REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE

MINISTERE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR ET DE LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE

UNIVERSITE YAHIA FARES DE MEDEA

Faculté de **T**echnologie

Mémoire de fin d'études de Master

Filière : Electrotechnique
Spécialité : Réseaux Electriques

Localisation des défauts dans les lignes de transport d'énergie électrique à Double Circuit

---

Présenté par :

Melle :BOUNIF NOUR EL IMANE

Melle :KHALFAOUI SORAYA

Proposé et Dirigé par :

Dr : **Dine Mohammed**

Promotion 2021

Remerciement

Je remercie Allah, le tout puissant, le miséricordieux, de m'avoir appris ce que j'ignorais, de m'avoir donné la santé et tout dont je nécessitais pour l'accomplissement de cette thèse.

Également, je remercie Monsieur ***Dr. DINE Mohamed****, enseignant à l'Université de Médéa, qui a dirigé ce travail de recherche, je tiens à lui exprimer ma gratitude pour son soutien, sa confiance, sa grande disponibilité ainsi que pour les précieux conseils qu'il ma prodigués.*

Nous remercions chaleureusement tout le monde Professeurs d'électrotechnique de Université des médias et tous les professeurs autour Notre vie scolaire, En fin de compte, nous espérons que ce résumé a été utile à tout le monde Futurs étudiants et leur permettre de progresser enLeur vie éducative et professionnelle.

Enfin, un remercîment éternel a mon père et ma mère, mes frères et mes sœurs, ainsi qu'a toute ma famille et tout mes amis.

Didicace

Je dédie le fruit de mes années d'études aux plus chers au monde à :

A la personne la plus chère pour moi dans ce monde

ma mère qui est la fleur de ma vie,

le symbole de l'amour et la tendresse qui s'est sacrifier pour mon bonheur et ma réussite.

A mon père qui a fait de moi, ce que je suis aujourd'hui.

A mes chers frères et chères sœurs

A tous mes amis de la résidence.

Sans oublier les étudiants (es) de la promotion 2021.

BOUNIF NOUR EL IMANE

Didicace

Je dédie ce travail

A ma Mère que Dieu lui fasse miséricorde

et mon Père

A ma Famille

A mes Frères et mes Proches

A touts mes amis

A tous ceux qui m’ont nourri de leur savoir

Et à ceux qui partage de bons souvenirs

Et à tous ce qui ont enseigné moi au long de ma vie scolaire

KHALFAOUI SOURAYA

ملخص

حاليًا، يتم نقل الكثير من الطاقة الكهربائية من خلال خطوط نقل الطاقة المزدوجة. تقدم هذه الخطوط العديد من المزايا الاقتصادية والبيئية مقارنتا بخطوط نقل الطاقة العادية. ومع ذلك ، تتميز هذه الخطوط بزيادة كبيرة في تأثيرات الاقتران المتبادل مما يؤدي إلى مشاكل مختلفة خاصة بالنسبة لمعدات الحماية .في هذا العمل سوف نقدم طريقة لتحديد موقع الأعطال على مستوى خطوط نقل الطاقة الكهربائية المزدوجة ، هذه الطريقة تستعمل القياسات المتزامنة لطرفي الخط و تستعمل ميزات التكنولوجيا الرقمية و جهاز Relais الرقمي المتوفر حاليا ويمكن تطبيقها بسهولة لتحليل الأعطال في أنظمة الطاقة .تعتمد هذه الطريقة على تعديل مبدأ حساب الممانعة باستخدام التحويل النموذجي. يتميز الأخير بشكل أساسي بقدرته على تحليل المعادلات المزدوجة لخط النقل إلى معادلات منفصلة. هذا يلغي بشكل كبير الآثار المتبادلة للحصول على تقدير دقيق لمسافة العطل بطريقة مباشرة. زيادة على ذلك ,الخوارزمية غير متعلقة بمقاومة العطل, مقاومة المصدر و تيار قبل العطل. المقاربة المقترحة جربت بالمحاكاة الرقمية باستعمال برنامج Matlab ,نتائج التجارب المطبقة أثبتت الفعالية العالية للمقاربة المقترحة .

الكلمات الرئيسية : تحديد موقع الأعطال, خطوط النقل المزدوجة ,الاقتران المتبادل ,التحويل المتبادل.

Abstract

Currently, much of electrical energy is transported through double-circuit power lines. These lines offer many economic and environmental advantages over single circuit power lines. However, these lines are characterized by a significant increase in the effects of mutual coupling resulting in various problems particularly for protective equipment. In this work we will present a method for locating the fault in double-circuit electric power transmission lines. This method uses synchronized measurements from both ends of the line and uses the advantages of digital technology and digital relays which are available today and can be easily applied for analysis of faulty systems. The algorithm is based on the modification of the apparent impedance method using modal transformation. Depending on modal transformation, the coupled equations of the transmission line are converted into decoupled ones. This greatly eliminates the mutual effects resulting in an accurate estimation for the fault distance in a straightforward manner. In addition, the algorithm is independent of fault resistance, source impedance and pre-fault current. The proposed approach was tested by numerical simulation using MATLAB software. The results of the applied tests corroborate the superior performance of the proposed approach.

Key words : Fault location, double circuit transmission line, mutual coupling, modal transform.

Résumé

Actuellement, le transport d'une grande partie de l'énergie électrique se fait au moyen des lignes électriques à double circuit. Ces lignes offre beaucoup d'avantages au point de vue économiques et environnementaux par rapport aux lignes électriques à un seul circuit. Cependant, ces lignes sont caractérisées par une augmentation significative dans les effets du couplage mutuel ayant pour résultat différents problèmes en particulier pour l'équipement de protection. Dans ce travail nous allons présenter une méthode de localisation de l'endroit du défaut dans les lignes de transport d'énergie électrique à double circuit. Cette méthode utilise les mesures synchronisées des deux-extrémité de la ligne et utilise les avantages de la technologie numérique et les relais numérique qui sont aujourd'hui disponible et peuvent facilement être appliqué pour l'analyse des systèmes on défaut. L'algorithme est basé sur la modification de la méthode de l'impédance apparente en utilisant la transformation modale. Cette dernière est essentiellement caractérisée par sa capacité de décomposer les équations couplées de la ligne de transport en des équations découplées. Ceci élimine considérablement les effets mutuels ayant pour une évaluation précise de la distance du défaut d'une façon franche. De plus, l'algorithme est indépendant de la résistance du défaut, de l'impédance de la source et du courant de prédéfaut. L'approche proposée a été testée par simulation numérique en utilisant le logiciel MATLAB. Les résultats des tests appliqués corroborent la performance supérieure de l'approche proposée.

Mots clés : Localisation de défaut, lignes de transport à double circuit, couplage mutuel, transformation modale.

Tables des Matières

Liste des Figures……. V

Liste des Tableaux…….. VII

Liste des Abréviations…… VIII

Introduction Générale……... 1

Chapitre I : Généralités Sur Les Défauts dans Les Réseaux Electriques.

I.1)- Introduction……..... 3

I.2)- Structure des Réseaux Electriques……. 3

I.2.1)- Réseaux de transport et d'interconnexion……... 4

I.2.2)- Réseaux de répartition..... 4

I.2.3)- Réseaux de distribution……... 5

I.2.3.1)- Réseaux de distribution à moyenne tension……. 5

I.2.3.2)- Réseaux de distribution à basse tension……... 5

I.2.4)- Nouveau Domaines de Tension..... 5

I.3)- Les défauts dans les réseaux Electriques..... 6

I.3.1)- Les différentes types de défaut dans les Réseaux Electrique…….. 6

I.3.1.1)-Les Courts-circuits……..... 7

I.3.1.1.1)- Types de court-circuit……..... 7

I.3.1.1.2)- Caractéristiques des défauts monophasés…….. 8

I.3.1.1.3)- Les effets des défauts……..... 9

I.3.1.1.3.1)- Le bon fonctionnement des réseaux …….. 9

I.3.1.1.3.2)- La tenue diélectrique des matériels.……... 9

I.3.1.1.3.3)- La qualité de fourniture d'énergie…….. 10

I.3.1.1.3.4)- Les circuits de télécommunication……. 10

I.3.1.1.3.5)- La sécurité des personnes……... 10

I.3.1.1.4)- Détection et élimination des défauts …… 10

I.3.1.2)- Les Surtension…….. 11

I.3.1.3)- Les surcharges…….. 11

I.3.1.4)- Les oscillations …… 12

I.3.1.5)- Les déséquilibres …… 12

I.4)- Protection des Réseaux Electriques……... 12
I.4.1)- Système de Protection……. 12
I.4.1.1)-Définition..... 12
I.4.1.2)- Système de Protection…….. 12
I.4.1.3)- Contraintes supplémentaires pour la Protection……... 13
I.4.2)- Qualité principale d'un Système de Protection..……. 13
I.4.2.1)- Rapidité…… 14
I.4.2.2)- Sélectivité……. 14
I.4.2.2.1)- Sélectivité ampèremétrique……... 14
I.4.2.2.2)- Sélectivité chronométrique…… 15
I.4.2.2.3)- Sélectivité logique……. 15
I.4.2.3)- Sensibilité……. 15
I.4.2.4)- Fiabilité……. 15
I.5)- Conclusion…….. 17

Chapitre II : Techniques d'Analyse des Défauts Electriques.

II.1)-Introduction……... 18
II. 2)-Techniques utilisées dans l'analyse des défauts…….. 18
II.2.1)- Filtrage……... 19
II.2)- Echantillonnage ……... 20
II.2.3)- Description des méthodes utilisées…… 20
II.2.4)- Classification des défauts..... 20
II.2.4.1)- Composantes symétriques ……. 21
II.2.4.2)- Transformation des composantes symétriques (TCS)..... 21
II.4.3)- Description de la méthode de comparaison des phases..... 23
II.5)- Localisation de défaut …… 24
II.5.1)- Description des algorithmes de localisation 24
II.5.1.1)- Les algorithmes basés sur la fréquence fondamentale ……... 24
II.5.1.2)- Les algorithmes basés sur les équations différentielles 26
II.5.1.3)- Les algorithmes basés sur la méthode des ondes mobiles..... 27
II.5.2)- Localisation de défaut en utilisant une seule mesure par la méthode de «Takagi»……... 29
II.6)- Protection……. 31

II.6.1)- Protection différentielle…….. 31
II.6.1.1)- Protection différentielle longitudinale…… 31
II.6.1.2)- Protection différentielle transversale équilibrée…… 32
II.6.2)- Protection de distance …….. 33
II.6.2.1)- Principe de base……. 33
II.6.2.2)- Diagramme d'impédance…… 34
II.6.2.3)- Caractéristiques des relais de distance ……... 35
II.6.2.4)- L'application de la zone de protection dans les relais de distance …… 36
II.6.2.4.1)- Zone 1……. 36
II.6.2.4.2)- Zone 2 ……... 37
II.6.2.4.3) Zone 3..... 37
II .3)- Conclusion…….. 38

Chapitre III : Les Relais Numériques

III.1)-Introduction……... 39
III.2)-Types des relais……. 39
III.2.1)-Relais Electromagnétiques……. 39
III.2.2)-Relais Statiques…….. 41
III.2.3)-Relais Numériques……. 42
III.3)-Schéma bloc d'un relais numérique…….. 44
III.3.1)-Modules de mesure analogique……. 45
III.3.1.1)-Module d'entré des Transformateurs de tension…… 45
III.3.1.2)-Module d'entré des Transformateurs de courant…… 45
III.3.2)-Filtre Anti-Repliement……... 46
III.3.2.1)-Filtre de type Butterworth……... 47
III.3.2.2)-Filtre de type Tchebychev…….. 47
III.3.2.3)-Filtre de type Bessel…… 47
III.3.3)-Multiplexage…….. 48
III.3.4)-Conversion Analogique-Numérique…….. 48
III.3.4.1)-L'échantillonnage……..... 49
III.3.4.2)-Principe de l'échantillonnage bloqueur (E/B)…… 50
III.3.5)-Algorithme d'évaluation des quantités des phases…… 52
III.3.6)-Microprocesseur…… 52

III.3.7)-Commande des organes de coupures……. 53
III.4)-Conclusion…… 53

Chapitre IV : Localisation des défauts dans les lignes électrique HT à Double Circuit

IV.1)- Introduction ……..... 54
IV.2)- Mesure des données des deux extrémités ……... 55
IV.3)- Décomposition modale…… 57
IV.4)- Algorithme de localisation des défauts : Algorithme de Waikar…… 58
IV.4.1)- Défaut monophasé ……... 58
IV.4.2)- Défauts biphasés avec terre …… 62
IV.4.3)- Défauts triphasés …… 63
IV.4.4)- Généralisation des équations de la localisation de défauts…….. 64
IV.5)- Simulation…… 65
IV.5.1)- Réseau d'étude…… 65
IV.5.2)- Logiciel utilisé……. 67
IV.6)- Evaluation des performances de l'algorithme……. 68
IV.6.1)- Calcul de la distance de défaut …… 74
IV.6.1.1)- Défauts monophasés ……. 78
IV.6.1.2)-Défauts biphasés sans terre …… 79
IV.6.1.3)-Défauts biphasés avec terre ……... 80
IV.6.1.4)-Défauts triphasés ……..... 82
IV.6.2)- Interprétation des Résultats ……. 83
IV.7)-Conclusion ……... 84
Conclusion générale…… 85
Bibliographie…… 86

Liste des Figures

Figure (I.1) : Hiérarchisation d'un réseau électrique..... 3
Figure (I.2): Différents types de défauts…… 7
Figure (I.3) : allure d'un défaut réamorçant ……..... 8
Figure (I.4) : Fonctionnement d'une sélectivité ampèremétrique ……..... 14
Figure (I.5) : Fiabilité d'une protection……..... 16
Figure (I.6) : Association de protection……..…….. 16
Figure (II.1) : Schéma des techniques utilisées dans l'analyse des défauts…….. 19
Figure (II.2) : Ligne en défaut à une distance m de la source S……..... 29
Figure (II.3) : Schéma équivalent d'une ligne avec un défaut triphasé…… 29
Figure (II.4) : Protections différentielles longitudinale d'une ligne à 2 extrémités…….. 32
Figure (II.5) : Protections différentielles transversale de 2 lignes en parallèle…….. 33
Figure (II.6) : Principe de base du fonctionnement……... 34
Figure (II.7) : Impédance de court-circuit et de charge (transit)…… 35
Figure (II.8) : Protection de Distance…….…… 36
Figure (II.9) : Caractéristique des la Zone 1 Mho…….…. 37
Figure (II.10) : Caractéristique des trois Zones Mho……..... 38
Figure (III.1) : Relais électromagnétique à induction par disque simple…….….. 40
Figure (III.2) : Relais électromagnétique à induction par disque cylindrique……..…. 41
Figure (III.3) : Relais statique (Protection LZ96 – ABB)……...……... 42
Figure (III.4) : Relais numérique (Architecture de la Protection de Distance **7SA612 SIEMENS**). 43
Figure (III.5) : Elément de base d'un relais numérique…….…. 44
Figure (III.6) : Module d'entée et d'isolement de signal de Tension……..... 45
Figure (III.7) : Module de sortie et d'isolement de signal de Tension…….…. 46
Figure (III.8) : Filtre anti-repliement analogique……...…… 46
Figure (III.9) : Propriétés de différentes synthèses de filtre…… 48
Figure (III.10) : Classification morphologique des signaux…….. 50
Figure (III.11) : Circuit d'Echantillonnage-Bloqueur simple…… 51
Figure (III.12) : Le fonctionnement du circuit échantillonneur-bloqueur……. 51
Figure (IV.1) : Schéma représentatif du principe de l'algorithme de la localisation ligne à double circuit à protéger……... 55
Figure (IV.2): La transformation modale……... 57
Figure (VI.3) : Défaut monophasé……..... 58

Figure (VI.4) : Circuit équivalent de la ligne à double circuit…….. 59
Figure (IV.5) : Défaut biphasé avec terre…….. 62
Figure (IV.6) : Défaut triphasé…….. 63
Figure (IV.7) : Réseau considéré pour l'étude…….. 66
Figure (IV.8) : Réseau simulé sur Simulink-Matlab…….. 67
Figure (IV.9) : Tensions des trois phases de la ligne en défaut au jeu de barres A…… 68
Figure (IV.10) : Courants des trois phases de la ligne en défaut au jeu de barres A……. 69
Figure (IV.11) : Tensions des trois phases de la ligne saine au jeu de barres A…… 69
Figure (IV.12) : Courants des trois phases de la ligne saine au jeu de barres A…… 70
Figure (IV.13) : La tension de la phase « a » filtrée…….. 71
Figure (IV.14) : Le courant de la phase « a » filtré…… 71
Figure (IV.15) : Une période de la tension de la phase « a » échantillonné…….. 72
Figure (IV.16) : Une période du courant de la phase « a » échantillonné…….. 72
Figure (IV.17) : La DFT d'une période de la tension de la phase « a »……. 73
Figure (IV.18) : La DFT d'une période du courant de la phase « a »…… 73
Figure (IV.19a) : Tensions des trois phases de la ligne en défaut au jeu de barres A…….. 74
Figure (IV.19b) : Courants des trois phases de la ligne en défaut au jeu de barres A…….. 76
Figure (IV.19c) : Courants des trois phases de la ligne saine au jeu de barres A…….. 76
Figure (IV.19d) Tensions des trois phases de la ligne en défaut au jeu de barres B…….. 76
Figure (IV.19e) **:** Courants des trois phases de la ligne en défaut au jeu de barres B…….. 76
Figure (IV.19f) : Courants des trois phases de la ligne saine au jeu de barres B…….. 77
Figure (IV.19g) : la distance de défaut calculé……. 77
Figure (IV.19) : représente un exemple de calcul de la distance d'un défaut monophasé **a-T**…….. 78
Figure (IV.20) : Les erreurs de localisation E (%), en fonction des endroits réels des défauts monophasés d (km) pour différents valeurs des résistances des défauts R_f…… 79
Figure (IV.21) : Les erreurs de localisation E (%), en fonction des endroits réels des défauts biphasés sans terre d (km) pour différents valeurs des résistances des défauts R_f. 80
Figure (IV.22) : Les erreurs de localisation E (%), en fonction des endroits réels des défauts biphasés avec terre d (km) pour différents valeurs des résistances des défauts R_f 81
Figure (IV.23) : Les erreurs de localisation E (%), en fonction des endroits réels des défauts triphasé d(km) pour différents valeurs des résistances des défauts R_f..... 83

Liste des tableaux

Tableau (II.1) : Equation de calcul de la distance du défaut ……... 25

Tableau (IV.2) : Table clé pour les constantes des équations…….. 65

Tableau (IV.3) : Paramètres du réseau.……..…….. 66

Tableau (IV.4) : Valeurs des distances des défauts monophasés calculées d (km) et les erreurs E(%) en fonction des distances des défauts réelles d_R ……... 78

Tableau(IV.5) : Valeurs des distances des défauts biphasés sans terre calculées d (km) et les erreurs E(%) en fonction des distances des défauts réelles d_R 79

……...

Tableau (IV.6) : Valeurs des distances des défauts biphasés avec terre calculées d (km) et les erreurs E(%) en fonction des distances des défauts réelles d_R 81

…….. 82

Tableau (IV.7) : Valeurs des distances des défauts triphasés calculées d (km) et les erreurs E(%) en fonction des distances des défauts réelles ……..

Liste des Abréviations

***HT, THT, HTA ou HTB* :** Haute Tension.

MT : Moyenne Tension.

***BT, BTA ou BTB* :** Basse Tension.

TBT : Très Basse Tension.

MVA : Méga volt Ampère.

$\boldsymbol{I_N}$: Courant Nominal.

$\boldsymbol{U_N}$: Tension Composée Nominale.

kV : Kilo Volt.

TC : Transformateur de Courant.

TT : Transformateur de Tension.

JB : Jeu de barre.

C.I.E : La Commission Internationale d'Electrotechnique.

$\boldsymbol{I_A}$: Courant de Phase A.

$\boldsymbol{I_B}$: Courant de Phase B.

$\boldsymbol{I_C}$: Courant de Phase C.

$\boldsymbol{I_{CC}}$: Courant de court circuit.

$\boldsymbol{I_{CC_min}}$: Courant de Court Circuit Minimum.

$\boldsymbol{I_{CC_max}}$: Courant de Court Circuit Maximum.

$\boldsymbol{I_S}$: Seuil de Fonctionnement.

$\boldsymbol{T}$: Retard de Fonctionnement (Temporisation).

$\boldsymbol{I_{Diff}}$: Courant différentiel.

$\boldsymbol{V_A}$: Tension Simple Phase A.

$\boldsymbol{V_B}$: Tension Simple Phase B.

$\boldsymbol{V_C}$: Tension Simple Phase C.

$\boldsymbol{V_{AB}}$: Tension Simple Phase AB.

$\boldsymbol{V_{BC}}$: Tension Simple Phase BC.

$\boldsymbol{V_{CA}}$: Tension Simple Phase CA.

$\boldsymbol{U_{CC}}$: Tension de Court Circuit.

$\boldsymbol{Z_{Source}}$: Impédance de la Source.

$\boldsymbol{Z_{Ligne}}$: Impédance de la ligne.

$\boldsymbol{Zc}$: Impédance caractéristique

$\boldsymbol{Z_{CC}}$: Impédance de Court Circuit.

$\boldsymbol{R_{Défaut}}$: Résistance de Défaut.

$\boldsymbol{P}$: Puissance Active.

$\boldsymbol{Q}$: Puissance Réactive.

$\boldsymbol{X_1, X_2}$ ***et*** $\boldsymbol{X_0}$: Réactance Directe, Inverse et Homopolaire.

F.F.T : La transformation de Fourier.

D.F.T : La transformation discrète de Fourier.

d : directe.

i *:* inverse.

o : homopolaire.

TCS : Transformation des composantes symétriques.

Z_1, Z_2 et Z_0 : Impédance Directe, Inverse et Homopolaire.

Z_{0M} : Impédance Mutuelle Homopolaire.

d **:** distance de défaut calculée.

d_R : distance du défaut réel.

R : Résistance.

L : Inductance.

C : Capacité.

X : Réactance.

Y : Admittance.

G : Conductance.

GPS: Global Positioning System.

HVDC: High Voltage Direct Current.

CAN: Convertisseur Analogique Numérique.

RAM: Read Access Memory.

ROM: Read Only Memory.

EPROM: Electrical Erasable Programmable Read Only.

Z_m : Impédance mutuelle.

f **:** La fréquence.

E : l'Erreur.

Introduction Générale

La demande en croissance de la puissance a incité la construction des lignes de transport de tension supérieure (THT). Ces lignes à haute tension sont devenues le point d'appui du transport d'énergie électrique à longues distances. Actuellement, le transport d'une grande partie de l'énergie électrique se fait au moyen des lignes électriques à double circuit. Ces lignes offre beaucoup d'avantages au point de vue économiques et environnementaux par rapport aux lignes électriques à un seul circuit. Malheureusement, si un défaut se produit dans une partie du réseau électrique, comme le générateur ou la ligne électrique l'ensemble du système peut être détruit si l'emplacement du défaut n'est pas localisé aussi vite que possible. Plus vite la localisation du défaut est trouvée, plus tôt le système peut être restauré et le temps de panne peut être réduit.

D'autre part, les lignes à doubles circuits sont caractérisées par une augmentation significative dans les effets du couplage mutuel ayant pour résultat différents problèmes en particulier pour l'équipement de protection. Par conséquent, pour l'évaluation de la distance du défaut, ces effets augmentent remarquablement les niveaux d'erreur dans la localisation du défaut. Donc, le couplage mutuel est toujours considéré comme un des problèmes les plus stimulants pour la recherche dans le domaine de la protection. Le couplage mutuel est effectivement mesurable dans tous les systèmes multi-phases, dans lesquels l'impédance totale de la ligne change considérablement à cause de l'effet mutuel entre les phases. Ainsi, le problème de couplage mutuel n'est pas vraiment constant et dépend fortement des différents facteurs agissants réciproquement comme l'espacement des conducteurs et les niveaux de tension. Différents documents ont été publiés concernant la localisation de défaut dans les lignes électriques à doubles circuits. Chacun de ces algorithmes a des aspects différents incluant le réseau choisi, le modèle de ligne utilisé et des suppositions considérées. Cependant, il est commode pour le développement des algorithmes de localisation de défaut dans les lignes électriques à doubles circuits d'employer des modèles de ligne plus sophistiqués incluant le couplage mutuel.

