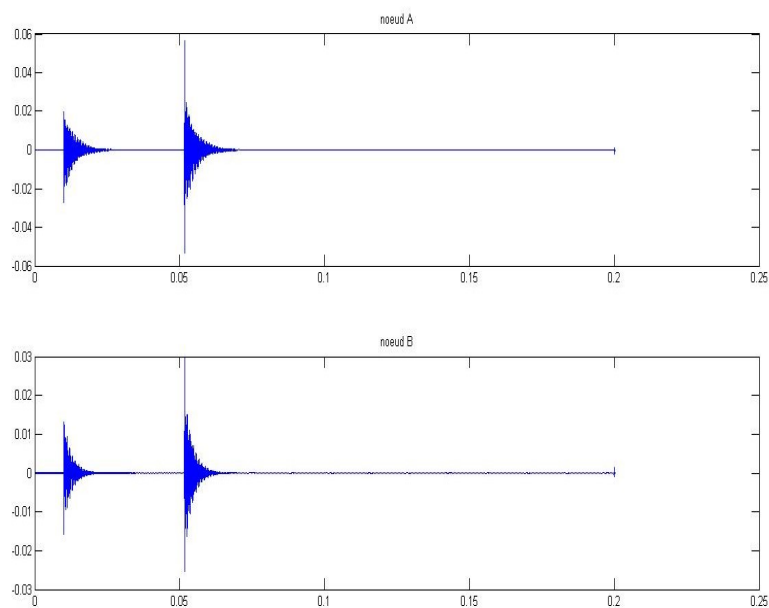


Figure (3.5) : cdA1 & cdB1

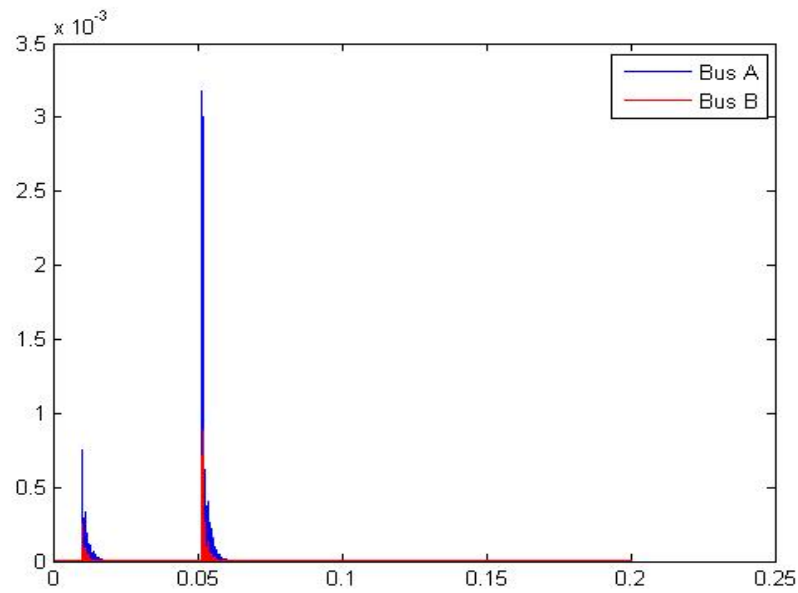


Figure (3.6) : Eca & EcB

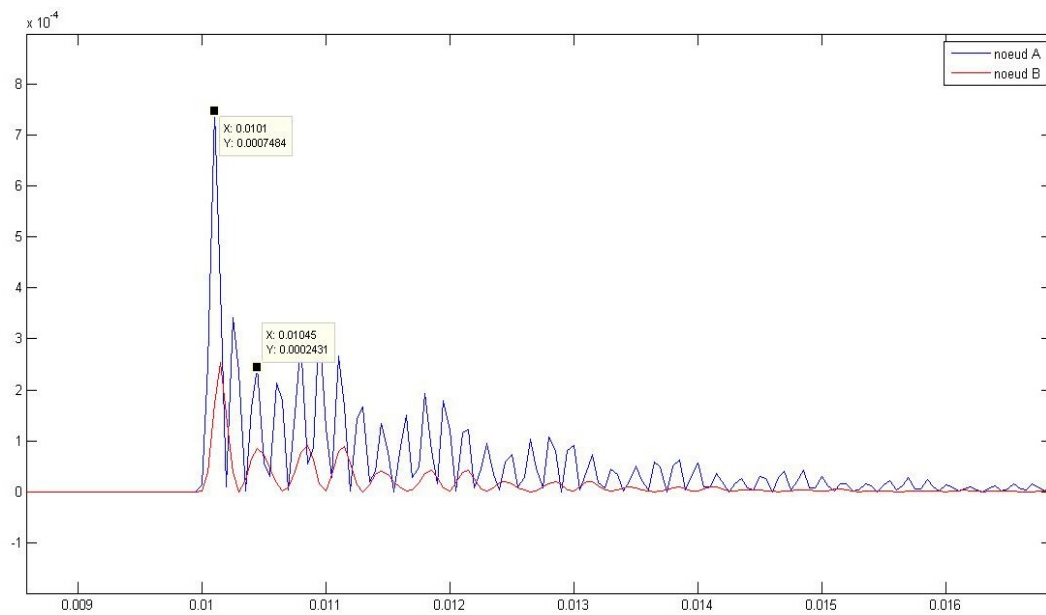


Figure (3.7) : Ec zoom

La distance entre le nœud A et le défaut est 50 km (entre le défaut et le nœud B, la distance vaux 100 km). L'estimation donne :

$$x_A = \frac{v * \Delta t}{2} = \frac{2.8994 * 10^5 * (0.01045 - 0.0101)}{2} = 50.73 \text{ km}$$

Ci-après les résultats pour différentes distances.

I / Pour 2 sources :

<b>Distance total entre nœud A et B</b>	Distance entre le défaut et A	Estimation	Distance entre le défaut et B	Estimation
<b>100 km</b>	50 km		50 km	50.73 km
<b>150 km</b>	50 km	50.73	100 km	101.47
<b>150 km</b>	100 km	101.47	50 km	50.73
<b>200 km</b>	100 km		100 km	101.73

Tableau 1 : Analyse par l'onde db8 avec la courbe de .....(Ec)

<b>Distance total entre nœud A et B</b>	Distance entre le défaut et A	Estimation	Distance entre le défaut et B	Estimation
<b>100 km</b>	50 km	43.49 km	50 km	43.49 km
<b>150 km</b>	50 km	43.49 km	100 km	28.99 km ?
<b>150 km</b>	100 km	28.99 km ?	50 km	43.49 km
<b>200 km</b>	100 km	28.99 km ?	100 km	28.99 km ?

Tableau 2 : Analyse par l'onde db8 avec la courbe de .....(cd)

<b>Distance total entre nœud A et B</b>	Distance entre le défaut et A	Estimation	Distance entre le défaut et B	Estimation
<b>100 km</b>	50 km		50 km	50.73 km
<b>150 km</b>	50 km	50.73 km	100 km	94.23 km
<b>150 km</b>	100 km	94.23 km	50 km	50.73 km
<b>200 km</b>	100 km		100 km	94.23 km

Tableau 3 : Analyse par l'onde db6 avec la courbe de .....(Ec)

<b>Distance total entre nœud A et B</b>	Distance entre le défaut et A	Estimation	Distance entre le défaut et B	Estimation
<b>100 km</b>	50 km	43.49 km	50 km	43.49 km
<b>150 km</b>	50 km	43.49 km	100 km	28.99 km ?
<b>150 km</b>	100 km	28.99 km ?	50 km	43.49 km
<b>200 km</b>	100 km	28.99 km ?	100 km	28.99 km ?

Tableau 4 : Analyse par l'onde db6 avec la courbe de .....(cd)

<b>Distance total entre nœud A et B</b>	Distance entre le défaut et A	Estimation	Distance entre le défaut et B	Estimation
<b>100 km</b>	50 km		50 km	50.73 km
<b>150 km</b>	50 km	50.73 km	100 km	43.49 km ?
<b>150 km</b>	100 km	43.49 km ?	50 km	43.49 km
<b>200 km</b>	100 km		100 km	86.98 km

Tableau 5 : Analyse par l'onde db4 avec la courbe de .....(Ec)

<b>Distance total entre nœud A et B</b>	Distance entre le défaut et A	Estimation	Distance entre le défaut et B	Estimation
<b>100 km</b>	50 km	43.49 km	50 km	43.49 km
<b>150 km</b>	50 km	43.49 km	100 km	28.99 km ?
<b>150 km</b>	100 km	28.99 km ?	50 km	43.49 km
<b>200 km</b>	100 km	28.99 km ?	100 km	28.99 km

Tableau 6 : Analyse par l'onde db4 avec la courbe de .....(cd)

II / Pour 1 source avec le graphe de ..... (Ec)

Rmq : la distance entre le défaut et le nœud B est fixée 50km

Distance entre le défaut et le nœud A (km)	Estimation
20	28.99
30	36.44
40	43.49
50	43.49
60	50.73
100	94.23
130	137.72
150	166.71
180	333.43

Tableau 7 : Analyse par l'onde db8 avec la courbe Ec avec 1 source

Distance entre le défaut et le nœud A (km)	Estimation (km)
20	28.99
30	43.49
40	50.73
50	50.73
60	65.23
100	101.47
130	115.97
150	144.97
180	210.2

Tableau 8 : Analyse par l'onde db4 avec la courbe Ec avec 1 source

## Conclusion générale

---

Les systèmes d'alimentation électrique comme les réseaux électriques deviennent plus vulnérables aux perturbations et cela est dû à la complexité de ces derniers. Un système de gestion s'impose pour garder et assurer le fonctionnement fiable des systèmes d'alimentation. L'objectif principal d'un système de gestion est la préoccupation de la sécurité du système. Par conséquent, un tel système devrait traverser différents types de perturbations possibles. Ces perturbations peuvent survenir en raison de défauts permanents ou temporaires entraînant des surtensions, des surintensités, des creux de tension, etc. Les systèmes actuels permettent de maintenir le bon fonctionnement des réseaux électriques. Lorsqu'un défaut survient le long d'une ligne de transmission, les dispositifs de protection (relais, disjoncteurs, etc.) réagissent pour protéger le système des défauts en mettant hors service la ligne de transmission défaillante. Ainsi, un travail de réparation est requis pour maintenir le bon fonctionnement. Cependant, l'emplacement précis et opportun de la source de la perturbation facilite ce travail.