Dans le premier chapitre, nous commençons par des généralités sur les défauts dans les réseaux électriques ainsi leurs systèmes de protection, le deuxième chapitre traite les techniques d'analyse des défauts électriques et les différentes méthodes de localiser les défauts.

Le troisième chapitre sera consacré à la présentation de la technologie et la conception des relais numériques. Dans le dernier chapitre, nous présentons une description détaillée de la méthode de localisation de de défaut proposé, puis nous terminant ce chapitre par une série de test en utilisant logiciel MATLAB pour confirmé l'efficacité de notre méthode.

Enfin, on termine par une conclusion dans laquelle on résume les principaux résultats obtenus et on énumérera les perspectives à ce travail.

Chapitre I Généralités Sur Les Défauts dans les Réseaux Electriques

I.1)- Introduction :

La fonction d'un réseau de transport d'énergie électrique consiste à assurer le mouvement de l'énergie en la transitant par des lignes HT ou THT entre les différentes sources de production et les postes de distribution. Tandis que la fonction d'un réseau BT consiste à distribuer cette énergie aux clients.

Dans cette première partie, on va étudier les réseaux électriques, les différents types des réseaux, les défauts ainsi que les différentes fonctions de protection. La protection des lignes de transport contre les défauts est faite d'une manière régulière à l'aide d'une chaine de protection que nous allons présenter. Et dans les mesures d'assurer d'une part la continuité de service d'alimentation en énergie électrique et d'autre part la fonction secours entre les protections, on est amené à associer une sélectivité appropriée[1] [2].

I.2)- Structure des Réseaux Electriques :

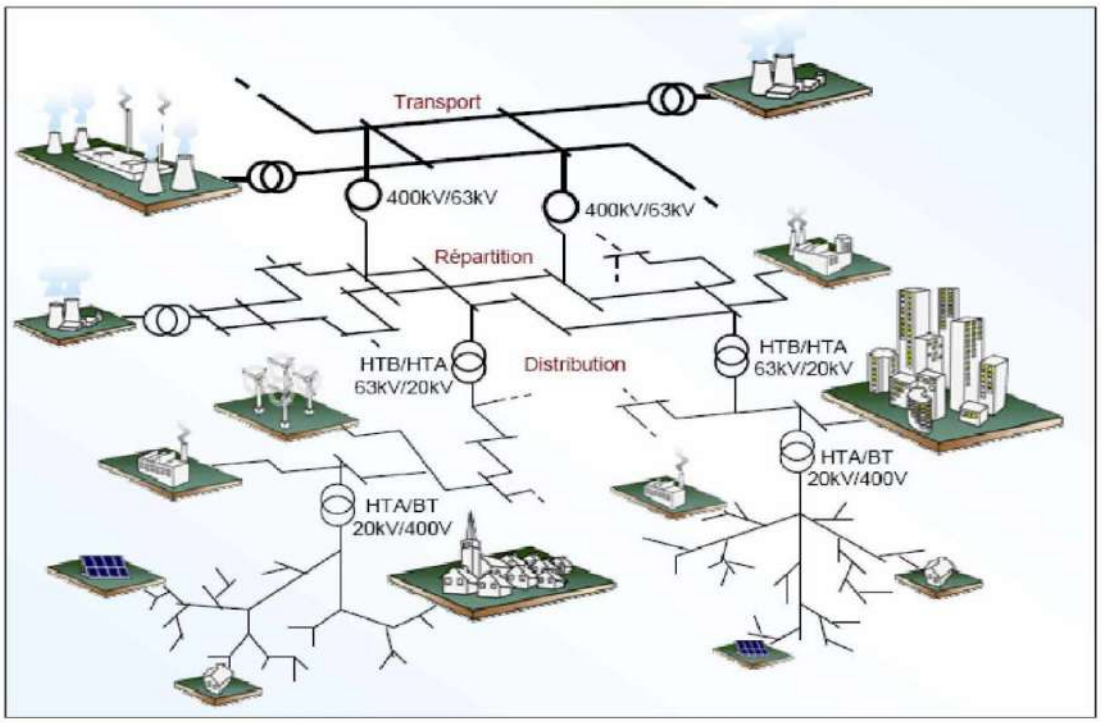


Figure (I.1) : Hiérarchisation d'un réseau électrique.

I.2.1)-Réseaux de transport et d'interconnexion [3] [4] [5] :

Les réseaux de transport et d'interconnexion ont principalement les caractéristiques :

- De collecter l'électricité produite par les centrales importantes et de l'acheminer par grand flux vers les zones de consommation (fonction transport).
- De permettre une exploitation économique et sûre des moyens de production en assurant une compensation des différents aléas (fonction interconnexion).
- La tension est 150 kV, 220 kV et dernièrement 420 kV.
- Neutre directement mis à la terre .

I.2.2)- Réseaux de répartition [3] [5] [6]:

Les réseaux de répartition ont pour rôle de répartir, au niveau régional, l'énergie issue du réseau de transport. Leur tension est supérieure à 63 kV selon les régions.

Ces réseaux sont, en grande part, constitués de lignes aériennes, dont chacune peut transiter plus de 60 MVA sur des distances de quelques dizaines de kilomètres. Leur structure est, soit en boucle fermée, soit le plus souvent en boucle ouverte, mais peut aussi se terminer en antenne au niveau de certains postes de transformation.

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

Ces réseaux alimentent d'une part les réseaux de distribution à travers des postes de transformation HT/MT et, d'autre part, les utilisateurs industriels.

- La tension est 90 kV ou 63 kV
- Neutre à la terre par réactance ou transformateur de point neutre

  1- Limitation courant neutre à 1500 A pour le 90 kV

  2- Limitation courant neutre à 1000 A pour le 63 kV

- Réseaux en boucle ouverte ou fermée.

I.2.3)- Réseaux de distribution :

Les réseaux de distribution commencent à partir des tensions inférieures à 63 kV et des postes de transformation HTB/HTA avec l'aide des lignes ou des câbles moyenne tension jusqu'aux postes de répartition HTA/HTA [2]. Le poste de transformation HTA/BTA constitue le dernier maillon de la chaîne de distribution et concerne tous les usages du courant électrique.

I.2.3.1)- Réseaux de distribution à moyenne tension [6]:

- 10 et 30 kV le plus répandu.

- Neutre à la terre par une résistance.

- Limitation du courant neutre à 300 A pour les réseaux aériens.

- Limitation du courant neutre à 1000 A pour les réseaux souterrains.

- Réseaux souterrains en boucle ouverte.

I.2.3.2)- réseaux de distribution à basse tension[6]:

-230 / 400 V,

-Neutre directement à la terre,

-Réseaux de type radial, maillé et bouclé.

I.2.4)-Nouveau domaines de tension :

Les domaines de tension sont définit par le type du courant **alternatif** ou **continu**, par le type de tension **haute** et **basse**. Le domaine de tension est important en matière d'habilitation électrique, puisqu'il conditionne les champs d'intervention du personnel selon le niveau d'habilitation obtenu.

La nouvelle classification des domaines de tension a supprimé la distinction entre le BTA et le BTB. Il forme maintenan

t un seul domaine BT. D'autre part **en matière de Très Basse Tension**, il existe trois types de TBT, la TBTF (Tension fonctionnelle), la TBTS (Tension de sécurité) et la TBTP (Tension de protection).

I.3)-Les défauts dans les réseaux :

Le risque d'apparition d'un incident sur le réseau n'est pas nul car lié à de nombreux paramètres aléatoires. Ainsi, les courts-circuits peuvent avoir diverses origines :

• **Electriques** : C'est l'altération des isolants des matériels de réseau, par exemple. En effet, les matériels électriques que l'on trouve sur le réseau ou dans les postes comportent des isolants (solides, liquides ou gazeux) constitués d'assemblages plus ou moins complexes placés entre les parties sous tension et la masse. Ces isolants subissent des dégradations au cours du temps qui conduisent à des défauts d'isolement et donc des courts-circuits.

• **Atmosphériques** : Les lignes aériennes sont soumises aux perturbations extérieures telles que la foudre, les tempêtes ou le givre.

• **Mécaniques** : C'est la chute d'un corps sur un conducteur ou la dégradation mécanique de conducteurs consécutive à des agressions extérieures par des engins de terrassement par exemple.

• **Humaines** : Ce sont les fausses manœuvres telles l'ouverture d'un sectionneur en charge par exemple.

I.3.1)-Les différents types de défauts dans les réseaux éléctrique [6] :

• **Les défauts triphasés** : Ce sont les courts-circuits entre les trois phases avec ou sans mise à la terre.

• **Les défauts biphasés** : Ce sont les courts-circuits entre deux phases ou une phase et le neutre avec ou sans mise à la terre.

• **Les défauts monophasés** : Ce sont des défauts entre une phase et la terre ou une phase et le neutre. Ils génèrent la circulation d'un courant homopolaire. Leur intensité est limitée par la résistance de terre et par la mise à la terre du neutre.

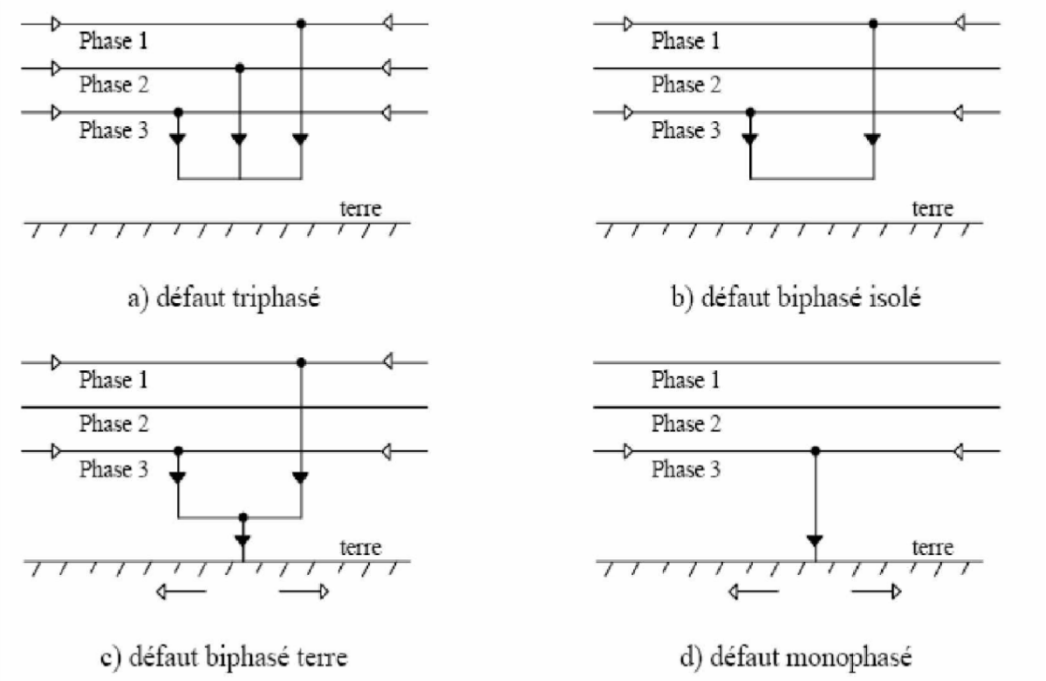


Figure (I.2) : Différents types de défauts.

I.3.1.1)-Les courts-circuits [5] [6] [11] :

Les courts-circuits sont des phénomènes transitoires, ils apparaissent lorsque l'isolement entre deux conducteurs de tensions différentes ou entre un conducteur sous tension et la terre est rompu. Ils engendrent des courants très importants dans les éléments constituants le réseau.

I.3.1.1.1)-Types de court-circuit [6] :

Les courts-circuits sont de natures et de types différents:

-Court-circuit monophasé :

Il correspond à un défaut entre une phase et la terre, c'est le plus fréquent.

-Court-circuit triphasé :

Il correspond à la réunion des trois phases, c'est le courant de CC le plus élevé.

-Court-circuit biphasé isolé :

Il correspond à un défaut entre deux phases. Le courant résultant est plus faible que dans le cas du défaut triphasé, sauf lorsqu'il se situe à proximité immédiate d'un générateur.

-Court-circuit biphasé terre :

Il correspond à un défaut entre deux phases et la terre.

I.3.1.1.2)-Caractéristique des défauts monophasés [13] :

• **Défaut auto–extincteur** : Un défaut auto-extincteur monophasé est un défaut qui s'élimine seul, sans coupure de l'alimentation ou fermeture du disjoncteur

• **Défaut réamorçant** : Un défaut réamorçant est un défaut monophasé auto–extincteur, qui réapparaît périodiquement (dans environ 90% de cas, le défaut monophasé auto– extincteur est constitué d'un seul amorçage). Le temps entre deux réamorçages peut varier de quelques millisecondes à quelques centaines de millisecondes. Si le temps entre deux réamorçages successifs est inférieur à 200 ms, on considère cette succession de défauts comme le même défaut.

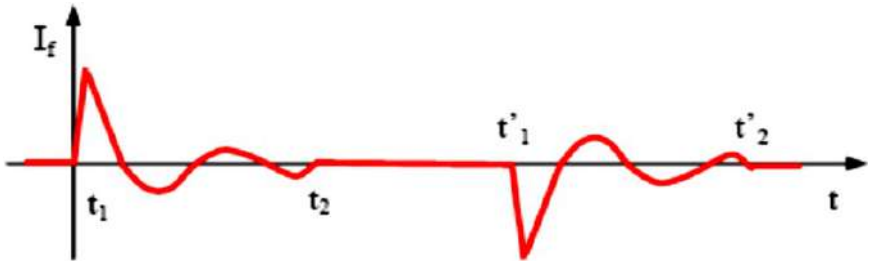


Figure (I.3) : allure d'un défaut réamorçant

Chaque période du défaut réamorçant a les caractéristiques suivantes :

- Elle est caractérisée par l'existence d'un transitoire de courant significatif à l'amorçage (de quelques dizaines à quelques centaines d'ampères) qui se produit lors de l'apparition du défaut.

-Elle disparaît spontanément, en des temps généralement très courts (80% durent moins de 20ms).

- Elle ne comprend généralement pas de courant à composante 50 Hz notable.

• **Défaut en régime établi à 50Hz** : Un défaut en régime établi 50Hz comporte un courant ayant essentiellement une composante à 50Hz après son apparition.

I.3.1.1.3)-Les éffets des défauts [14] :

Elles sont une gêne pour les utilisateurs et les fournisseurs de l'énergie électrique sans qu'il y ait de véritable coupure du réseau électrique. D'une façon générale, quelle que soit la perturbation, les effets peuvent être classés de deux façons différentes:

-Effets instantanés : Manœuvres intempestives de contacteurs ou d'organes de protection, mauvais fonctionnement ou arrêt d'une machine. L'impact de la perturbation est alors directement remarquable sur le plan financier et technique.

-Effets différés : Pertes énergétiques, vieillissement accéléré du matériel dû aux échauffements et aux efforts électrodynamiques supplémentaires engendrés par les perturbations. L'impact financier est difficilement quantifiable.

I.3.1.1.3.1)-Le bon fonctionnement des réseaux :

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

I.3.1.1.3.2)- La tenue diélectrique des matériels :

Dans le cas d'un défaut triphasé, les défauts provoquent des surintensités violentes qui peuvent dépasser 20 à 30 fois le courant de service normal. Ces surintensités amènent deux types de contraintes :

- Des contraintes mécaniques dues aux efforts électrodynamiques qui entraînent le balancement des conducteurs aériens et le déplacement des bobinages des transformateurs. Ces effets sont souvent à l'origine des défauts entre phases qui sont en générale beaucoup plus sévère que les défauts entre phase et terre. Parce que le courant de défaut a la terre est limite par l'impédance de mise a la terre des points neutre des réseaux.
- Des contraintes thermiques dues au dégagement de chaleur par effet joule dans les conducteurs.

I.3.1.1.3.3)-La qualité de fourniture d'énergie :

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

I.3.1.1.3.4. Les circuits de télécommunication :

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

I.3.1.1.3.5)- La sécurité des personnes :

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

I.3.1.1.4)- Détection et élimination des défauts [14] :

La détection doit être très rapide car elle entraîne l'ouverture des disjoncteurs qui mettront hors tension la partie défectueuse du réseau. Elle est réalisée à partir des informations localement disponibles à l'endroit des indicateurs de passage de défaut (IPD) et des relais de protection (courants et tensions mesurés). Lors du défaut polyphasé, le courant de défaut est très grand par rapport au celui de charge, la détection de ce type de défaut est donc simplement effectuée par le franchissement d'un seuil de courant. Par contre, lors du défaut monophasé, le courant de défaut est faible (en particulier dans le réseau à neutre isolé ou compensé), la détection de défaut est beaucoup plus compliquée.

I.3.1.2)- Les Surtension :

Il existe deux classes des surtensions :

- Surtensions par décharges électriques atmosphériques :

Les orages sont des événements très habituels, et aussi très dangereux. On estime que sur notre planète se produisent simultanément quelques 2000 orages et qu'environ 100 coups de foudre se déchargent sur la terre chaque seconde. Au total, cela représente environ 4000 orages quotidiens et 9 millions de décharges atmosphériques chaque jour.

Au moment de l'impact, la foudre provoque une impulsion de courant qui arrive à atteindre des dizaines de milliers d'ampères. Cette décharge génère une surtension dans le système électrique qui peut provoquer des incendies et la destruction des équipements électriques.

Surtensions de commutation :

Ces surtensions sont générées dans les lignes électriques, principalement en raison des commutations de machines de grande puissance. Les moteurs électriques sont des charges très inductives dont la connexion et le débranchement provoque des surtensions. Il existe de même d'autres processus capables de les produire, comme par exemple l'allumage et l'extinction de la soudure à l'arc.

I.3.1.3)-Les surcharge :

La surcharge d'un appareil est caractérisée par un courant supérieur au courant admissible, les origines de surcharges sont :

- Les courts-circuits.

- Les reports de charge.

- Les pointes de consommation.

- L'enclenchement des grandes charges.

Les surcharges provoquent des chutes de tension importantes dans le réseau et accélère le vieillissement des équipements.

I.3.1.4)- Les oscillations :

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

I.3.1.5)- Les déséquilibres :

Les déséquilibres sont généralement dus à la mauvaise répartition des charges sur les trois phases. Ils apparaissent surtout dans les réseaux de distribution, ils donnent naissance à la composante inverse du courant, cette composante provoque :

- Des chutes de tension supplémentaires.

- Des pertes de puissance.

- Des échauffements.

I.4)- Protection de Réseaux Electriques :

La protection des réseaux électriques désigne l'ensemble des appareils de surveillance et de protection assurant la stabilité d'un réseau électrique. Cette protection est nécessaire pour éviter la destruction accidentelle d'équipements coûteux et pour assurer une alimentation électrique ininterrompue.

I.4.1)-Système de Protection :

I.4.1.1)- Définition :

Un système de protection consiste d'un ensemble de dispositifs destinés à la détection des défauts et des situations anormales des réseaux afin de commander le déclenchement d'un ou de plusieurs éléments de coupures.

I.4.1.2)- Système de Protection :

Les fonctions de protection sont réalisées par des relais ou des appareils multifonctions.

A l'origine, les relais de protection étaient de type analogique et effectuaient généralement une seule fonction. Actuellement, la technologie numérique est la plus employée. Elle permet de concevoir des fonctions de plus en plus évoluées et un même appareil réalise généralement plusieurs fonctions . C'est pourquoi, on parle plutôt d'appareils multifonctions[11].

I.4.1.3)-Contraintes supplémentaires pour la Protection[6] :

Les protections électriques ne doivent pas apporter de limitation au fonctionnement normal des réseaux électriques, en particulier :

-Elles ne doivent pas limiter la souplesse d'utilisation du réseau protéger en interdisant certains schémas d'exploitation : réseaux bouclés, … etc.

- Elles doivent rester stables en présence de phénomène autre que les défauts: lors de manœuvres d'exploitation, pendant les régimes transitoires consécutifs à la mise sous tension ou hors tension à vide des transformateurs. Egalement, lors de variations admissibles de la tension et des fréquences et en présence de surcharges et de déséquilibres entrant dans la marge de fonctionnement des réseaux électriques. Elle doit être aussi insensible aux oscillations résultant du régime transitoire des alternateurs.

I.4.2)-Qualité principale d'un Système de Protection [11] [15] [16] [17] :

I.4.2.1)- Rapidité :

Les défauts sont donc des incidents qu'il faut éliminer le plus vite possible, c'est le rôle des protections dont la rapidité de fonctionnement est des performances prioritaires. Le temps d'élimination des courts-circuits comprend deux composantes principales :

• Le temps de fonctionnement des protections (quelles dizaines de millisecondes).

• Le temps d'ouvertures des disjoncteurs, avec les disjoncteurs modernes (SF6 ou à vide).

I.4.2.2)- Sélectivité :

Les protections constituent entre elles un ensemble cohérent dépendant de la structure réseau et de son régime de neutre. Elles doivent donc être envisagées sous l'angle d'un système reposant sur le principe de sélectivité. Elle consiste à isoler le plus rapidement possible la partie du réseau affectée et uniquement

cette partie, en laissant sous tension toutes les parties saines du réseau. Différent mode de sélectivité peuvent être mis en œuvre :

• La sélectivité ampérométrique par les courants.

• Sélectivité chronométrique par le temps.

• Sélectivité par échange d'information, dite sélectivité logique. La sélectivité à pour but d'assurer d'une part la continuité de service d'alimentation en énergie électrique et d'autre part la fonction secours entre les protections.

I.4.2.2.1)- Sélectivité ampèremétrique :

la sélectivité ampèremétrique consiste à placer en amont un coupe-surintensité d'intensité nominale supérieure (2 rangs) à celle du coupe-surintensité directement en aval

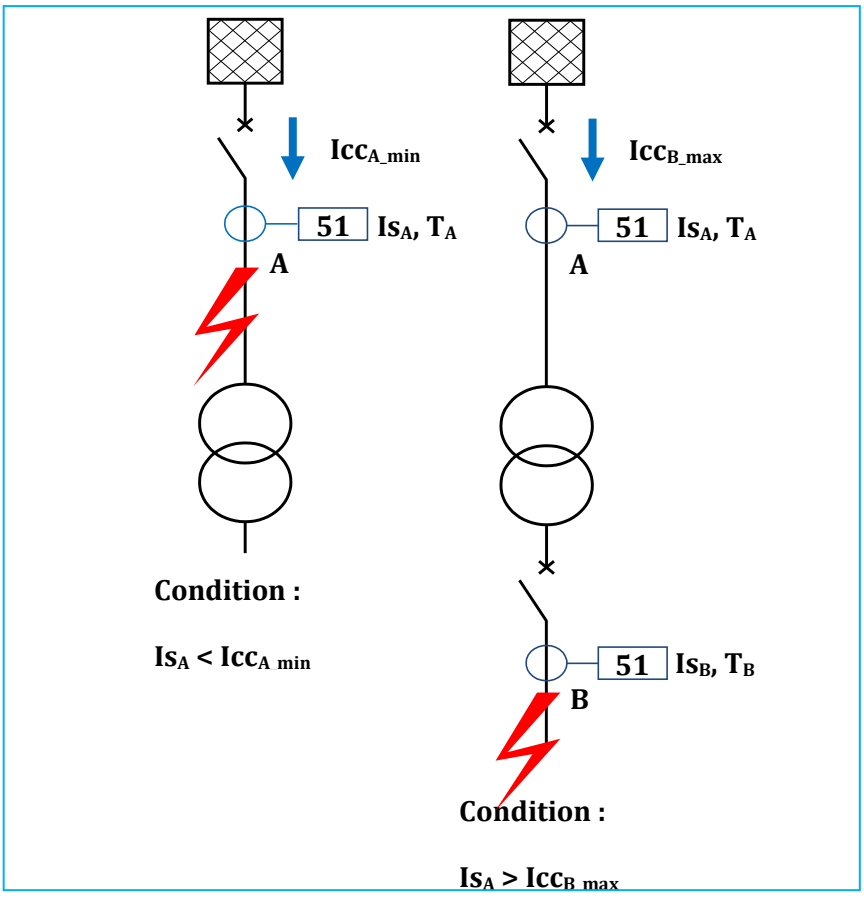


Figure (I.4) : Fonctionnement d'une sélectivité ampèremétrique.

I.4.2.2.2)-Sélectivité chronométrique :

la sélectivité chronologique consiste à placer en amont un coupe-surintensité dont le temps de réaction est supérieur (à intensité équivalente) à celui du coupe-surintensité directement en aval.

I.4.2.2.3)-Sélectivité logique :

la sélectivité logique consiste à placer en amont des coupe surintensité en cascade qui vont communiquer entre eux par un bus et décider duquel doit couper le circuit.

I.4.2.3)-Sensibilité

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

• Le courant maximal qui est fixé par le dimensionnement des installations et est doc parfaitement connu.

• Un courant minimal dont la valeur est très difficile à apprécier et qui correspond à un court-circuit se produisant dans des conditions souvent exceptionnelles. La notion de sensibilité d'une protection est fréquemment utilisée en référence au courant de court-circuit le plus faible pour lequel la protection est capable de fonctionner.

I.4.2.4)- Fiabilité :

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

• Une protection a un fonctionnement correct lorsqu'elle émet une réponse à un court-circuit sur le réseau en tout point conforme à ce qui est attendu.

• A l'inverse, pour un fonctionnement incorrect elle comporte deux aspects:

- Le défaut de fonctionnement ou non-fonctionnement lorsqu'une protection, qui aurait du fonctionner, n'a pas fonctionné.

- Le fonctionnement intempestif, qui est un fonctionnement non justifié, soit en l'absence de défaut, soit en présence d'un défaut pour laquelle la protection n'aurait pas du fonctionner. •

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

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

- **La sécurité** : qui est la probabilité de ne pas avoir de fonctionnement intempestif.

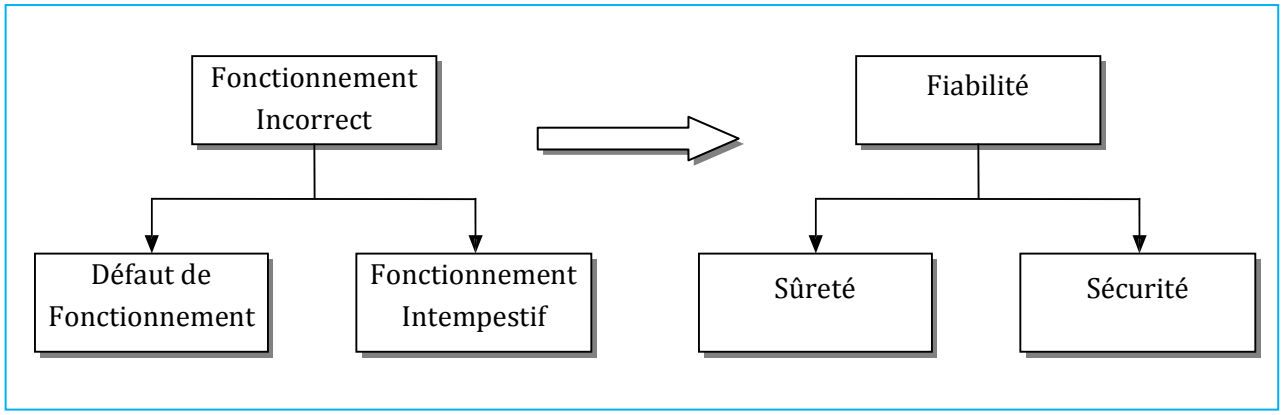


Figure (I.5) : Fiabilité d'une protection.

On peut améliorer la fiabilité en associant plusieurs protections, mais, comme on peut le voir sur la **Figure I.4**, sûreté et sécurité sont deux exigences contradictoires (**Figure I.6**).

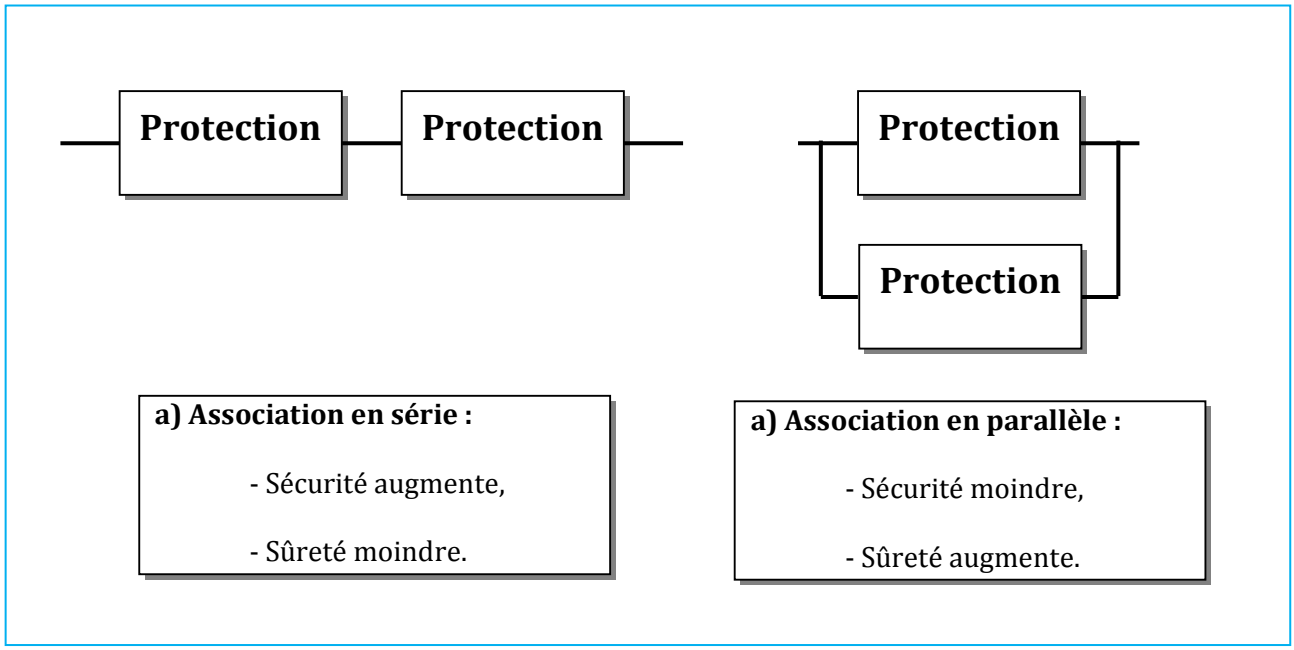


Figure (I.6) : Association de protection

I.5)- Conclusion

Ce chapitre donne une description comparative des structures typiques de réseaux électrique, ainsi les effets des anomalies et les perturbations sur les réseaux électriques tels que les courts-circuits, les surtensions, les surcharges, ….etc. et leurs systèmes de protection.

Chapitre II : Techniques d'Analyse des Défauts Electriques

II.1)-Introduction [18] :

Le système d'énergie électrique est composé de moyens de production tels que les centrales électriques. L'énergie est acheminée aux abonnés à travers les réseaux de transports et de distributions. Les réseaux électriques représentent des investissements considérables consentis par les compagnies d'électricité pour alimenter leurs clients aux meilleures conditions de coût et de qualité de service. Pour cela, le réseau électrique doit répondre à trois exigences essentielles : stabilité, économie et surtout la continuité du service.

Les réseaux sont donc affectés par des perturbations qui peuvent mettre en cause la pérennité du matériel et la qualité du service rendu et dont il faut chercher à minimiser les conséquences. Tout défaut doit donc être identifié immédiatement et l'ouvrage affecté doit être isolé du réseau le plus rapidement possible, c'est l'objet de la protection des réseaux.

II.2)-Techniques utilisées dans l'analyse des défauts [19] :

Les méthodes d'analyse des défauts sont généralement déductive qui peut être utilisée exclusivement comme une analyse qualitative ou, si on le souhaite, étendue à une analyse quantitative. L'analyse des défauts nécessite une étude détaillée des sous-systèmes pour déterminer le type de défaut, les causes et les effets qui en résultent pour le sous-système et son fonctionnement.

L'analyse des défauts qui apparaissent dans les lignes de transport d'énergie électrique comporte des étapes essentielles représentées par **la Figure (II.1).**

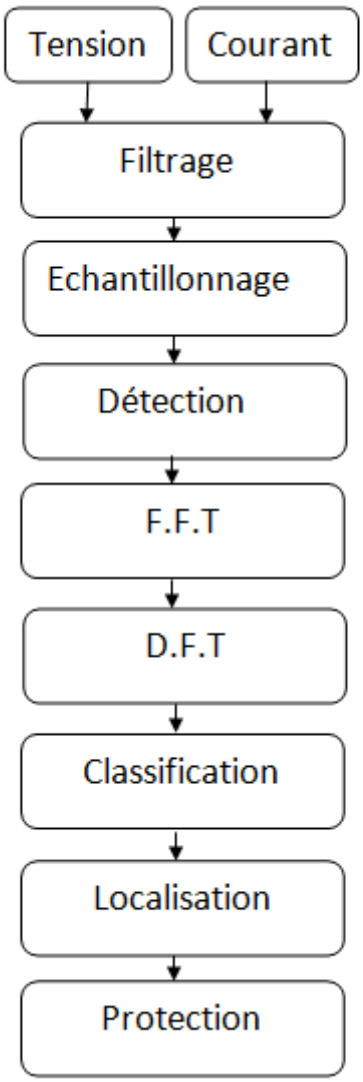


Figure (II.1) : Schéma des techniques utilisées dans l'analyse des défauts.

II.2.1)-Filtrage:

Un filtre numérique est un élément qui effectue un filtrage à l'aide d'une succession d'opérations mathématiques sur un signal discret .On s'intéressera tout particulièrement au filtrage numérique, qui sera réalisé par un microcontrôleur (en utilisant des logicielles).

On choisira une technique de filtrage numérique élémentaire, qui consiste à répéter n fois la mesure, et d'en calculer la moyenne arithmétique (ce sera le travail du microcontrôleur, à partir des résultats du convertisseur analogique - numérique). Cela revient à déterminer la composante continue du signal, le filtre numérique est donc du type passe-bas.

II.2)-Echantillonnage :

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

II.2.3)- Description des méthodes utilisée :

Parmi les méthodes proposées dans la littérature et utilisées dans la détection des défauts, nous citerons les méthodes suivantes :

- Méthode 1 **:** La méthode basée sur la comparaison entre la valeur de l'échantillon du signal courant au temps t et celui au temps t+T (T : période 20 ms). Lorsque la différence entre eux atteint un seuil prédéterminé, on conclut directement qu'il y a un défaut sur la phase.
- Méthode 2 **:** La méthode basée sur la comparaison entre deux échantillons successifs d'un même signal (courant ou tension). Lorsque la différence entre eux atteint un seuil prédéterminé, on conclut directement qu'il y a un défaut sur la phase qui correspond au signal traité.
- Méthode 3**:** la méthode est basée sur l'impédance du système à une seule extrémité et du système à deux extrémités. Cette méthode est basée sur le calcul de l'impédance sur ses composants fondamentaux créés par les défauts.
- Méthode 4 **:** la méthode d'approches des transformations d'ondelettes.

II.2.4)-Classification des défauts :

La classification des défauts dans les lignes de transport est une tâche très importante pour déterminer là où les phases en défaut et par suite déterminer l'endroit du défaut afin de réparer le plus rapidement possible ces défaut et rendre le service d'alimentation aux clients. De nombreuses méthodes de classification sont développées jusqu'à présent, ceux qui sont basées sur le calcul des impédances, dépendent de l'impédance directe, inverse et homopolaire. Et d'autres méthodes basées sur l'utilisation de la composante fondamentale des signaux des tensions et des courants.

Parmi ces méthodes on propose deux méthodes de classification :

- 1ére méthode basée sur l'utilisation des composantes symétriques.
- 2éme méthode basée sur l'utilisation des mesures de la composante fondamentale des signaux des courants avant et pendant le défaut.

II.2.4.1)-Composantes symétriques :

Dans les conditions de fonctionnement déséquilibré, l'approche pratique la plus utilisée est celle basée sur l'utilisation de la transformation des composantes symétriques.

Celle-ci transforme les variables du système de phase (a,b,c) vers un système formé des composantes symétriques dénommées direct (positif), inverse (négatif) et homopolaire (zéro). Ces composantes sont notées respectivement par l'indice (d, i, o).

Les réseaux ainsi formés, sont indépendants et ils sont connectés qu'aux points de défauts, (pour le cas d'un défaut non symétrique) .

Il n'y a aucune puissance résultante de la combinaison des tensions directes avec les courants inverses et homopolaires, et par suite la puissance produite par la machine et la puissance synchronisant entre chaque paire de machine synchrone du réseau sont de type direct.

En conséquence le réseau direct est d'un intérêt primordial dans l'étude de la stabilité, alors que les autres réseaux (inverse et homopolaire) ont peu d'influence.

II.2.4.2)-Transformation des composantes symétriques (TCS) :

Le principal intérêt des composantes symétriques résulte de ce qu'elles permettent de représenter un réseau déséquilibré par trois systèmes équilibrés:

1- Système direct (positif) **:** Il comporte trois phases égales en module et décalées entre elles de 120°, et possède la même séquence de phase que celui du système réel équilibré.

2- Système inverse (négatif) **:** Il comporte trois phases égales en module et décalées entre elles de 120°, la séquence de phase que possède ce système est inverse par rapport au système réel équilibré.

3- Système homopolaire (zéro) **:** Ce système comporte trois phases géométriquement parallèles, égales en module.

On définit par I_a, I_b et I_c les courants des phases du système déséquilibré, la détermination de ces courants est donnée par la résolution du système d'équation suivant :

$$\begin{cases} I_a = I_a^o + I_a^d + I_a^i \\ I_b = I_b^o + I_b^d + I_b^i \\ I_c = I_c^o + I_c^d + I_c^i \end{cases} \quad \text{(II.1)}$$

On définit l'opérateur a par :

$$a = 1\angle 120° = -0.5 + j0.866 \quad \text{(II.2)}$$

$$a^2 = 1\angle 240° = -0.5 - j0.866 \quad \text{(II.3)}$$

$$a^3 = 1\angle 360° = 1 + j0 \quad \text{(II.4)}$$

Il est clair que :

$$a + a^2 + a^3 = 0. \quad \text{(II.5)}$$

Soit:

$$\mathrm{I_a^d} = \mathrm{I_a^d}\angle 0° = \mathrm{I_a^d} \quad \text{(II.6)}$$

$$\mathrm{I_b^d} = \mathrm{I_a^d}\angle 240° = a^2\mathrm{I_a^d} \quad \text{(II.7)}$$

$$\mathrm{I_c^d} = \mathrm{I_a^d}\angle 120° = a\mathrm{I_a^d} \quad \text{(II.8)}$$

Et :

$$\mathrm{I_a^i} = \mathrm{I_a^i}\angle 0° = \mathrm{I_a^i} \quad \text{(II.9)}$$

$$\mathrm{I_b^i} = \mathrm{I_a^i}\angle 120° = a\mathrm{I_a^i} \quad \text{(II.10)}$$

$$\mathrm{I_c^i} = \mathrm{I_a^i}\angle 240° = a^2\mathrm{I_a^i} \quad \text{(II.11)}$$

Soit en écriture matricielle :

$$\begin{pmatrix} \mathrm{I_a} \\ \mathrm{I_b} \\ \mathrm{I_c} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & a^2 & a \\ 1 & a & a^2 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \mathrm{I_a^o} \\ \mathrm{I_a^d} \\ \mathrm{I_a^i} \end{pmatrix} \quad \text{(II.12)}$$

Ou :

$$\mathrm{I^{abc}} = \mathcal{A}\mathrm{I_a^{odi}} \quad \text{(II.13)}$$

$$\mathcal{A} = \begin{pmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & a^2 & a \\ 1 & a & a^2 \end{pmatrix} \quad \text{(II.14)}$$

$\mathcal{A}$: Représente le passage entre les variables de phases I^{abc} et les variables symétriques I^{012}.

Le passage entre les variables symétriques et les variables de phases est tel que :

$$I_a^{odi} = \mathcal{A}^{-1} I^{abc} \quad \text{(II.15)}$$

Avec :

$$\mathcal{A}^{-1} = \frac{1}{3}\begin{pmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & a & a^2 \\ 1 & a^2 & a \end{pmatrix} \quad \text{(II.16)}$$

Soit : $$\mathcal{A}^{-1} = \frac{1}{3}\mathcal{A}^* \quad \text{(II.17)}$$

De même :

$$\begin{pmatrix} V_a \\ V_b \\ V_c \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & a^2 & a \\ 1 & a & a^2 \end{pmatrix}\begin{pmatrix} V_a^o \\ V_a^d \\ V_a^i \end{pmatrix} \quad \text{(II.18)}$$

Ou : $$V^{abc} = \mathcal{A} V_a^{odi} \quad \text{(II.19)}$$

II.4.3)-Description de la méthode de comparaison des phases :

Symétriques pour la classification :

Cette méthode repose sur la comparaison des phases des vecteurs de courants symétriques

1- Défaut monophasé *:*

Pour les défauts monophasés on a :

1- Le courant homopolaire Io sera différent de zéro.

2- $\alpha = arg\left(\frac{I_d}{I_o}\right), \beta = arg\left(\frac{I_i}{I_o}\right)$ et pour chaque cas il faut :

-Défauts a-t : α=0° et β = 0°.

-Défauts b-t : α=120° et β = 240°.

-Défauts c-t : α=240° et β =120°.

2- Défaut biphasé sans terre *:*

Pour ce type de défaut on a :

1- Le courant homopolaire Io sera nul.

2- $\gamma = arg\left(\frac{I_d}{I_i}\right)$ et pour chaque cas il faut:

- Défauts a-b : $\gamma = -60°$.

- Défauts a-c : $\gamma = 60°$.

- Défauts b-c : $\gamma = 180°$.

3- Défaut biphasé avec terre *:*

Pour ce type de défaut on a :

1- Le courant homopolaire **Io** sera différent de zéro.

2- Pour chaque type de défauts a son critère de classification :

- Défaut a-b-t : $\lambda = arg\left(\frac{I_d - aI_o}{I_i - a^2 I_o}\right) = -60°$.

- Défaut b-c-t : $\delta = arg\left(\frac{I_d - a^2 I_o}{I_i - aI_o}\right) = 180°$.

- Défaut a-c-t : $\mu = arg\left(\frac{I_d - a^2 I_o}{I_i - aI_o}\right) = 60°$.

4- Défaut triphasé :

Pour ce type de défaut les courants homopolaire I_o et l'inverse I_i doivent être nuls.

II.5)-Localisation de défaut :

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

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

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

II.5.1)-Description des algorithmes de localisation :

II.5.1.1)-Les algorithmes basés sur la fréquence fondamentale *:*

Les algorithmes basés sur la fréquence fondamentale sont également connus en tant que des méthodes basées sur l'impédance apparente. Elles sont les méthodes les plus communes employées dans des systèmes de protection. L'idée principale de ces méthodes est de calculer l'impédance apparente en examinant une seule extrémité de la ligne.

Ces méthodes peuvent être développées en utilisant les données extraites d'une seule ou des deux extrémités de la ligne. L'avantage des techniques de localisation de défauts qui utilisent les données des deux extrémités de la ligne est de pouvoir détecter et localiser les défauts à la terre sans connaître l'impédance homopolaire de la ligne de transport.

La localisation précise du défaut en utilisant les techniques de l'impédance apparente exige d'abord la bonne extraction des quantités des signaux des phases par filtrage (amplitudes, déphasage, …). Ce procédé de filtrage garantit que les coupures n'affectent pas la mesure des signaux des phases.

Le procédé est généralement comme suit :

- Les tensions et les courants des phases sont mesurés.
- Les composants fondamentaux sont extraits.
- Détermination de type de défaut.
- L'application de l'algorithme de l'impédance apparente.

Si on assume que la résistance de défaut est négligeable, les équations présentées dans le **Tableau (II.1)** peuvent être employées pour calculer la distance du défaut :

Tableau (II.1) : Equation de calcul de la distance du défaut.

Type de défaut	L'impédance directe de défaut ($d \bullet Z_1$)
A-terre	$V_a / (I_a + k \bullet 3 \bullet I_0)$
A-B / A-B-terre	V_{ab}/I_{ab}
A-B-C	V_{ab}/I_{ab}, V_{bc}/I_{bc} ou V_{ac}/I_{ac}

Où : I_0 : courant homopolaire de la ligne.

$k = (Z_0 - Z_1)/(3 \bullet Z_1)$

Z_1: l'impédance directe de la ligne.

Z_0: l'impédance homopolaire de la ligne.

d : distance du défaut.

Ces formules simples ont été développées dans la littérature prenant en considération jusqu'ici la résistance du défaut, rapportant des techniques plus complexes et plus précises de localisation de défaut.

La méthode la plus connue pour la localisation du défaut résistant est la méthode de la réactance apparente (simple réactance). Cette méthode fonctionne raisonnablement bien pour des systèmes homogènes quand le défaut n'implique pas des valeurs significatives de la résistance du défaut et du courant de la charge. De grandes erreurs sont présentées à

l'évaluation de la distance du défaut à cause du courant qui vient de l'autre extrémité de la ligne et l'impédance de la charge et de la source.

Takagi et autres ont reconnu la nécessité d'améliorer la méthode de réactance en présentant une nouvelle méthode à une seul extrémité qui calcule la réactance d'une ligne en défaut et fournit une certaine correction aux erreurs provoquées par des divers facteurs, tels que la charge et la résistance de défaut. Identifié les limitations des méthodes de la réactance et de Takagi, et a présenté l'algorithme modifié de Takagi. Cette nouvelle méthode améliore la performance de l'algorithme de Takagi quand certaines données du système sont disponibles.

D'autres différentes méthodologies utilisant les données des phases des deux extrémités à la fréquence fondamentale. Ces méthodes ont une ou plusieurs limitations, telles que la synchronisation des données, la connaissance de la charge de pré-défaut.

Le besoin d'exécuter des itérations et la communication d'un grand nombre de données entre les extrémités. En outre, un certain nombre des méthodes ne s'appliquent pas aux lignes aériennes avec couplage mutuel.

II.5.1.2)- Les algorithmes basés sur les équations différentielles :

L'avantage principal des méthodes de localisation de défaut utilisant les équations différentielles est qu'elles n'ont pas besoin d'estimer les tensions et les courants des phases. L'idée fondamentale est de résoudre les équations différentielles la ligne de transport et d'estimer par conséquent l'impédance de défaut. Une fois que l'impédance de défaut est calculée, la distance de défaut est facilement déterminée. Elles sont classifiées selon le modèle de la ligne : ligne courte, ou ligne longue.

Pour le modèle de la ligne courte l'équation différentielle de la ligne est donnée comme :

$$v_{x1}(t) - v_{x2}(t) = (x_2 - x_1)\left[ri(t) + \frac{Ldi(t)}{d(t)} \right] \qquad \text{(II.20)}$$

Où : x1 et x2 sont deux endroits différents de la ligne.

Pour le modèle de la ligne longue (modèle en π) on utilise les équations de Télégraphiste :

$$\frac{dv}{dx} + L\frac{di}{dt} = -Ri \qquad \text{(II.21)}$$

$$C\frac{dv}{dt} + L\frac{di}{dx} = 0 \qquad \text{(II.22)}$$

Où : v est la tension de phase, i est le courant de phase, R est la résistance série de la ligne, L est l'inductance série de la ligne et C'est la capacité de la ligne.