L'objectif principal de ce master est l'étude d'un système de localisation de défauts dans les réseaux électriques de transmission. Pour cela, tout au long de ce mémoire nous avons présenté une méthode de localisation de défauts basée sur la théorie de l'onde progressive des lignes de transmission. La transformation en ondelettes était l'outil principal de la méthode pour déterminer l'emplacement du défaut pour diverses distances séparant les nœuds d'une ligne. Cette transformation a été appliquée pour extraire les informations sur les transitoires et l'emplacement exact des défauts.

La discussion des résultats obtenus a montré nettement que la solution basée sur la DWT permet d'assurer d'une façon efficace la localisation d'un défaut dans une ligne de transmission.

Ce travail nous a permis aussi d'approfondir des connaissances théoriques sur les réseaux électriques et une maîtrise du langage MATLAB.



# Bibliographie

---

- [1] The journal model is IEEE Transactions on Power Delivery.
- [2] L.V. Bewley, Travelling Waves on Transmission Systems. New York: John Wiley & Sons, 1951.
- [3] L.F. Woodruff, "Transmission line transients in motion movies," AIEE Transactions, vol. 57, pp. 391-400, Jul. 1938.
- [4] F. H. Magnago, Advanced Techniques for Meter Placement and Fault Location in Power Systems, Ph.D. Dissertation, Texas A&M University, College Station, Texas, 2000.
- [5] J. R. Carson, J.R., "Wave propagation in overhead wires with ground return," Bell System Technical Journal, vol. 5, pp 539-554, 1926.
- [6] H. W. Dommel, EMTP Theory Book, Second Edition. Vancouver, BC: Microtran Power System Analysis Corporation, 1992.
- [7] J. R. Marti, L. Marti and H. W. Dommel, "Transmission line models for steadystate and transients analysis," in Proc. Power Tech Conference, Sep. 1993.
- [8] H. W. Dommel, "Digital computer solution of electromagnetic transients in single- and multi-phase networks," IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, vol. PAS-88, pp. 388-399, Apr. 1969
- [9] J. D. Glover and M. Sarma, Power System Analysis and Design. Boston, MA: PWS Publishing Company, 1994.
- [10] A. Ranjbar and B. Cory, "An improved method for the digital protection of high voltage transmission lines," IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, vol. PAS-94, pp. 544-550, 1975.
- [11] A. Gopalakrishnan, M. Kezunovic, S. M. McKenna, and D. M. Hamai, "Fault location using the distributed parameter transmission line model," IEEE Transactions on Power Delivery, vol. 15, no. 4, pp. 1169-1174 , Oct. 2000.

- [12] H. W. Dommel and J.M. Michels, "High speed relaying using traveling wave transient analysis," in Proc. IEEE PES Winter Meeting, Jan. 1978.
- [13] M. Vitinis, "A correlation method for transmission line protection," IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, vol. PAS-97, no. 5, pp. 1607-1617, Sep. 1978.
- [14] E. Shehab-Eldin and P. McLaren, "Travelling wave distance protection - problem areas and solutions," IEEE Transaction on Power Delivery, vol. 3, no. 3, pp. 894-902, Jul. 1988.
- [15] G. B. Ansell and N. C. Pahalawaththa, "Maximum likelihood estimation of fault location on transmission lines using travelling waves," IEEE Transactions on Power Delivery, vol. 9, no. 2, Apr. 1994.
- [16] B. Lian and M. Salama, "An overview of digital fault location algorithms for power transmission lines using transient waveforms," Electric Power System Research, vol. 29, pp.17-25, 1994.
- [17] F.H. Magnago and A. Abur, "Fault location using wavelets," IEEE Transactions on Power Delivery, vol. 13, no. 4, pp. 1475-1480, Oct. 1998.
- [18] C.Y. Evrenosoglu and A. Abur, "Travelling wave based fault location for teed circuits," IEEE Transactions on Power Delivery, vol. 20, no. 2, pp. 1115-1121, Apr. 2005.
- [19] C.Y. Evrenosoglu and A. Abur, "Fault location in distribution systems with distributed generation," in Proc. Power Systems Computation Conference, Aug. 2005.
- [20] S. Bickerton, An Introductory Guide to Wavelets, Lecture Notes, 2001, Private Collection, C. Y. Evrenosoglu.
- [21] G. Strang, Signal Processing for Everyone, <http://wwwmath.mit.edu/~gs/papers/papers.html>, 2000.
- [22] S. Ghimire, "Analysis of Fault location methods on transmissionlines", university of new orleans, Jun 2014.
- [23] Fernando H. Magnago and Ali Abur, "Fault Location Using Wavelets", Department of Electrical Engineering Texas A&M University College Station, TX 77843, U.S.A.