Le modèle de la ligne courte est simple mais c'est utile que pour des lignes très courtes. La négligence de la capacité de la ligne cause des erreurs dans le calcul de la distance du défaut. Par conséquence, les méthodes de localisations de défaut utilisant le modèle de ligne en π sont plus précises, cependant, ils sont sensibles à la transposition, l'accouplement mutuel de la ligne, l'angle de défaut, des changements de paramètre dans les différentes gammes de fréquence et dans certains cas à la compensation de la ligne.

II.5.1.3)- Les algorithmes basés sur la méthode des ondes mobiles *:*

La localisation de défauts pour les lignes de transport aérienne et les câbles souterrains utilisant la méthode des ondes mobile s'a été annoncée depuis 1931 La renaissance de cette méthode est partiellement due à la demande récente du marché des localisateurs de défauts rapide et précis et la disponibilité de nouvelle technologie dans l'acquisition des données à grande vitesse, la synchronisation de temps utilisant le GPS et l'avancement dans les systèmes de télécommande et de communication. Deux méthodes proposées pour localiser les défauts dans les lignes de transport utilisation la méthode des ondes mobiles :

1. Les algorithmes qui utilisent les données extraites des deux extrémités de la ligne : dans cet arrangement, le temps relatif d'arrivée de l'onde mobile produit par le défaut est mesuré aux deux extrémités de la ligne en défaut. Un canal de communication à grande vitesse doit être disponible pour la mesure précise du temps de propagation de l'onde.

2. Les algorithmes qui utilisent les données extraites d'une seule extrémité : cet arrangement est utilisé pour les lignes hautes tension en courant continu (HVDC). Pour utiliser cette technique pour les lignes de transport en courant alternatif, plus de recherche est nécessaire.

Les algorithmes de localisation de défaut utilisant la méthode des ondes mobiles sont basés sur la mesure de l'énergie reçue et reflétée d'une seule ou des deux extrémités de la ligne ou du lieu de défaut en défaut utilisant des temps synchronisés. Quand un défaut se produit, le changement de tension au point de défaut produit une impulsion électromagnétique à haute fréquence. Cette impulsion produite s'appelle une « onde mobile ». La distance de défaut est déterminée par la différence du temps entre l'onde incidente venant de défaut et l'onde correspondante reflétée au défaut.

En 1951, Lewis a classifié les méthodes des ondes mobiles en quatre types A, B, C et D selon leur mode de fonctionnement.

***Type A* :** cette catégorie utilise une seule extrémité de la ligne et calcule la distance de défaut en basant sur le temps entre la première détection de défaut et les détections des réflexions produites par le défaut.

***Type B* :** est une méthode qui utilise deux extrémités dans laquelle le localisateur de défaut détecte le défaut à une extrémité et envoie un signal à l'autre extrémité de la ligne de transport. La période de l'arrivée du signal est employée par synchronisation pour déterminer l'endroit de défaut. La méthode de transmission du signal et la possibilité d'un retard entre la détection de défaut et la génération du signal peuvent varier selon le type de catégorie choisi.

***Type C* :** ressemble beaucoup au type A, sauf qu'il emploie une impulsion produite et ses réflexions pour localiser le défaut plutôt qu'à utiliser le défaut et ses réflexions.

***Type D* :** est une méthode à deux extrémités qui emploie les périodes de détection des coupures à l'extrémité inverse de la ligne de transport pour déterminer l'endroit de défaut ; les localisateurs de défaut aux deux extrémités de la ligne de transport doivent être synchronisés pour que ce type travaille correctement. Une nouvelle méthode qui utilise une seule extrémité (le type E) a été proposée en 1993 à la différence des types précédents, elle utilise les coupures produites quand la ligne est réenclenchée par le disjoncteur. Ses rapports d'essai sur le terrain dans diverses conditions montrent une exécution prometteuse, dans laquelle l'erreur maximum d'évaluation ne dépasse pas 2.7 %.

La méthode des ondes mobiles peut fournir des résultats très précis quand elle fonctionne correctement. Cependant, des différents facteurs peuvent affecter leurs exécutions remarquablement.

La propagation peut être affectée par les paramètres du système et la configuration du réseau menant à une atténuation forte des ondes. Une autre difficulté surgit pour les défauts proches au jeu de barres. De plus, les ondes reflétées peuvent être sérieusement affectées par la discontinuité de la ligne telle que les branches de dérivation, des charges et la section du câble.

La complexité de leur simulation, particulièrement si en considère la dépendance des paramètres de la ligne en fonction de la fréquence est également une autre.

En outre, le facteur économique est un inconvénient essentiel en raison du matériel supplémentaire exigé pour ces arrangements aussi bien que les outils de communication et de synchronisation.

II.5.2)-Localisation de défaut en utilisant une seule mesure par la méthode de « Takagi » *:* [20]

Cette méthode a été discutée dans la littérature par divers chercheurs, notamment par Takagi qui emploie le courant de superposition ΔI_S.

La **Figure (II.2)** montre une ligne de transport alimenté par deux sources S et R avec un défaut à une distance « m » (en % de la ligne) de la source S.

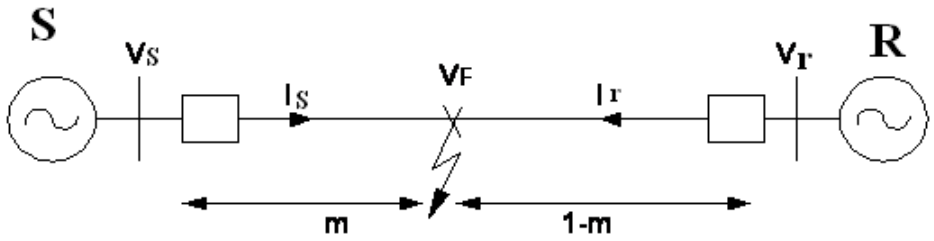


Figure (II.2) : Ligne en défaut à une distance m de la source S.

Le schéma équivalent de la **Figure (II.2)** pour un défaut triphasé est représenté sur la **Figure (II.3).**

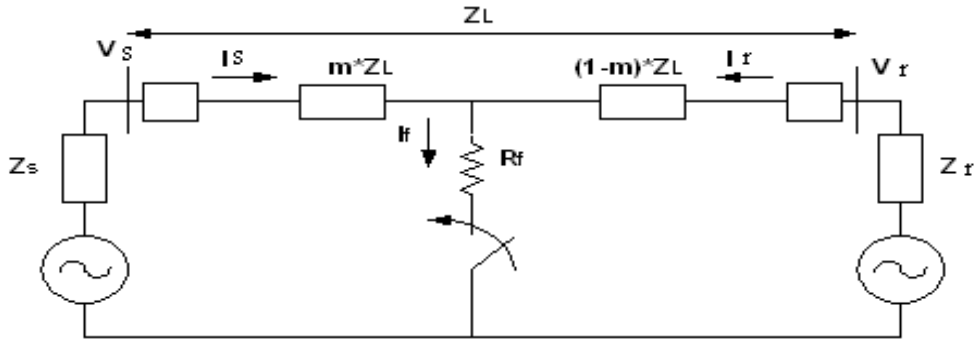


Figure (II.3): Schéma équivalent d'une ligne avec un défaut triphasé.

Avec :

R_f: la résistance de défaut.

V_S : la tension à l'entrée de la ligne.

I_S : le courant à l'entrée de la ligne.

V_r : la tension à la sortie de la ligne.

I_r : le courant à la sortie de la ligne.

I_f : le courant du défaut.

Z_L : l'impédance totale de la ligne entre S et R.

m : distance du défaut.

Zs et **Zr** : impédances respective des sources S et R.

De la **Figure (II.3)** on peut écrire l'équation suivante :

$$V_S = m.Z_L.I_S + R_f.I_f \quad \text{(II.23)}$$

La valeur de l'impédance ZF_S mesurée à partir de S (impédance de la boucle en défaut vue de S) peut être déterminée en divisant par le courant mesuré I_S.

$$ZF_S = V_S / I_S = m.Z_L + R_f.(I_f / I_S) \quad \text{(II.24)}$$

Posons :

$$\Delta I_S = I_S - I_L \quad \text{(II.25)}$$

Où :

I_S : le courant à la source S après le défaut.

I_L : le courant à la source S avant le défaut.

L'équation (II.24) peut s'écrire :

$$V_S = m.Z_{1L}.I_S + R_f.\frac{\Delta I_S}{d_s} \quad \text{(II.26)}$$

En multipliant les deux cotés de l'équation (II.23 par le conjugué complexe ΔI_S^*, et en employant seulement le partie imaginaire on obtient :

$$\mathrm{Im}(V_S.\Delta I_S^*) = m.\mathrm{Im}(Z_{1L}.I_S.\Delta I_S^*) + R_f.\mathrm{Im}(\frac{1}{d_s}) \quad \text{(II.27)}$$

Si le système est homogène, l'angle du facteur courant de distribution est presque nul ($\mathrm{Im}(1/d_s)=0$), la distance au défaut est :

$$m = \frac{\mathrm{Im}(V_S.\Delta I_S^*)}{\mathrm{Im}(Z_L.I_S.\Delta I_S^*)} \quad \text{(II.28)}$$

• ***Pour un défaut monophasé à la terre*** (phase « a ») le calcul sera comme suit :

$$I_S = I_{Sa} + k_0.I_R \quad \text{(II.29)}$$

Où:

$$I_R = 3.I_0 = I_a+I_b+I_c \quad \text{(II.30)}$$

$$k_0 = \frac{Z_{0L} - Z_{1L}}{Z_{1L}} \quad \text{(II.31)}$$

$$m = \frac{\mathrm{Im}(V_S . \Delta I_S^*)}{\mathrm{Im}(Z_{1L} . I_S . \Delta I_S^*)} \quad \text{(II.32)}$$

• ***Pour un défaut biphasé:***

$$m = \frac{\mathrm{Im}(V_{Sab} . \Delta I_S^*)}{\mathrm{Im}(Z_{1L} . I_{Sab} . \Delta I_S^*)} \quad \text{(II.33)}$$

• ***Pour un défaut triphasé*:**

$$m = \frac{\mathrm{Im}(V_{Sabc} . \Delta I_S^*)}{\mathrm{Im}(Z_{1L} . I_{Sabc} . \Delta I_S^*)} \quad \text{(II.34)}$$

II.6)-Protection :

Les lignes de transport de l'électricité sont principalement protégées par des protections de distance, parfois aussi appelés protection à minimum d'impédance associées à des protections différentielles lignes.

II.6.1)-Protection différentielle [21]:

Ce type de relais est, généralement, basé sur la mesure de la différence géométrique de deux courants.

II.6.1.1)- Protection différentielle longitudinale *:*

Appeler aussi; Protection différentielle à courant circulaire. Elle utilise le principe de comparaison des courants d'entrée et de sortie de l'élément à protéger; dans notre cas la ligne de transport.

Pour effectuer cette protection, on installe des deux côtés de la ligne des transformateurs de courant (TC) dont on fait la connexion de leurs enroulements de tel sorte que les courant secondaires $\boldsymbol{I_A}$ et $\boldsymbol{I_B}$ soient égaux et coïncident en phase **Figure (II.4**).

Lors du régime normal et des courts-circuits extérieurs, le courant déséquilibré $\boldsymbol{I_{dés}}$circulera à travers l'enroulement du relais est:

$$\boldsymbol{I_{dés} = I_A - I_B = I_{Relais}} \quad \text{(II.35)}$$

Dans ce cas, la protection ne doit pas fonctionner car le seuil de fonctionnement $\boldsymbol{(I_F)}$ est choisi pour qu'il soit supérieur au courant déséquilibré.

Ce courant de déséquilibre est lié, pratiquement, à la fabrication des transformateurs de mesure ; car on ne peut jamais trouver deux transformateurs identiques. Il est aussi augmenté par le courant résiduel$\boldsymbol{I_R}$.

Quand un court-circuit se produit dans la ligne à protéger, le point de défaut sera alimenté par les deux cotés, donc, l'un des deux courants mesurer par les transformateurs du courant a changé de direction, et par conséquent, le relais sera traversé par la somme vectorielle des deux courants.

$$I_{Relais} = I_A + I_B > I_F$$

La protection fonctionne en envoyant le signal de déclenchement aux disjoncteurs.

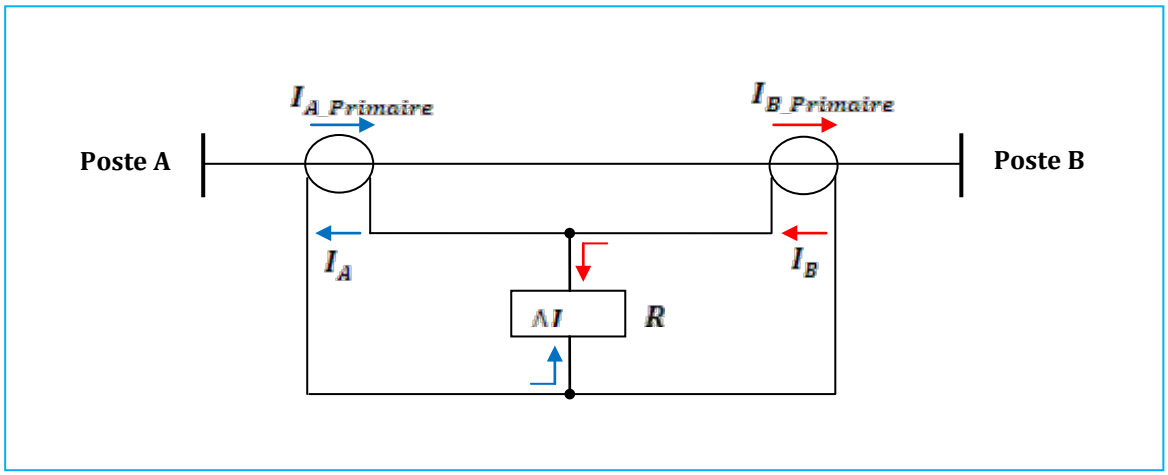


Figure (II.4) : Protections différentielles longitudinale d'une ligne à 2 extrémités.

II.6.1.2)- Protection différentielle transversale équilibrée :

Afin d'assurer la continuité de service, et de permettre un transit des puissances élevées, on utilise des lignes en parallèle. Elles sont, le plus souvent, protégées par la protection différentielle transversale.

On y relève que le relais RA ou RB de la protection transversale **Figure (II.5**) est bien traversé par la différence géométrique $I_1 - I_2$ des courant des lignes 1 et 2.

L'existence de ce courant différentiel constitue le critère de l'existence d'un court circuit sur la phase correspondante de l'une des deux lignes protégées mais il n'indique pas la quelle. Afin de profiter de la présence des disjoncteurs généralement placés à chaque extrémité de ligne, et pour n'éliminer que la ligne qui est le siège du défaut, il est nécessaire de compléter la protection par un canal de communication.

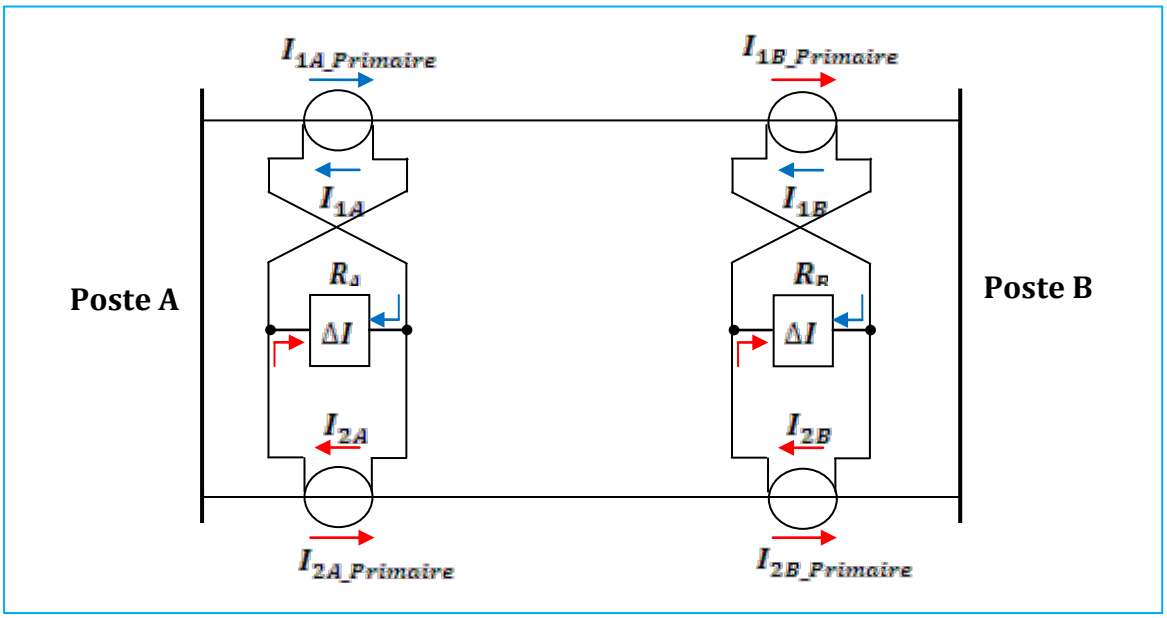


Figure (II.5) : Protections différentielles transversale de 2 lignes en parallèle.

Pour disposer à l'endroit où l'on effectue la comparaison, des deux grandeurs représentant les courants, une liaison pilote est nécessaire ; c'est la raison pour laquelle ce système de protection n'est guère utilisé que pour des câbles reliant deux postes d'une même ville ou d'une même zone industrielle, C'est un inconvénient de cette protection car les émetteurs d'envoi et de réception sont relativement chers; toutefois, il n'y a pas d'inconvénient de l'appliquer à des postes aériennes, à condition qu'elles soient courtes.

La protection différentielle est caractérisée par le fonctionnement rapide et la haute sensibilité aux défauts internes sans qu'elle soit sensible à l'instabilité de la tension et les oscillations de puissance. Elle est, essentiellement, utilisée pour la protection des transformateurs de puissance, des moteurs industriels et des générateurs.

II.6.2)- Protection de distance [14]:

II.6.2.1)- Principe de base :

Une protection de distance a la capacité de détecter un défaut à une distance prédéfinie sur une ligne de transmission ou un câble d'alimentation depuis son emplacement.

Chaque ligne électrique a une résistance et une réactance par kilomètre en fonction de sa conception et de sa construction ; ainsi, son impédance totale sera une fonction de longueur ou de la distance. Une protection de distance observe donc le courant et la tension et compare ces deux quantités en s'appuyant sur la loi d'Ohm **Figure (II.6).**

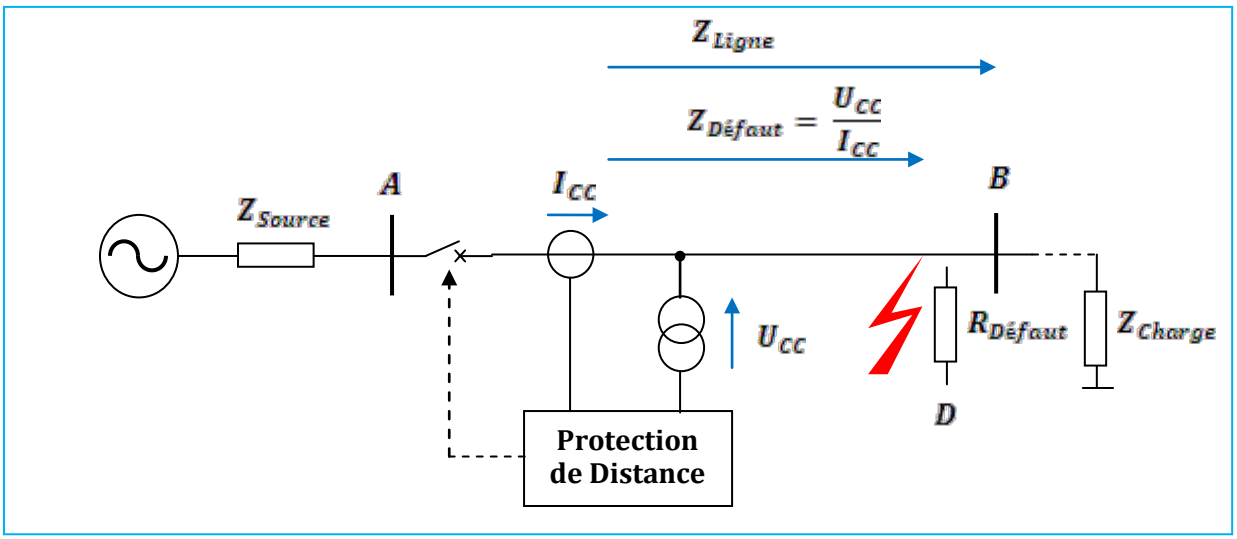


Figure (II.6) : Principe de base du fonctionnement.

II.6.2.2)- Diagramme d'impédance :

Le diagramme d'impédance est un outil essentiel pour l'évaluation du comportement de la protection de distance. Dans ce diagramme la caractéristique du relais et la charge mesurée et l'impédance de court-circuit sont représentés dans le plan complexe R/X plane **Figure (II.7**). Pendant le fonctionnement normal du système, l'impédance mesurée correspond à l'impédance de charge. Sa grandeur est inversement proportionnelle à la quantité de charge transitée.

$$Z_{charge} = \frac{U^2_{Ligne}}{P_{charge}} \qquad \text{(II.37)}$$

L'angle entre le courant et la tension correspond à l'angle de charge φ_{Charge} **Figure (II.7**). Elle est dépendante du rapport entre la puissance active et réactive.

$$\varphi_{Charge} = Atan\left[\frac{Q}{P}\right] \qquad \text{(II.38)}$$

Après apparition d'un défaut l'impédance mesurée passe à l'impédance de court-circuit $Z_{Défaut}$, ce qui est généralement plus petit à l'impédance de charge Z_{Charge}. Sa valeur correspond à l'impédance de la ligne entre l'emplacement de relais et la localisation de défauts.

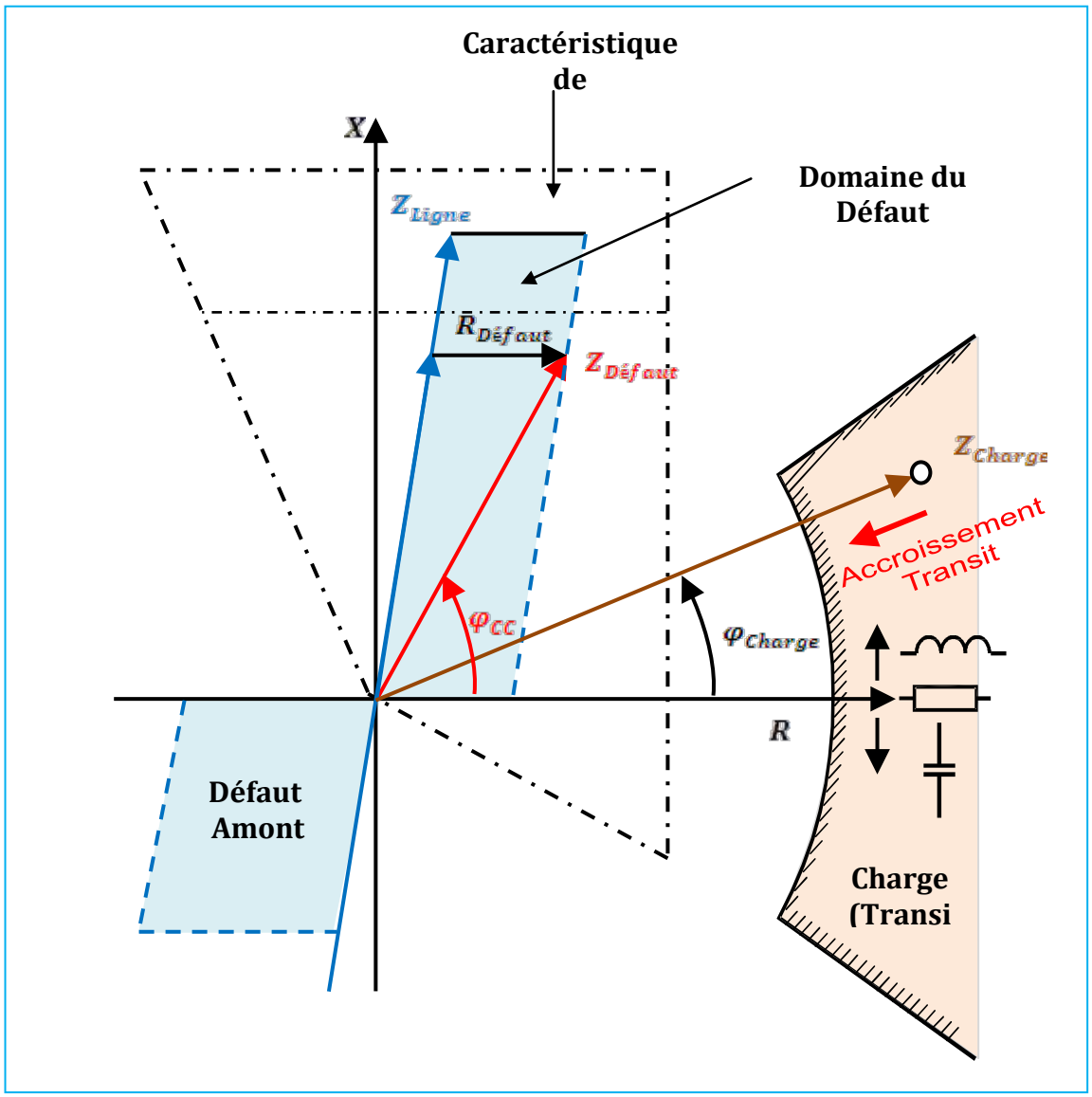


Figure (II.7) : Impédance de court-circuit et de charge (transit).

II.6.2.3)- Caractéristiques des relais de distance :

La protection de distance tente de faire la distinction entre impédance de défaut et impédance de charge. Il faut donc définir, une limite, une frontière entre les impédances que la protection va considérer comme normales, de charge et celles anormales associées à un défaut. Cette limite est appelée ici caractéristique de déclenchement. Elles peuvent avoir plusieurs formes et sont représentées dans un plan R/X.

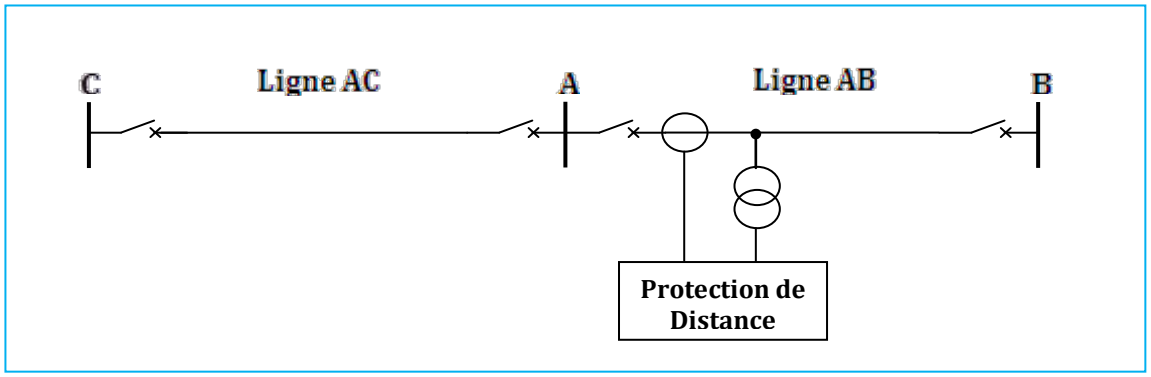


Figure (II.8) : Protection de Distance.

Les relais numériques peuvent utilisés n'importe quelle caractéristique, il suffit de la programmer. Par contre les relais statiques ou électromécaniques ont une caractéristique liée de leur principe de fonctionnement.

II.6.2.4)- L'application de la zone de protection dans les relais de distance *:*

Une coordination correcte des relais de distances est obtenue grâce à la présence d'une Zone 1 de protection directionnelle instantanée et d'une ou deux zones à protection différée. Une ligne de transmission à une résistance et une réactance proportionnelles à sa longueur qui également son propre angle caractéristique. Elle peut donc être représentée comme ci-dessous dans un diagramme R/X.

II.6.2.4.1)- Zone 1 *:*

Une caractéristique de relais a également été ajoutée, à partir de laquelle on notera que la portée de l'élément de mesure a été définie à approximativement 80% de la longueur de la ligne **Figure (II.9**). Cette portée a été choisie pour éviter un débordement dans la section suivante de la ligne et garantir une sélectivité stable pour les raison suivantes :

- Il n'est pas pratique de mesurer avec précision l'impédance d'une ligne de transmission qui peut être très longue (disons 100 km) ; des longueurs témoin sont normalement utilisées qui peuvent entrainer des erreurs jusqu'à 10 % ;
- Des erreurs sont également présentes dans les transformateurs de courant et de tension, non sans oublier de mentionner les performances transitoires possibles de ces appareils ;
- Il existe des tolérances de fabrication concernant la précision de la mesure des relais, etc

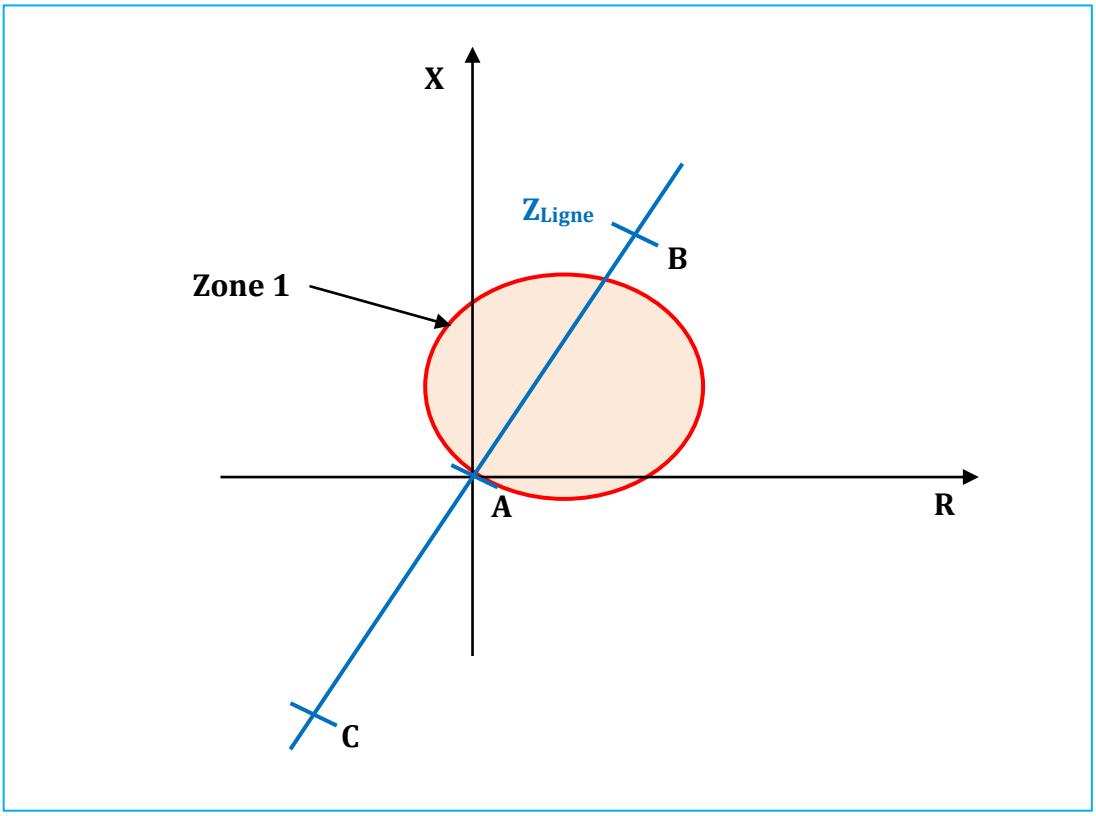


Figure (II.9) : Caractéristique des la Zone 1 Mho.

Cet élément de mesure, connu sous le no, de zone 1 du relais distant, est instantanément en fonction.

II.6.2.4.2)-Zone 2 *:*

Pour couvrir les 20 restants de la ligne, un second élément de mesure peut être ajoute et défini pour dépasser la ligne à condition d'être temporisé d'environ 0,5 s pour fournir la nécessaire coordination avec le relais aval. Cet élément de mesure est appelé zone 2. Non seulement il couvre les 20 % restants de la ligne, mais il offre aussi un moyen de secours pour la prochaine section de la ligne dans le cas ou un déclenchement échouerait pour quelque raison que ce soit.

II.6.2.4.3)- Zone 3 :

Une troisième zone est invariablement ajoutée comme élément de démarrage et elle prend la forme d'une caractéristique Mho (1mho=1 Siemens=1) de décalage. Ce décalage fournit une fonctionnalité de fermeture sur défaillance, car les éléments Mho peuvent ne pas fonctionner dans ces conditions en raison d'un effondrement complet de la tension pour la défaillance voisine.

La courte portée arrière offre aussi un secours localise lors d'une défaillance de barre omnibus. Cet élément peut également être utilisé pour lancer un signal modulé à l'autre extrémité de la ligne.

L'élément zone 3 possède également une fonction très utile. Comme démarreur, il peut être utilisé pour commuter l'élément zone 1 en zone 2, intervenir après disons 0.5 s, et, de ce fait, réduire les coûts en faisant économiser l'installation d'un second élément de mesure zone 2 **Figure (II.10**).

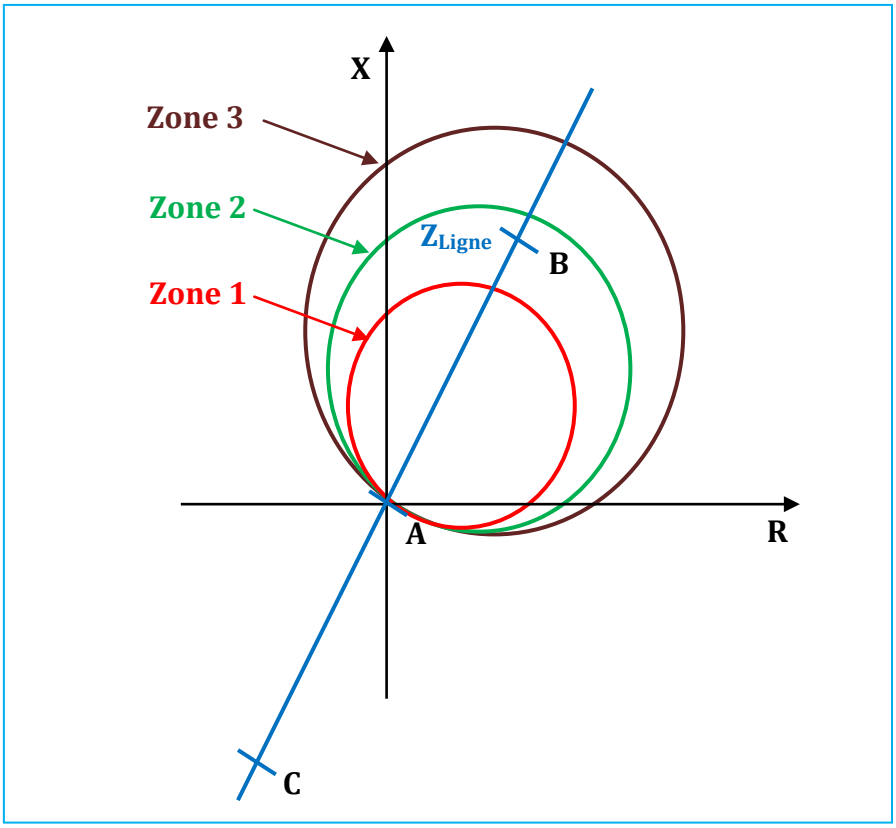


Figure (II.10) : Caractéristique des trois Zones Mho.

II.3)-Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons cité les différentes méthodes utilisées dans l'analyse des défauts sur les lignes de transport d'énergie électrique, puis les techniques utilisées dans la détection, classification et localisation des défauts à l'aide des équations mathématiques est enfin nous terminant cette chapitre par une bref description des technique utilisé dans la protection des lignes électriques.

Chapitre III : Les Relais Numériques.

III.1)- Introduction :

Tout réseau nécessite d'être protégé (surtension, surintensité, court-circuit, mise à la terre, est…). Cette fonction est assurée par un ensemble d'appareillages, localisées dans les postes :

1) Les transformateurs de mesure (tension et courant) fournissant les tensions (phase-neutre) et courant de chaque phase ainsi que le courant dans le neutre éventuellement. Ils ramènent les valeurs courant et tension des valeurs nominales (quelques dizines ou centraines de KV et d'ampères) à des valeurs conventionnelles (110Vp.e. et 5A) qui peuvent alimenter directement le relais. Ce traitement pourrait changer dans le futur avec l'avènement des transformateurs ≪ $optiques$ ≫ qui donnerait l'information directement digitalisée.
2) Les relais de protection
3) Les disjoncteurs

Un relais de protection détecte de condition anormale par la surveillance continue, détermine quel disjoncteurs et énergisé les circuits déclenchement.

III.2)-Types des relais [22] [23] [24] :

L'application des relais de protection dans les systèmes d'alimentation remonte il ya presque 100 ans. Depuis lors, la technologie utilisée pour construire les relais a amélioré spectaculairement la taille, le poids, le cout et la fonctionnalité. Basé sur la technologie utilisée pour construction, les relais peuvent être chronologiquement classifié comme électromécanique, statiques ou a semi-conducteur et numérique**.**

III.2.1)- Relais électromécaniques :

Ces relais sont basés sur le principe d'un disque d'induction actionné par des bobines alimentées par des variables électriques du réseau via des transformateurs de courant et de tension. Un ressort de rappel réglable détermine la limite de l'action du disque sur un déclencheur (points de réglage).

Les équipements électromécaniques sont des assemblages de fonctions : détection de seuils et temporisation. Ils avaient l'avantage d'être robustes, de fonctionner sans

source d'énergie auxiliaire et d'être peu sensibles aux perturbations électromagnétiques. Ces relais se démarquent par leur solidité et leur grande fiabilité, pour cette raison, leur entretien est minime. Ils sont réputés pour leur fiabilité dans les environnements de travail les plus délicats.

Il est néanmoins souhaitable de les contrôler régulièrement, dont la périodicité d'inspection dépend des conditions d'exploitation.

Les inconvénients de ces dispositifs, qui demeurent néanmoins largement rencontrés, sont :

- Le risque d'être hors d'état de fonctionner entre deux périodes de maintenance.
- Le manque de précision, le dispositif étant sensible à son environnement et aux phénomènes d'usure.
- Il est aussi difficile d'obtenir des réglages adaptés aux faibles courants de défaut.
- Son coût de fabrication est élevé.
- Des performances insuffisantes et n'autorisent l'emploi que de fonctions élémentaires simples, en nombre limité et sans redondance.

A partir de ces inconvénients, ce type de relais de protection tend à disparaître à l'heure actuelle.

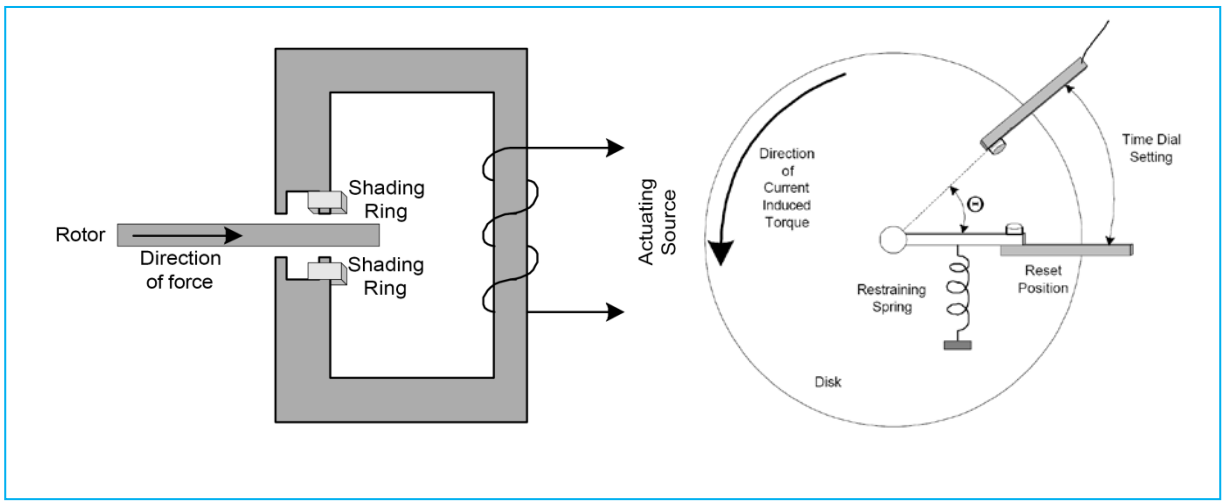


Figure (III.1) : Relais électromagnétique à induction par disque simple.

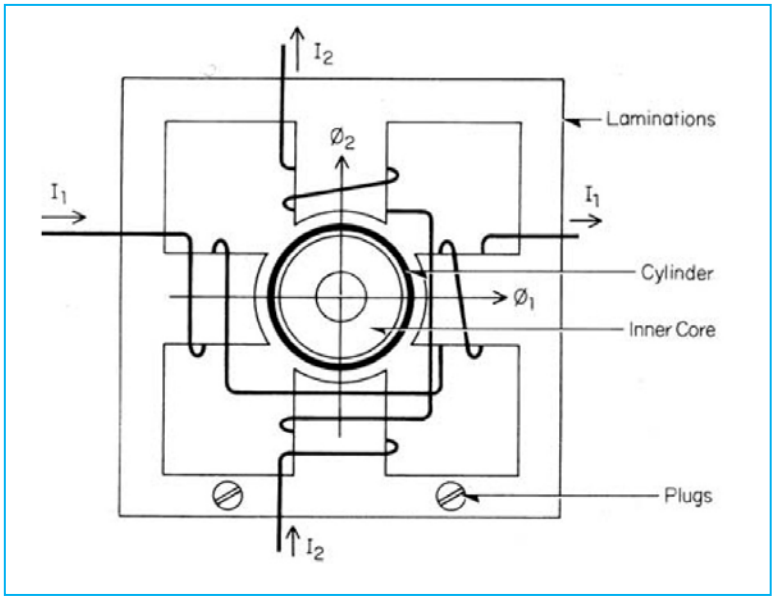


Figure (III.2) : Relais électromagnétique à induction par disque cylindrique.

III.2.2)- Relais statiques :

Le développement de l'électronique a poussé les protections vers l'utilisation des composants électroniques discrets et les relais statiques. Ces protections, apparues sur le marché dans les années 1970, sont basées sur le principe de la transformation de variables électriques du réseau, fournies par des transformateurs de courant et de tension, en signaux électriques de faible voltage qui sont comparés à des valeurs de référence (points de réglage).

Les circuits de comparaison fournissent des signaux de temporisation qui actionnent des relais de sortie à déclencheurs. Ces dispositifs nécessitent en général une source d'alimentation auxiliaire continue.

- Ils procurent une bonne précision et permettent la détection des faibles courants de défaut.
- Chaque unité opère comme une fonction unitaire et plusieurs fonctions sont nécessaires pour réaliser une fonction de protection complète.

Les inconvénients de ces dispositifs demeurent :

- Le risque d'être hors d'état de fonctionner entre deux périodes de tests,
- La grande puissance consommée en veille,
- La faible sécurité de fonctionnement (pas de fonction d'autocontrôle).

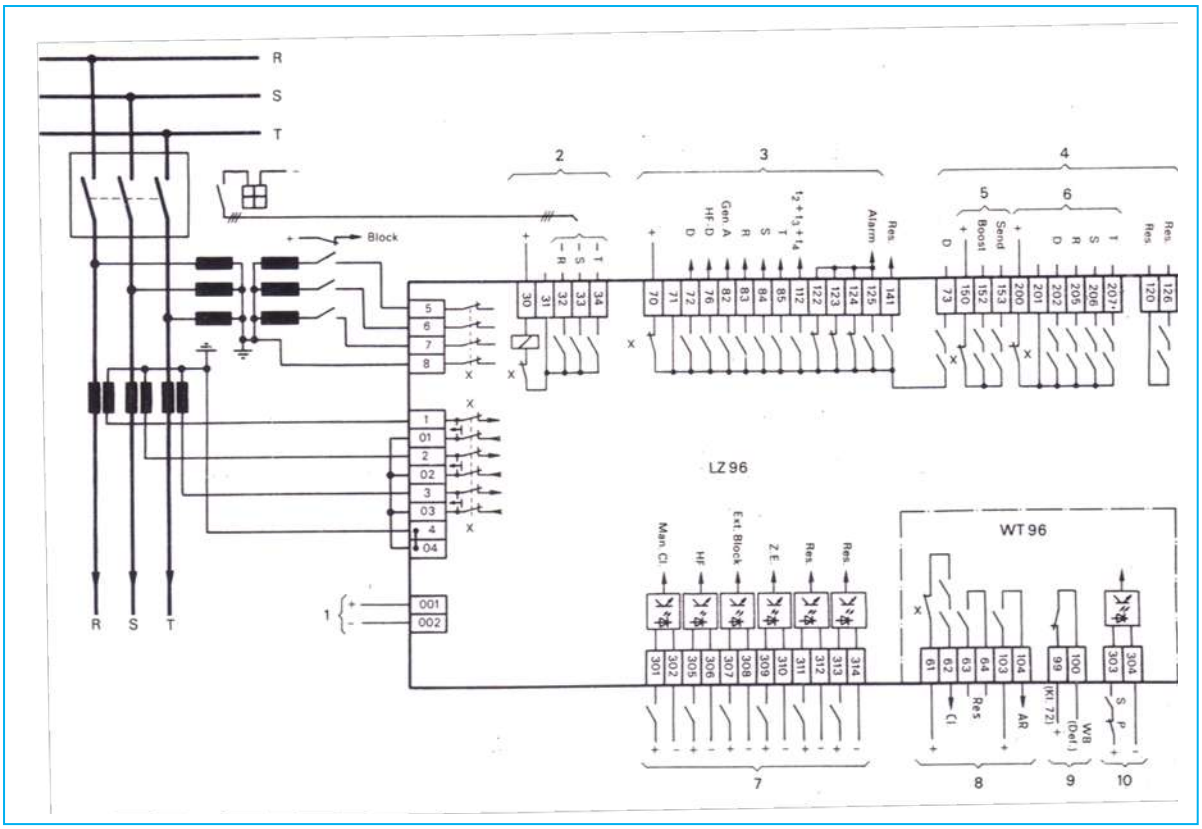


Figure (III.3) : Relais statique (Protection LZ96 – ABB).

III.2.3)-Relais numériques :

La technologie numérique a fait son apparition au début des années 1980. Avec le développement des microprocesseurs et des mémoires, les puces numériques ont été intégrées aux équipements de protection.

Les protections numériques, sont basées sur le principe de la transformation de variables électriques du réseau, fournies par des transformateurs de mesure, en signaux numériques de faible voltage. L'utilisation de techniques numériques de traitement du signal permet de décomposer le signal en vecteurs ce qui autorise un traitement de données via des algorithmes de protection en fonction de la protection désiré. En outre, ils sont équipés d'un écran d'affichage à cristaux liquides sur la face avant pour le paramétrage ou consultation local.

Ces dispositifs nécessitent une source auxiliaire, offrent un excellent niveau de précision et un haut niveau de sensibilité. Ils procurent de nouvelles possibilités, comme :

- Intégration de plusieurs fonctions pour réaliser une fonction de protection complète dans une même unité,
- Une faible consommation du courant,
- La possibilité d'auto surveillance,

- Le traitement et le stockage de données,
- L'enregistrement des perturbations du réseau (perturbographe),
- Le diagnostic des dispositifs connectés (disjoncteurs, ….etc.).

Ces modèles intègrent des possibilités d'autotest et d'autocontrôle qui augmente leur continuité de fonctionnement tout en réduisant la durée et la fréquence des opérations de maintenance. En plus des fonctions de protection, ces équipements disposent également de fonctions complémentaires facilitant leur fonctionnement. Les liaisons séries permettent de les paramétrer depuis un micro-ordinateur et de les connecter à un système de contrôle commande au niveau local et central. Ils permettent aussi de bénéficier des récentes découvertes dans le domaine de l'intelligence artificielle, comme les réseaux neuronaux et la logique floue.

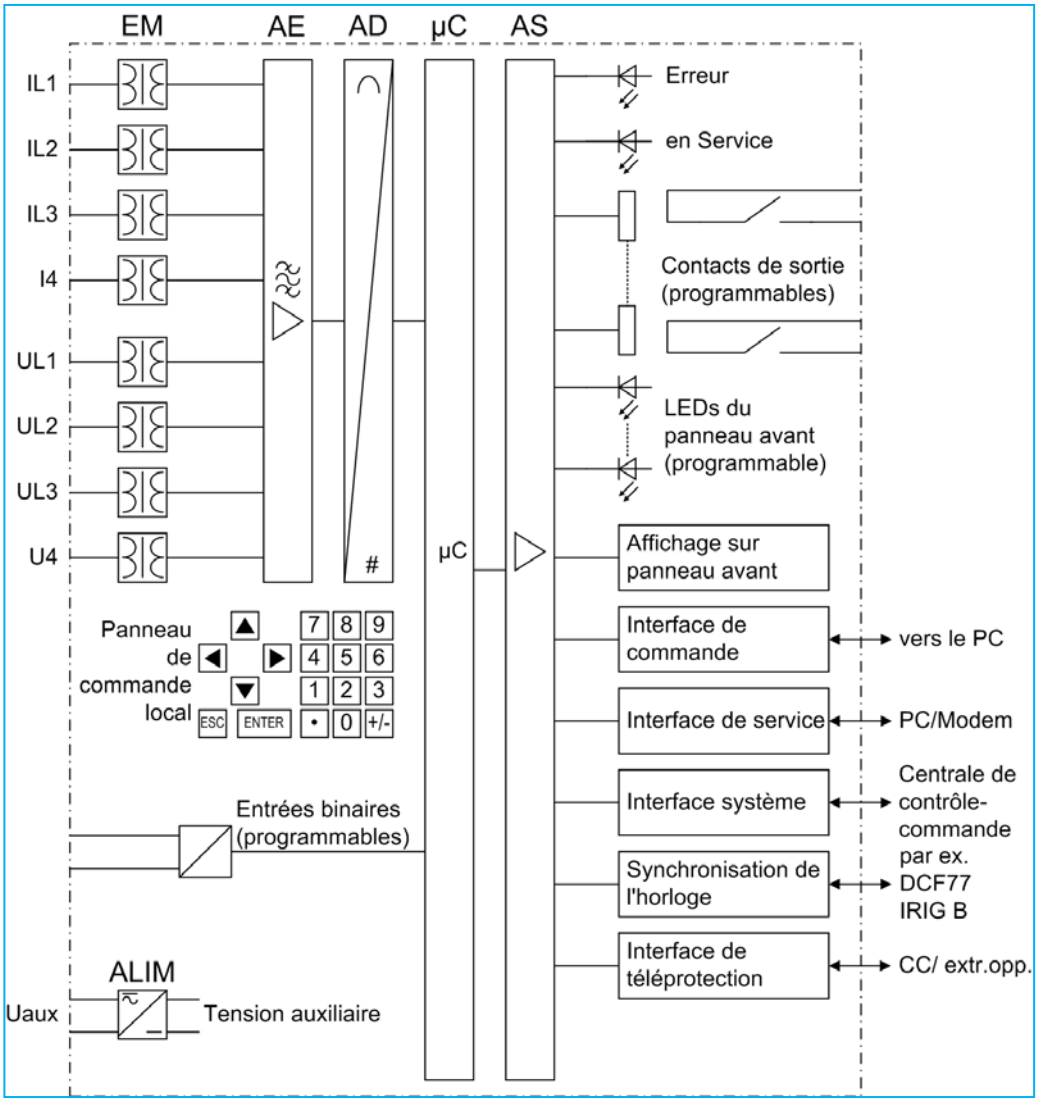


Figure III.4 : Relais numérique (Architecture de la Protection de Distance **7SA612 SIEMENS**).

III.3)- Schéma bloc d'un relais numérique [6]:

Le relais numérique est équipé d'un système à microprocesseur performant. Toutes les opérations effectuées par ce relais, telles que l'acquisition des valeurs de mesure et l'émission des commandes destinées aux disjoncteurs aux autres appareillages sont traitées de façon complètement numérique. Les modules et les fonctions constituent le relais numérique sont les suivants :

- Modules de mesure analogique (Module d'entrée analogique);
- Filtre anti-repliement analogique ;
- Multiplexeur ;
- Conversion analogique-numérique (CAN) ;
- Algorithmes d'évaluation des quantités des phases ;
- Microprocesseur ;
- Algorithme de relais et de logique de déclenchement.

Donc, le relais numérique est un ensemble de composants électroniques (filtre, CAN, microprocesseur, mémoire, interface…), la **Figure III.5** ci-dessous montre le schéma bloc d'un relais numérique.

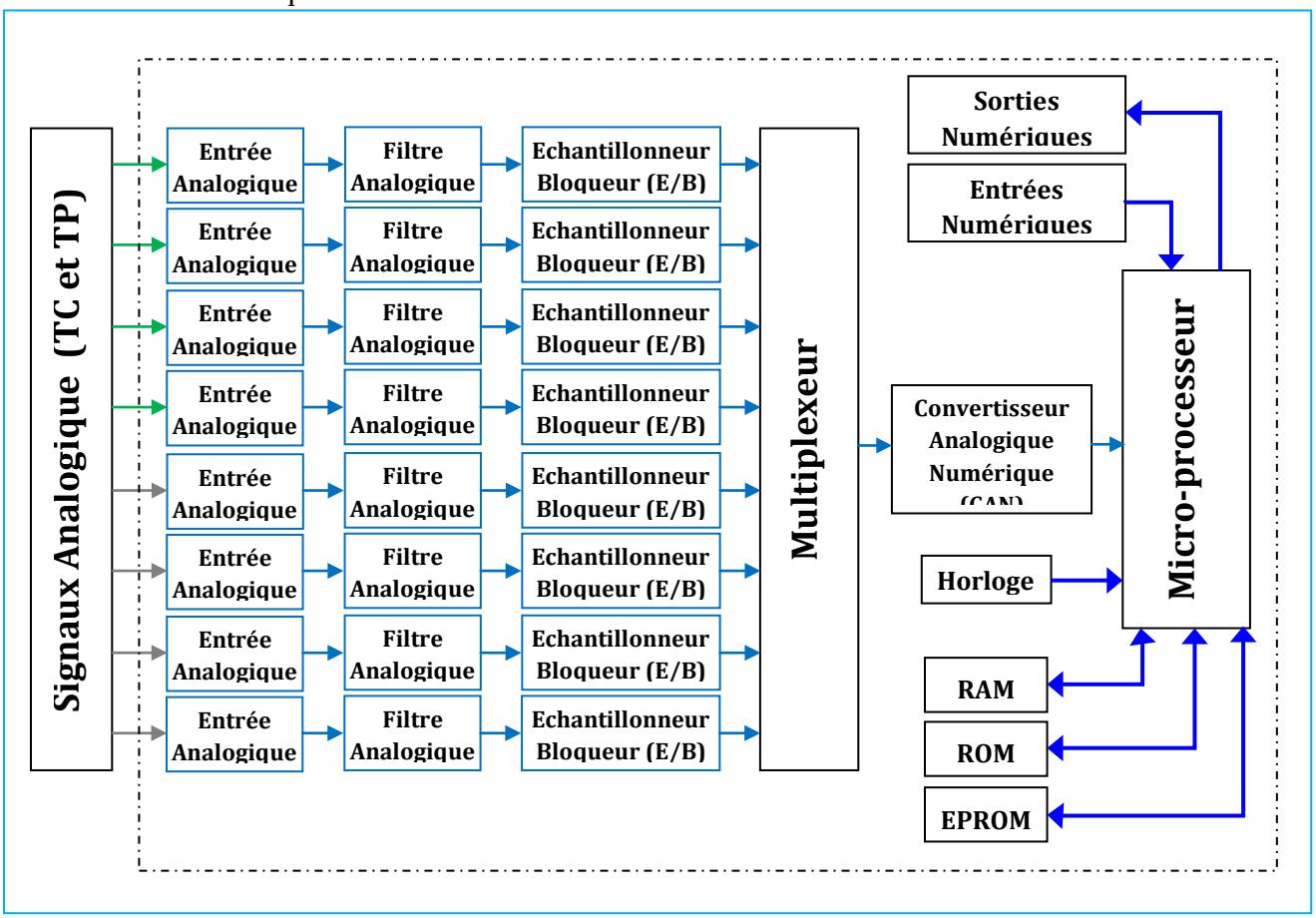


Figure III.5 : Elément de base d'un relais numérique

III.3.1)- Modules de mesure analogique :

Ces modules transforment les courants et les tensions issus des réducteurs de mesure de courant (TC) et de tension (TP) associés et les convertissent en fonction de niveau d'amplitude appropriés pour le traitement interne du relais. Etant donné que les convertisseurs analogique-numérique n'acceptent que des signaux de tension, ces modules convertissent également les courants à des tensions équivalentes.

III.3.1.1)-Module d'entré des Transformateurs de Tension [25]:

Dans la **Figure III.6** on a représenté un schéma de principe d'un module d'entrée et d'isolement analogique d'un signal de tension. La sortie d'un transformateur de tension (TP) est appliquée à un transformateur auxiliaire, qui réduit le niveau de tension et fournit une isolation électrique pour le reste de l'équipement de relais. A la sortie du transformateur de tension auxiliaire, la tension est en outre réduite par un potentiomètre à un niveau approprié pour une utilisation par le système d'acquisition de données. Une varistance à oxyde métallique (MOV) est utilisée à l'entrée du transformateur auxiliaire pour protéger le système d'acquisition de données de transitoires dans les signaux d'entrée.

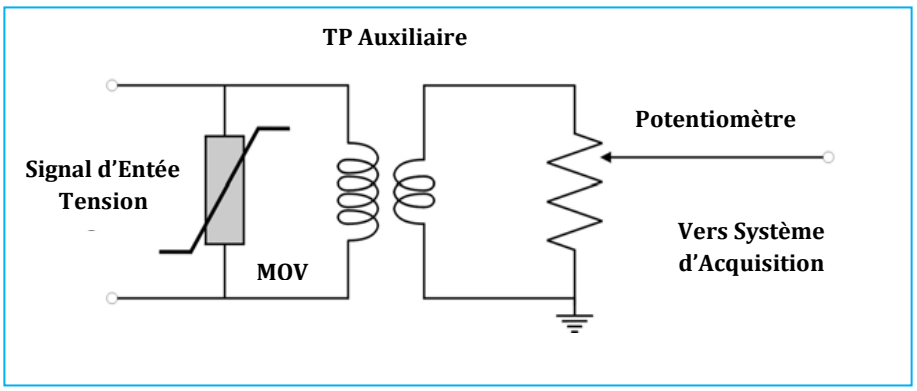


Figure (III.6) : Module d'entée et d'isolement de signal de Tension.

III.3.1.2)-Module d'entré des Transformateurs de Courant [25]:

La **Figure III.7** est représenté le circuit de mesure et d'isolement analogique utilisée pour le signal de courant d'entrée. Un courant d'un transformateur de courant (TC) est réduit à un niveau inférieur par un transformateur de courant auxiliaire. Le secondaire du transformateur de courant auxiliaire est transmis à une résistance pour convertir le courant en une tension équivalente.

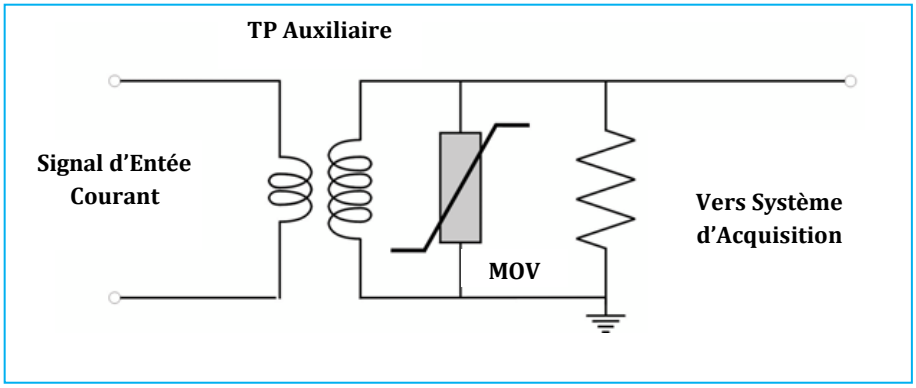


Figure (III.7) : Module de sortie et d'isolement de signal de Tension.

III.3.2)-Filtre anti-repliement [26] [27]:

Du aux limites pratique des taux d'échantillonnage dans un relais numérique, le convertisseur analogique numérique (CAN) est « aveugle » en dehors des moments ou il fait sa conversion. A la réception du top (impulsion) de l'horloge, le CAN effectue sa conversion quasi instantanément. Il y a donc perte de l'information contenue entre les impulsions .le repliement (aliasing) spectral, est un phénomène qui change l'identité d'un signale lorsqu'il est échantillonné à une fréquence trop faible.

Pour éviter l'apparition des fréquences de repliement, il faut respecter le principe de la conduite de **Shannon** disant qu'il faut au moins plus que deux échantillons sur une période pour décrire un signal pour ne pas perdre aucune information dans un signal, il suffit d'échantillonner à au moins $2f_{max}$, f_{max} étant la fréquence maximale dans le spectre d'amplitude .Pour ce faire les relais sont équipés de filtre anti-repliement qui sont des filtres passe-bas de très forte pente éliminant ainsi la partie haute fréquence des signaux qui perturberaient l'interprétation de l'analyse spectrale **Figure III.8**.

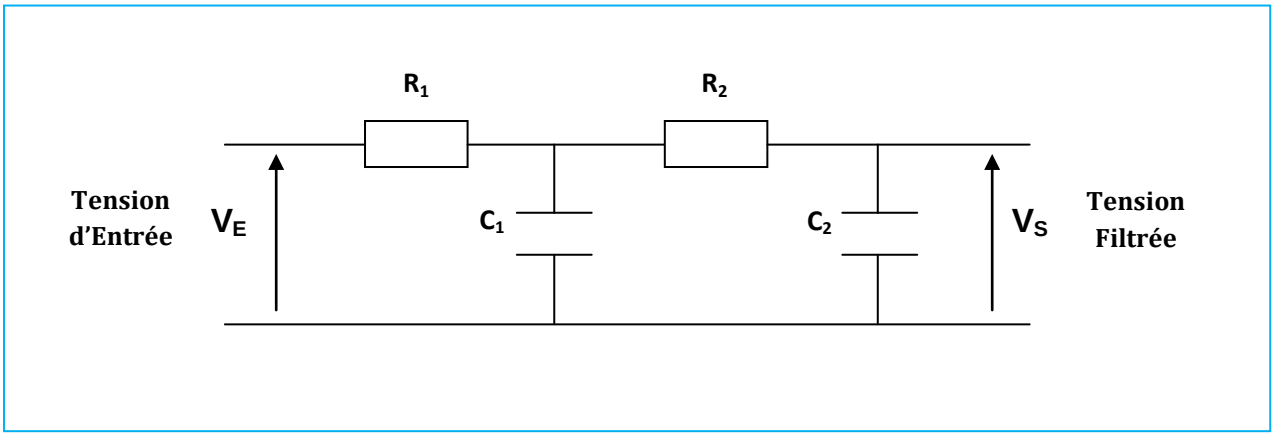


Figure (III.8) : Filtre anti-repliement analogique.

Les conséquences supérieures à la moitié de la fréquence d'échantillonnage doivent être supprimées. La présence d'un filtre analogique relié à la fréquence d'échantillonnage est donc indispensable à une mesure correcte .la fréquence de coupure du filtre anti-repliement doit être au plus égale à la moitié de la fréquence d'échantillonnage. En simulation, le filtre anti-repliement peut être modélisé par un filtre numérique de type Butterworth, Tchebychev ou Bessel.

On fait en général appel, dans le cadre d'un filtre anti-repliement, à un filtre du type Butterworth :

$$\boldsymbol{H(f)} = \frac{\mathbf{1}}{\sqrt{\mathbf{1}+(\boldsymbol{f}/\boldsymbol{f_0})^{\mathbf{2N}}}} \qquad \text{(III.1)}$$

D'où :

$\boldsymbol{N}$: Ordre de filtre ;

$\boldsymbol{f_0}$: La fréquence de coupure.

III.3.2.1)- Filtre de type Butterworth *:*

Un filtre de Butterworth est un très bon compromis, il assure une réponse plate avec un retard de groupe constant pour les fréquences inférieures à $\boldsymbol{f_C/2}$.

III.3.2.2)- Filtre de type Tchebychev *:*

Un filtre de Tchebychev donnera une atténuation rapide mais par contre on aura de l'ondulation dans la bande passante et un très mauvais retard de groupe.

III.3.2.3)-Filtre de type Bessel *:*

Un filtre dit de Bessel assurera un temps retard de groupe constant dans la bande passante, mais une atténuation lente.

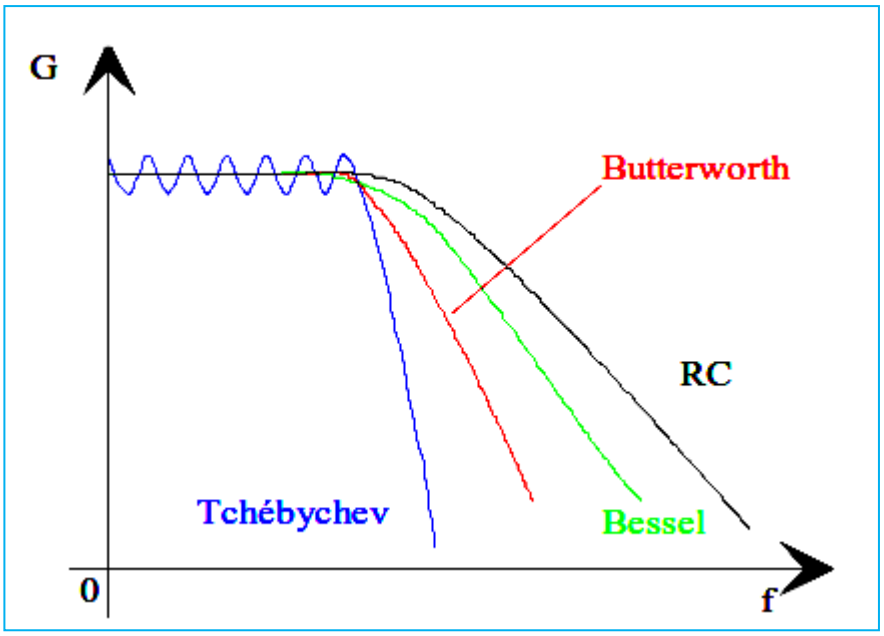


Figure (III.9) : Propriétés de différentes synthèses de filtre.

III.3.3)- Multiplexage :

Les convertisseurs (CAN) sont relativement chers, pour n'utiliser qu'un seul convertisseur on ferra appel à un multiplexeur. Le multiplexage est la technique permettant de faire passer plusieurs signaux analogiques sur un même circuit ou un même câble. Le multiplexage (temporel) consiste à deviser le temps, par exemple Chaque seconde, en petit intervalles, et à attribuer un intervalle de temps donné à chaque signal. Le multiplexeur est une sortie d'aiguillage. A chaque impulsion de l'horloge, il met successivement en contact pendant une durée très courte (qu'on peut en première approximation considérer comme nulle) le signal issue de chaque une des voies et le convertisseur. Le reste du temps c'est-à-dire pratiquement en permanence, il fonctionne comme un interrupteur ouvert, charge chaque une des voies sur l'impédance d'entrée du système d'acquisition, mais n'assurant aucune liaison physique entre les voies et le convertisseur **[26] [27].**

III.3.4)- Conversion Analogique-Numérique :

La conversion numérique d'un signale analogique consiste à prélever des échantillons de ce signal à des instants réguliers. Pour échantillonner un signal, on définit une durée, appelée période d'échantillonnage, qui est l'intervalle de temps entre deux valeurs

converties. Cette période doit être choisie suffisamment courte pour que l'échantillonnage soit significatif.

Elle ne doit pas non plus être exagérément petite, afin que la quantité d'informations ne soit pas trop importante le circuit assurant cette fonction est appelé échantillonneur/bloqueur (E/B), puisqu'il doit conserver (bloquer) pendant la période d'échantillonnage la valeur du signal d'entrée. A la sortie du E/B, le signale est encore analogique et continu en amplitude.

Il s'agit encore d'une tension (en volts) qui peut prendre des valeurs quelconques. Le signal est ensuite numérisé par le convertisseur analogique - numérique (CAN). A sa sortie, le signal est quantifié en temps et en amplitude. La quantification consiste à associer une suite binaire à chaque échantillon. Le signal n'est définit qu'aux instants d'échantillonnage. Le choix de la période d'échantillonnage est crucial : un sous échantillonnage détériora trop le signal d'entrée, alors qu'un sur échantillonnage va augmenter le volume de données à traiter.

La condition de **Shannon** fixe la limite inférieure absolue de la fréquence d'échantillonnage. Il montre que la fréquence d'échantillonnage doit être supérieure au double de la plus haute fréquence contenue dans le signal d'entrée afin de pouvoir reconstituer fidèlement le signal.

En générale, pour s'assurer de Cette condition, on applique un filtre passe-bas (filtre anti-repliement) avant l'échantillonnage du signal. **[26]**

III.3.4.1)-L’échantillonnage [27]:

La première phase d'une conversion analogique-numérique s'appelle l'échantillonnage. Cette phase est réalisée par le convertisseur analogique-numérique. L'échantillonnage consiste à transformer un signal analogique (continu) en signal numérique (discret) **Figure III.10**, en capturant des valeurs à intervalle de temps régulier. C'est une étape nécessaire pour pouvoir enregistrer, Analyser et traiter un signal par ordinateur, car celui-ci ne peut traiter que des nombres. L'échantillonnage est une étape nécessaire à la numérisation d'un signal.

La fréquence à laquelle les valeurs sont capturées est la fréquence d'échantillonnage, appelée aussi cadence d'échantillonnage, ou taux d'échantillonnage, exprimée en Hz.

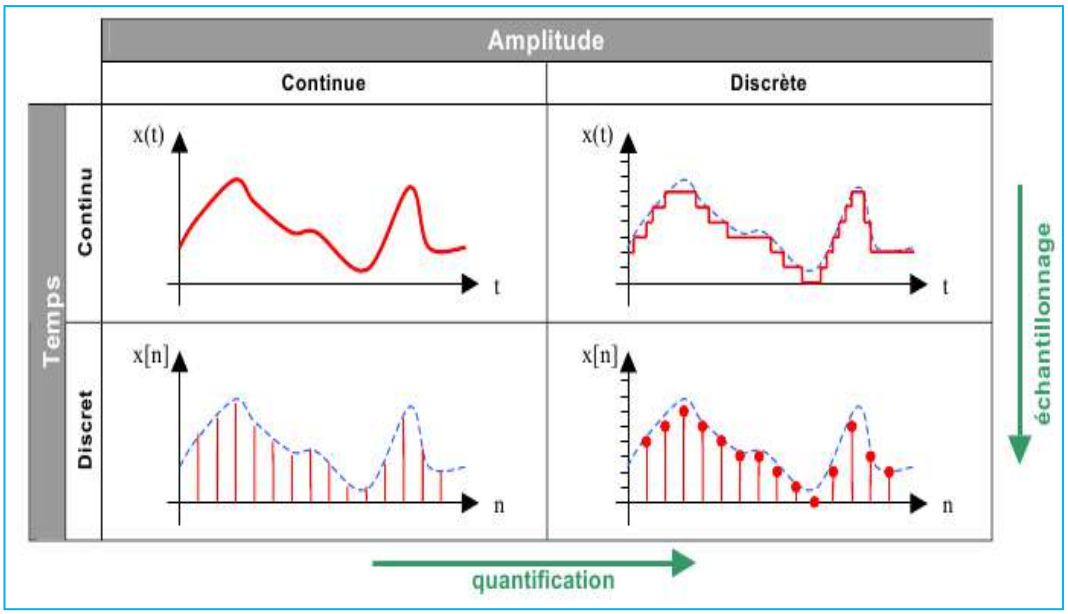


Figure (III.10) : Classification morphologique des signaux.

On obtient donc 4 classes de signaux :

- Les signaux analogiques : dont l'amplitude et le temps sont contenus.
- Les signaux quantifiés : dont l'amplitude est discrète et le temps continu.
- Les signaux échantillonnés : dont l'amplitude est continue et le temps discret.
- Les signaux numériques : dont l'amplitude et le temps sont discrets.

III.3.4.2)-Principe de l'échantillonneur bloqueur (E/B) [25]:

La fonction de base d'un échantillonneur bloqueur dans un système d'entrée analogique est de capter un signal d'entrée et le maintenir constant pendant le cycle de conversion CAN. La **Figure III.11** représente un circuit très simple d'un **E/B** est constitué d'un simple interrupteur **S** et un Condensateur $\mathbf{C_H}$. Lorsque l'interrupteur **S** est fermé, le condensateur se charge jusqu'à le niveau du signal d'entrée. Le condensateur conserve sa charge lorsque l'interrupteur est ouvert.

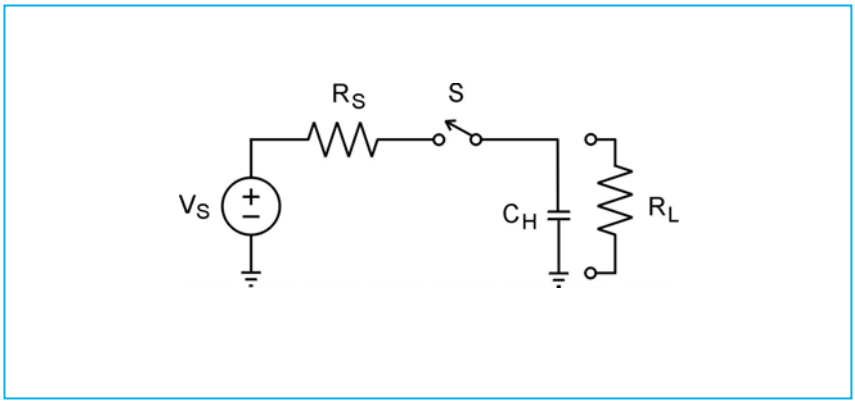


Figure (III.11) : Circuit d'Echantillonnage-Bloqueur simple

Le condensateur joue le rôle d'élément mémoire, l'interrupteur **S** est là pour réactualiser la valeur mémorisée ou bien l'isoler vis à vis de l'entrée.

La **Figure III.12** est représenté le fonctionnement d'un système E/B. Jusqu'à le temps $\mathbf{T_1}$: la tension de sortie $\mathbf{V_O}$ est en mode de blocage **($\mathbf{V_O}$ = Cste)**. Le temps d'acquisition $\mathbf{T_{AC}}$ est le temps nécessaire pour que la tension de sortie du circuit devenir égale à la tension d'entrée ($\mathbf{V_O = V_S}$). La sortie suit alors l'entrée jusqu'au le mode de blocage à $\mathbf{T_2}$. Le temps d'ouverture $\mathbf{T_{AP}}$, est le temps nécessaire pour que le circuit passer en mode de blocage. Pendant ce temps, le signal de sortie peut être modifié légèrement de la valeur à l'instant $\mathbf{T_2}$, une telle variation est appelée ouverture incertitude. **[25][28].**

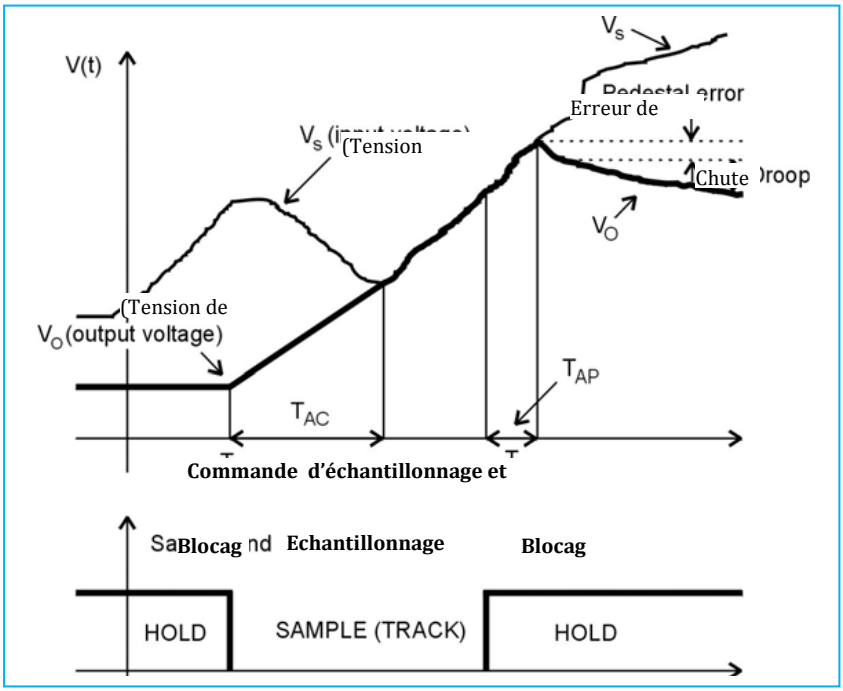


Figure III.12 : Le fonctionnement du circuit échantillonneur-bloqueur.

III.3.5)-Algorithmes d'évaluation des quantités des phases :

Les algorithmes sont des programmes utilisés dans les microprocesseurs qui manipulent les échantillons de tensions et des courants pour produire des paramètres nécessaires pour le fonctionnement du relais de protection numérique [25] [29].

Les performances de l'ensemble de ces algorithmes dépendent de l'obtention de l'estimation exacte de la composante de fréquence fondamentale d'un signal de quelques échantillons [30].

III.3.6)- Microprocesseur [26][27][31][32]:

Le microprocesseur est le cœur du relais numérique, c'est lui qui exécute le programme de l'algorithme choisi pour la détection ou la localisation des défauts. Il s'agit en particulier des tâches suivantes :

- Filtrage et préparation des grandeurs mesurées,
- Supervision continue des grandeurs mesurées,
- Supervision des conditions de mise en route pour les différentes fonctions de protection,
- Interrogation de seuils et de temporisations,
- Contrôle des signaux pour les fonctions logiques,
- Décisions relatives aux commandes de déclenchement et d'enclenchement,
- Enregistrement des signalisations, messages de défauts et enregistrements perturbographiques pour l'analyse des défauts,
- Gestion du système d'exploitation et des fonctions associées, comme par ex. l'enregistrement de données, l'horloge en temps réel, la communication, les interfaces, etc.

Les composants externes au microprocesseur sont les trois modules de mémoires différents qui sont :

- La mémoire RAM (Read Access Memory) qui est utilisée comme bloc-notes pour la mesure et le calcul des résultats, le stockage des valeurs mémorisées, etc.
- La mémoire ROM (Read Only Memory) qui renferme le programme de base du module.

- La mémoire EEPROM (Electrically Erasable Programmable Read Only Memory) qui est utilisée comme mémoire de stockage des paramètres, c'est-à-dire, de toutes les valeurs de configuration ou de réglage.

III.3.7)- Commande des organes de coupure [27] [31]:

Après la détection du défaut et identification de l'ouvrage atteint, la protection élabore un ordre de sortie qui sert à commander l'ouverture de disjoncteur associé à cet ouvrage dont les caractéristiques sont adaptées au courant de défaut à couper. L'énergie nécessaire au fonctionnement des protections et du disjoncteur est en générale fournie par des sources auxiliaires à courant continu.

III.4)- Conclusion :

Ce chapitre a donné une vision générale sur la technologie des relais, la présentation de son architecture et sa conception. Les fonctions d'un relais numérique ont été définies. On a cité Ces modules comprennent le module d'entrée de mesure analogique, le module de filtrage anti-repliement analogique, le module de conversion analogique-numérique, algorithmes d'évaluation des quantités des phases, le module de commandes des organes de coupure et le microprocesseur. Les concepts et les informations concernant chaque module de base ont été présents.

Chapitre IV : Localisation des défauts dans les lignes électriques HT à Double Circuit

IV.1. Introduction

En raison de la complexité croissante des réseaux électriques modernes, l'amélioration des fonctions de protection existantes et le développement des nouvelles fonctions ont beaucoup d'attention actuellement. Le but est d'augmenter la performance globale du système d'énergie électrique. Quelques années auparavant, les équipements de protection supplémentaire tels que les localisateurs de défauts avaient moins d'importance, en comparaison avec les protections principales, la protection de distance et la protection directionnelle dans les lignes de transport. De nos jours, ces dernières retiennent plus notre attention si l'on considère l'investissement considérable consenti à cet effet. C'est en raison des grands avantages de la localisation de défauts, qui réduit par conséquent les temps d'entretien et de restauration du réseau. À cette fin, différents algorithmes ont été développés pour obtenir une meilleure évaluation de la distance du défaut selon les données extraites d'une seule ou des deux extrémités de la ligne.[33]

Ces dernières années, plusieurs algorithmes de localisation de défauts utilisant les données synchronisées des deux extrémités de ligne ont été développés. Ces méthodes sont plus exactes que les méthodes à une seule extrémité. Elles sont capables de minimiser ou éliminer les effets de la résistance du défaut et l'influence de la source à l'autre extrémité. L'inconvénient principal est le fait que les données des deux extrémités de la ligne doivent être rassemblées à l'endroit du relais pour être analysé par un GPS (Global Positioning System). La localisation de défaut à deux extrémités est efficace et exige un moyen effectif d'acquisition de données par des appareils électroniques à chaque extrémité de la ligne et traiter ces données automatiquement. Les données rassemblées doivent être aussi au moins synchronisées avant que l'analyse soit exécutée [34, 35].

Dans ce chapitre nous allons présenter une méthode de localisation de l'endroit du défaut dans les lignes électriques à doubles circuits en utilisant les mesures synchronisées des deux extrémités de la ligne. Cette méthode est basée sur la modification de la méthode de l'impédance apparente en utilisant la transformation modale. Cette dernière est

essentiellement caractérisée par sa capacité de décomposer les équations couplées de la ligne de transport en des équations découplées. Ceci élimine considérablement les effets mutuels ayant pour une évaluation précise de la distance du défaut d'une façon franche.

IV.2)- Mesure des données des deux extrémités :

Le modèle du réseau de transport montré dans la figure IV.1 est appliqué pour développer les nouvelles méthodes pour l'évaluation de la distance du défaut en utilisant les mesures synchronisées des deux extrémités de la ligne double circuit à protéger.

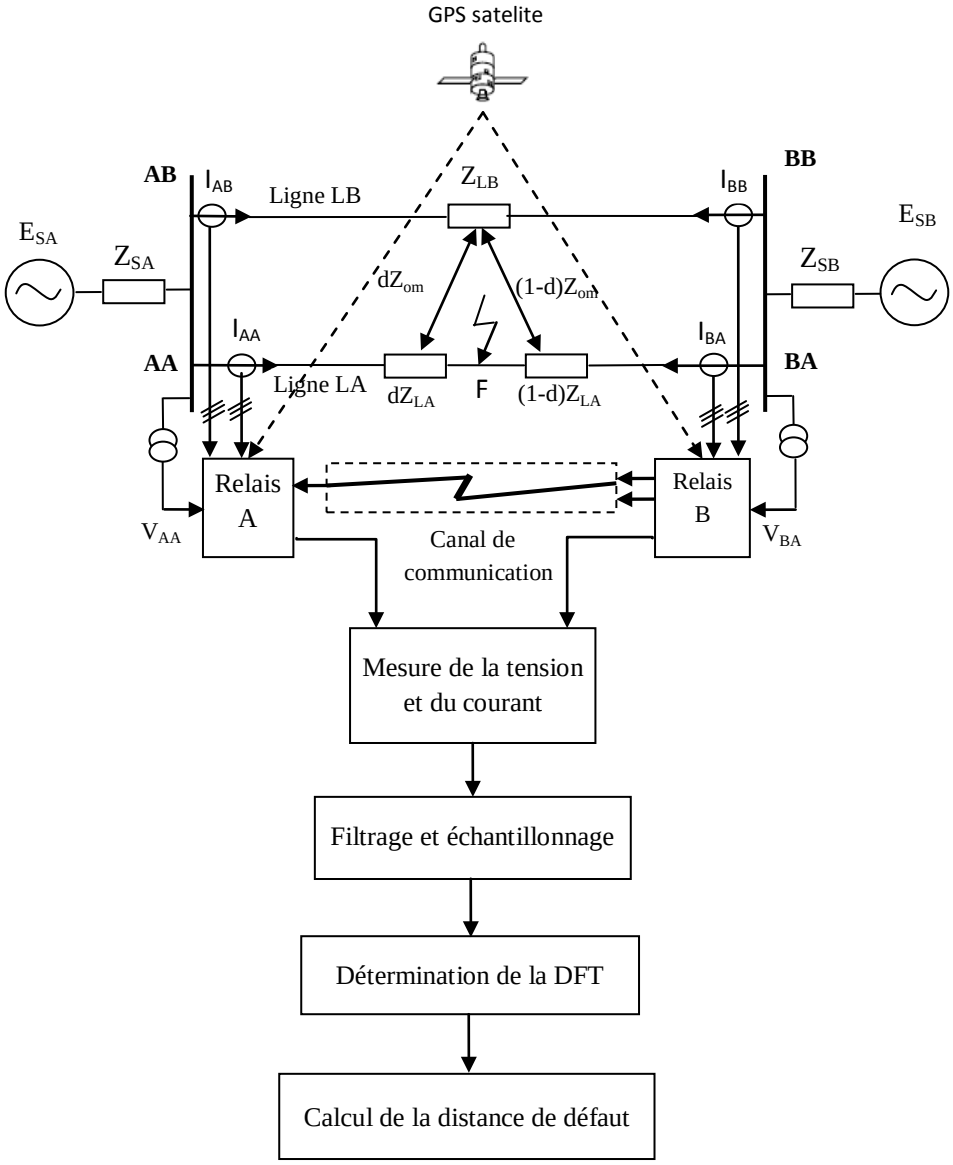


Figure (IV.1): Schéma représentatif du principe de l'algorithme de la localisation de défaut de la ligne à double circuit à protéger.

Ce modèle se compose de deux générateurs (E_{sA}, E_{sB}) et deux lignes de transport en parallèles (LA, LB) et deux jeux de barres A et B. Les bornes de la ligne sont dénotées par : AA, BA, AB et BB (le jeu de barres est marqué par la première lettre, alors que la ligne est marquée par la deuxième lettre). On considéré qu'un défaut se produit dans la ligne LA à la distance *d* et l'endroit de défaut *d* est évalué par le relais A (figure.VI.1). Le système GPS (Global Positioning System) est utilisé pour assurer la synchronisation des données entre les deux relais A et B.

Les algorithmes proposés pour la localisation de défauts utilisent les signaux tensions et courants des deux extrémités de la ligne de transport à protéger et exiger un bon système de communication pour réaliser la synchronisation. Une série de techniques de synchronisation pour l'acquisition de données ont été employés dans le passé comprenant [36-37]:

- Détermination de passage à zéro.
- Rotation des échantillons (pour des phasors).
- Référence précise de temps (IRIG-B et GPS).

Toutes ces techniques ont été démontrées dans le domaine. L'approche du GPS fournit la source de référence de temps la plus précise pour la synchronisation. La disponibilité de récepteurs GPS très performants pour la référence de temps précise rend le prélèvement synchronisé des données beaucoup plus facile [36].

Des quantités réelles mesurées par les relais peuvent être transmises à l'unité centrale de discrimination par l'intermédiaire d'un canal de communication à grande vitesse. Il y a plusieurs moyens de communication tels que fils pilote, voie de transmission à courant porteur , micro-onde et lignes à fibre optiques, etc., qui peuvent être employés pour transmettre les données. Par exemple, les réseaux de transmission à fibre optiques permettent à transmettre un grand volume de données (ordres de Mb/s) de point à point avec une fiabilité très élevée et un taux d'erreur inférieur [38], [39]. S'il y a un protocole approprié, les impacts de la voie de transmission sur la fiabilité et la sécurité de l'arrangement de protection sont encore réduits au minimum. Supposons qu'un canal à fibre optique spécialisé est disponible, le retard sera réduit sensiblement. Par conséquent, le transfert des données à grande vitesse peuvent être réalisés tels que le retard de transmission ajoutera seulement quelques millisecondes au temps de décision de déclenchement de l'arrangement proposé de protection.

IV.3)- Décomposition modale :

Afin d'appliquer la méthode décrite dans à la section précédente aux systèmes triphasés ; les signaux des phases sont décomposés dans leurs composants modaux au moyen de la transformation modale. Cette transformation est essentiellement caractérisée par sa capacité de décomposer un certain groupe d'équations couplées en équations découplées excluant les parties mutuelles contenues dans ces équations. Ceci peut être typiquement appliqué aux matrices d'impédances pour les conducteurs couplés. Comme indique la figure IV.2, les termes de l'impédance mutuelle Z_m sont disparus de la matrice d'impédance transformée ; dans lesquels seulement les quantités modales d'impédance Z_{m1}, Z_{m2} et Z_{m3} apparaissent et les autres éléments sont nuls. Ce découplage peut être un candidat idéal pour toutes les fonctions de protection qui sont basées sur l'évaluation de la distance de défaut comprenant la protection de distance et la localisation de défaut. [40- 41]

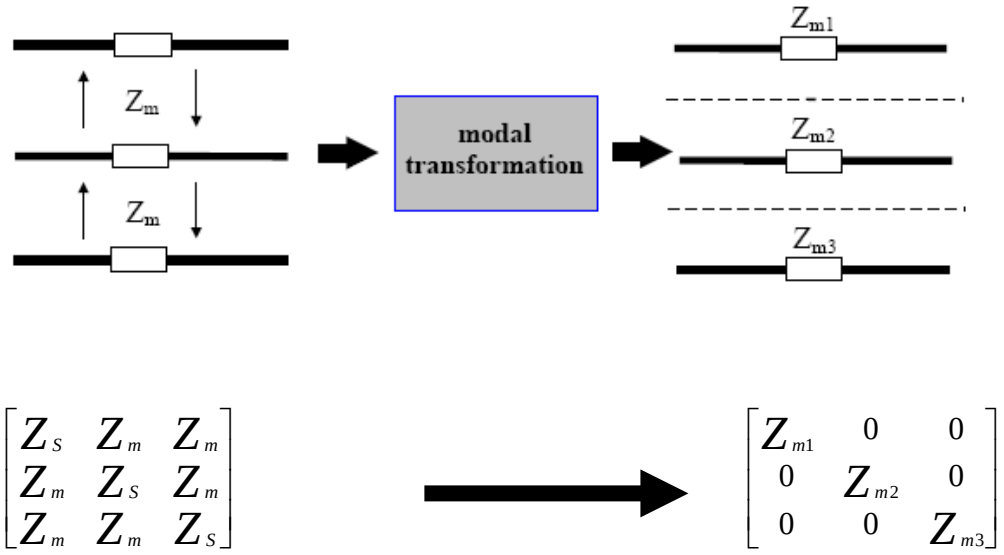


Figure (IV.2) : La transformation modale.

Pour les lignes polyphasées (également transposées) équilibrées, les matrices peuvent être facilement choisies telles que celle de Fortescue, Wedepohl, Karrenbauer, et la transformation de Clarke. La transformation Fortescue est employée ici pour transformer les échantillons tensions et courants en trois modes comme suit :

$$\begin{bmatrix} V_A \\ V_B \\ V_C \end{bmatrix} = T * \begin{bmatrix} V_1 \\ V_2 \\ V_3 \end{bmatrix} \quad , \quad \begin{bmatrix} I_A \\ I_B \\ I_C \end{bmatrix} = T * \begin{bmatrix} I_1 \\ I_2 \\ I_3 \end{bmatrix}$$

Avec

$$T = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ a^2 & a & 1 \\ a & a^2 & 1 \end{bmatrix} \qquad \text{(IV.1)}$$

Où :

$$a = \exp(j*2\pi/3)$$

IV.4)- Algorithme de localisation des défauts : Algorithme de Waikar [42-44]

IV.4.1)- Défaut monophasé :

Comme le montre la figure VI.3 un défaut monophasé est supposé se produire dans la ligne LA sur la phase *a* à travers une certaine résistance de défaut R_F. Le défaut s'est produit à une distance *d* un pourcentage de la longueur totale de la ligne LA. La procédure pour concevoir un algorithme d'évaluation de l'impédance de défaut pour la protection de distance est discutée dans cette section.

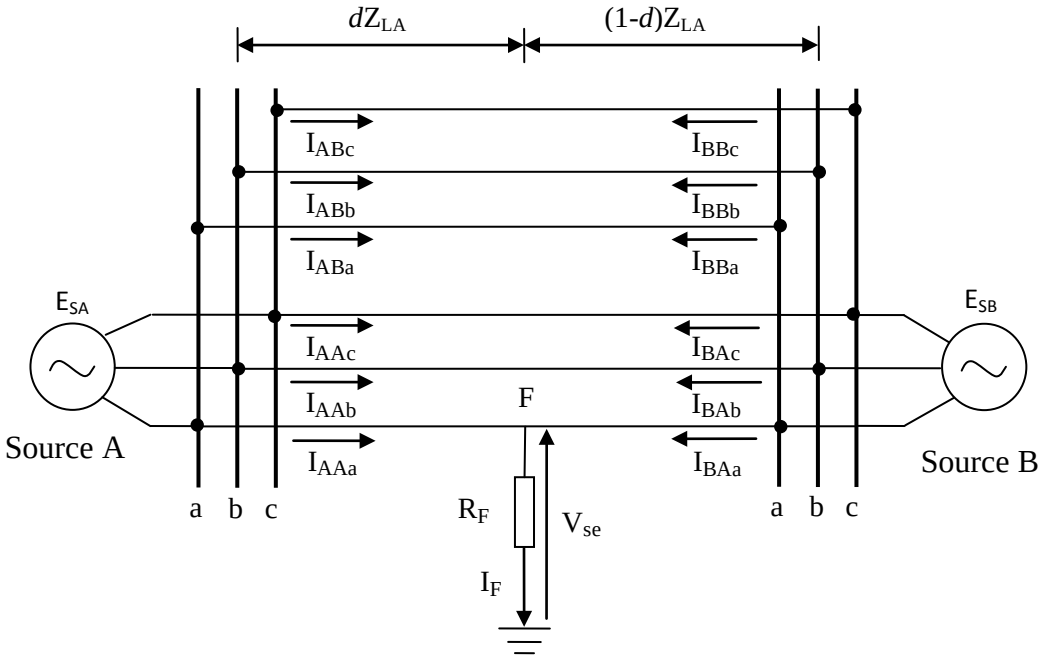


Figure (IV.3) : Défaut monophasé.

La figure VI.4 représente les circuits équivalents des composantes symétriques de la ligne à double circuit en défaut vu par le relais A situé au jeu de barres A.

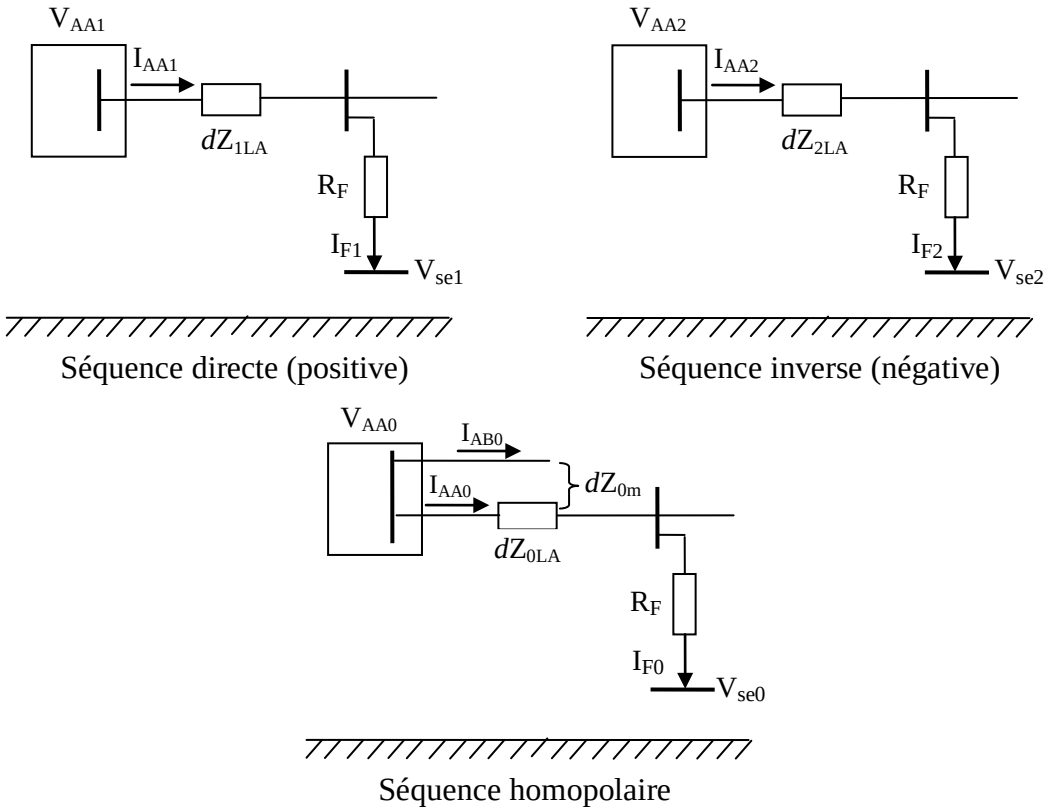


Figure (IV.4) : Circuit équivalent de la ligne à double circuit.

Pour dériver l'algorithme de localisation, if faut d'abord définir les signaux tensions au point de défaut qui sont exprimés en termes des composants symétriques des tensions et des courants mesurés respectivement.

Vu par le relais A situé au jeu de barres A les signaux tensions au point de défaut est définies comme suit :

$$V_{se1} = V_{AA1} - d(V_{RA1} + V'_{RA1}) - R_F I_{F1} \qquad \text{(IV.2)}$$

$$V_{se2} = V_{AA2} - dV_{RA2} - R_F I_{F2} \qquad \text{(IV.3)}$$

$$V_{se0} = V_{AA0} - dV_{RA0} - R_F I_{F0} \quad \text{(IV.4)}$$

Où :

$$V_{RA1} = \Delta I_{AA1} Z_{1LA} \quad \text{(IV.5)}$$

$$V_{RA2} = \Delta I_{AA2} Z_{1LA} \quad \text{(IV.6)}$$

$$V_{RA0} = \Delta I_{AA0} Z_{0LA} + I_{AB0} Z_{0m} \quad \text{(IV.7)}$$

$$V'_{RA1} = I'_{AA1} Z_{1LA} \quad \text{(IV.8)}$$

$$\Delta I_{AA1} = I_{AA1} - I'_{AA1} \quad \text{(IV.9)}$$

$$\Delta I_{AA2} = I_{AA2} - I'_{AA2} = I_{AA2} \quad \text{(IV.10)}$$

$$\Delta I_{AA0} = I_{AA0} - I'_{AA0} = I_{AA0} \quad \text{(IV.11)}$$

Là où l'indice prime (') indiquent les quantités de pré-défaut.

d : la distance inconnue du lieu de défaut.

Z_{1LA} : impédance directe de la ligne en défaut LA.

Z_{0LA} : impédance homopolaire de la ligne en défaut LA.

Z_{0m} : Impédance homopolaire mutuel entre la ligne LA et LB.

V_{AAi} , I_{AAi} : composantes symétriques des tensions et courants vu par le relais A situé au jeu de barres A

R_F : résistance du défaut.

I_{Fi} : composantes symétriques du courant total du défaut (i=0 : séquence homopolaire, i=1 : séquence directe, i=2 : séquence inverse).

Vu par le relais B situé au jeu de barres B les signaux tensions au point de défaut est définies comme suit :

$$V_{se1} = V_{BA1} - (1-d)(V_{RB1} + V'_{RB1}) - R_F I_{F1} \quad \text{(IV.12)}$$

$$V_{se2} = V_{BA2} - (1-d)V_{RB2} - R_F I_{F2} \quad \text{(IV.13)}$$

$$V_{se0} = V_{BA0} - (1-d)V_{RB0} - R_F I_{F0} \quad \text{(IV.14)}$$

Où :

$$V_{RB1} = \Delta I_{BA1} Z_{1LA} \quad \text{(IV.15)}$$

$$V_{RB2} = \Delta I_{BA2} Z_{1LA} \quad \text{(IV.16)}$$

$$V_{RB0} = \Delta I_{BA0} Z_{0LA} + I_{AB0} Z_{0m} \quad \text{(IV.17)}$$

$$V'_{RB1} = I'_{BA1} Z_{1LA} \quad \text{(IV.18)}$$

$$\Delta I_{BA1} = I_{BA1} - I'_{BA1} \quad \text{(IV.19)}$$

$$\Delta I_{BA2} = I_{BA2} - I'_{BA2} = I_{BA2} \quad \text{(IV.20)}$$

$$\Delta I_{AA0} = I_{BA0} - I'_{BA0} = I_{BA0} \quad \text{(IV.21)}$$

Où :

V_{BAi} , I_{BAi} : composantes symétriques des tensions et courants vu par le relais B situé au jeu de barres B.

L'équation (IV.2) - (IV.4) et (IV.12) - (IV.14) en plus des conditions représentant les dix shuntent défauts forment la base pour développer les équations de cette algorithme.
La condition pour le défaut monophasé entre la phase a et la terre est :

$$V_{se1} + V_{se2} + V_{se0} = 0 \quad \text{(IV.22)}$$

Substitution les équations (IV.2)-(IV.4) dans l'équation (IV.22), nous obtenons :

$$V_{AA1} + V_{AA2} + V_{AA0} - d\left\{\left(V_{RA1} + V'_{RA1}\right) + V_{RA2} + V_{RA0}\right\} = R_F I_{F1} + R_F I_{F2} + R_F I_{F0} \quad \text{(IV.23)}$$

Substitution les équations (IV.12)-(IV.14) dans l'équation (IV.23), nous obtenons :

$$V_{BA1} - \left(V_{RB1} + V'_{RB1}\right) + (V_{BA2} - V_{RB2}) + (V_{BA0} - V_{RB0}) + d\left\{\left(V_{RB1} + V'_{RB1}\right) + V_{RB2} + V_{RB0}\right\} = R_F I_{F1} + R_F I_{F2} + R_F I_{F0}$$

(IV.24)

En éliminant les termes contenant R_F dans les équations (IV.23) et (IV.24), *d* est obtenus comme suit :

$$d = \frac{\left\{V_{AA1}\text{-}V_{BA1} + \left(V_{RB1} + V'_{RB1}\right)\right\} + \left(V_{AA2}\text{-}V_{BA2} + V_{RB2}\right) + \left(V_{AA0}\text{-}V_{BA0} + V_{RB0}\right)}{\left\{\left(V_{RA1} + V'_{RA1}\right) + \left(V_{RB1} + V'_{RB1}\right)\right\} + \left(V_{RA2} + V_{RB2}\right) + \left(V_{RA0} + V_{RB0}\right)} \quad \text{(IV.25)}$$

IV.4.2)- Défauts biphasés avec terre

Comme le montre la figure IV.5 un défaut biphasé avec terre est supposé se produire dans la ligne LA entre la phase *a* et *b* à travers une certaine résistance de défaut R_F. Le défaut s'est produit à une distance *d* un pourcentage de la longueur totale de la ligne LA.

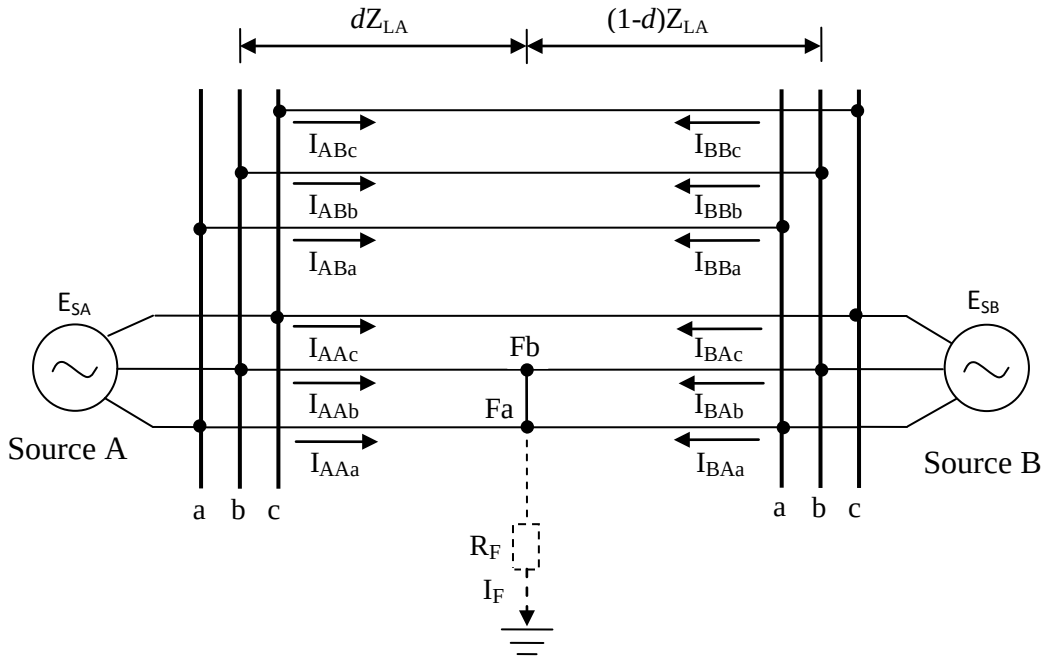


Figure (IV.5) : Défaut biphasé avec terre.

La contrainte dans ces conditions pour ce type de défaut est décrite comme suit:

$$aV_{se1} = a^2 V_{se2} = V_{se0} \quad \text{(IV.26)}$$

En examinant l'équation IV.26 on constate qu'il y a trois possibilités pour définir l'équation de localisation de défaut. Par exemple si en prend les deux premiers termes de l'équation IV.26 :

$$aV_{se1} = a^2 V_{se2} \quad \text{(IV.26.a)}$$

En utilisant les équations (IV.2), (IV.3), (IV.12) et (IV.13) on obtient :

$$a(V_{AA1} - d(V_{RA1} + V'_{RA1}) - R_F I_{F1}) = a^2(V_{AA2} - dV_{RA2} - R_F I_{F2}) \quad \text{(IV.27)}$$

$$a(V_{BA1}-(1-d)(V_{RB1}+V'_{RB1})-R_F I_{F1}) = a^2(V_{BA2}-(1-d)V_{RB2}-R_F I_{F2}) \quad \text{(IV.28)}$$

En éliminant les termes contenant R_F dans les équations (IV.27) et (IV.28), *d* est obtenus comme suit :

$$d = \frac{(V_{AA1}-V_{BA1})-a(V_{AA2}-V_{BA2})+\{(V_{RB1}+V'_{RB1})-aV_{RB2}\}}{\{(V_{RA1}+V'_{RA1})+(V_{RB1}+V'_{RB1})\}-a(V_{RA2}+V_{RB2})} \quad \text{(IV.29)}$$

IV.4.3)- Défauts triphasés

Comme le montre la figure IV.6 un défaut triphasé avec terre est supposé se produire dans la ligne LA entre la phase a, b et c à travers une certaine résistance de défaut R_F. Le défaut s'est produit à une distance *d* un pourcentage de la longueur totale de la ligne LA.

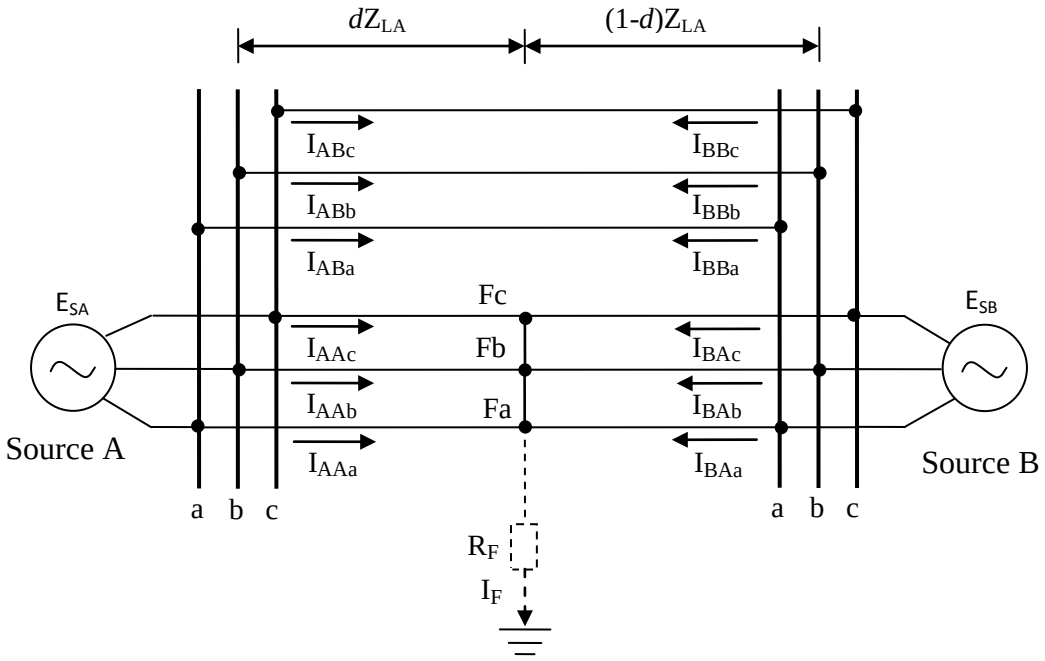


Figure (IV.6) : Défaut triphasé.

L'équation qui décrit ce cas de défaut peur être décrit comme suit:

$$V_{se1} = 0 \quad \text{(IV.30)}$$

Substitution les équations (IV.2) et (IV.12) dans l'équation (IV.30), nous obtenons :

$$V_{AA1} - d(V_{RA1}+V'_{RA1}) - R_F I_{F1} = 0 \quad \text{(IV.31)}$$

$$V_{BA1} - (1-d)(V_{RB1} + V'_{RB1}) - R_F I_{F1} = 0 \qquad \text{(IV.32)}$$

En éliminant les termes contenant R_F dans les équations (IV.31) et (IV.32) on obtient :

$$d = \frac{V_{AA1} - V_{BA1} + (V_{RB1} + V'_{RB1})}{(V_{RA1} + V'_{RA1}) + (V_{RB1} + V'_{RB1})} \qquad \text{(IV.33)}$$

IV.4.4)- Généralisation des équations de la localisation de défauts

Comme constaté dans le dernier paragraphe, une formule spéciale est dérivée pour chaque type de défaut. Cependant, il est plus approprié de réécrire l'algorithme proposé dans une forme générale pour tous les types de défauts. Ceci est plus pratique et plus utile spécialement dans un but de mise en application. L'équation (IV.34) représente l'équation générale du localisateur de défaut proposé.

$$d = \frac{s_1\{V_{AA1} - V_{BA1} + (V_{RB1} + V'_{RB1})\} + s_2(V_{AA2} - V_{BA2} + V_{RB2}) + s_0(V_{AA0} - V_{BA0} + V_{RB0})}{s_1\{(V_{RA1} + V'_{RA1}) + (V_{RB1} + V'_{RB1})\} + s_2(V_{RA2} + V_{RB2}) + s_0(V_{RA0} + V_{RB0})} \qquad \text{(IV.34)}$$

Cette équation est valable pour tous les types de défaut, où les constantes associées sont sélectionnées en fonction du type de défaut. Une solution à ces constantes est disponible sur le tableau IV.2.

Tableau (IV.2) : Table clé pour les constantes des équations.

Type du défaut	S_1	S_2	S_0
A-T	1	1	1
B-T	a^2	a	1
C-T	A	a^2	1
A-B	1	-a	0
A-C	A	-1	0
B-C	1	-1	0
A-B-T	1 0 a	-a a^2 0	0 -1 -1
A-C-T	a 0 a^2	-1 a 0	0 -1 -1
B-C-T	1 0 1	-1 1 0	0 -1 -1
A-B-C	1	0	0

IV.5)- Simulation

IV.5.1)- Réseau d'étude

Le programme de simulation MATLAB a été appliqué pour évaluer les performances de l'algorithme de calcul de l'impédance de défaut développé. Différents modèles des réseaux alimentés des deux extrémités ont été modélisés pour la génération de données de défaut utilisées dans le développement de notre algorithme. En particulier, le modèle représentée dans la figure IV.7. Ce modèle est composé de deux sources de 400 kV, une ligne de transmission à double circuit de 200 km.[45]

Une description générale du modèle de réseaux choisi pour la simulation est représentée dans la figure IV.7**.**

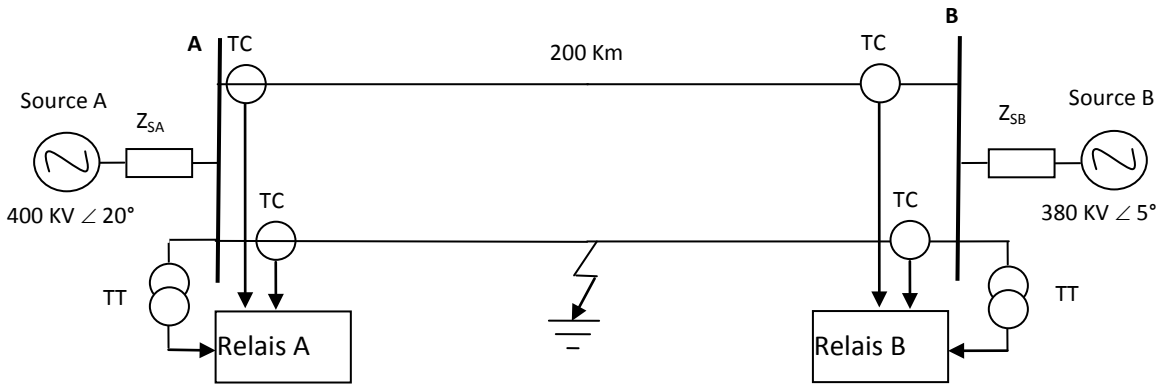


Figure (IV.7) : Réseau considéré pour l'étude.

A et B : jeux de barres

T.C : transformateur de courant.

T.T : transformateur de tension

Les paramètres du réseau sont donnés dans le tableau suivant :

Tableau (IV.3) : Paramètres du réseau.[45]

Composant :	Paramètres	
Ligne (AB, BC)	L	200 km
	Z'_{1L}	(0.0268+j0.3139)Ω/km
	Z'_{0L}	(0.2102+j1.1651)Ω/km
	Z'_{0m}	(0.1834+j0.7621)Ω/km
	C'_{1L}	11.662 nF/km
	C'_{0L}	6.996nF/km
	C'_{0m}	-2.1088nF/km
Sources A: 400 kv(φ = 20°)	Z_{1SB}	(0.32+j5.44)Ω
	Z_{0SB}	(0.8+j4.48)Ω
Sources C: 380 kv (φ = 5°)	Z_{1SB}	(0.48+j8.32)Ω
	Z_{0SB}	(3.68+j13.12)Ω

Les valeurs des courants et tensions en très haute tension sont relativement grandes de l'ordre de kA et kV. Avant d'être utilisées par les relais, ces valeurs doivent être réduites. Cette fonction est assurée par les transducteurs qui assurent l'isolation galvanique et la réduction de la grandeur à mesurer. Ils convertissent soit la tension primaire (par des transformateurs de tension T.T) soit le courant primaire (par des transformateurs de courant TC) en une tension acceptable pour le fonctionnement du relais.

Les signaux de courants et tensions utilisés par le relais sont générés au terminal A. Ces signaux sont calculés à une fréquence de 100 kHz et traités par un filtre passe-bas de Butterworth d'ordre 4 avec une fréquence de coupure de 300 Hz. Un processus de prélèvement d'échantillonnage de 1 kHz (20 échantillons par cycle de 50 Hz) est appliqué. Ce taux d'échantillonnage est compatible avec les taux actuellement utilisés dans les relais numériques.

IV.5.2)- Logiciel utilisé

La simulation est réalisée par le logiciel Matlab-Simulink avec power Système (figure IV.8) pour régénérer les signaux tensions et courants au niveau des jeux de barres A et B (lieux des relais). L'application des algorithmes de calcul de l'impédance de défaut est réalisée par le même logiciel.[46]

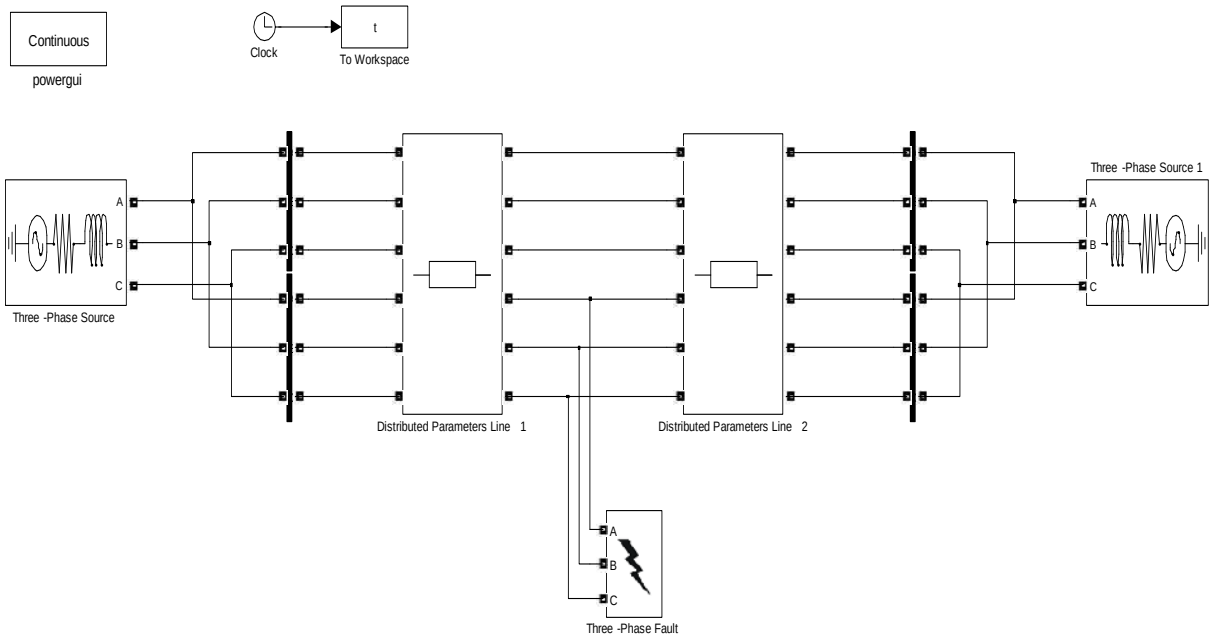


Figure (IV.8) : Réseau simulé sur Simulink-Matlab.

IV.6)- Evaluation des performances de l'algorithme

Pour évaluer les performances de l'approche proposée, les courants et les tensions des trois phases des deux extrémités de la ligne sont extraits et échantillonnés avec un taux d'échantillonnage de 20 échantillons par cycle. Ce taux d'échantillonnage est assez suffisant pour satisfaire les exigences des relais numériques modernes et pour l'évaluation de toutes les phases à l'aide de la transformation de Fourier. Ces échantillonnés produits sont intégrés dans un localisateur qui contient une étape de filtrage (filtre passe-bas), calcul de la DFT puis la transformation à l'aide de la théorie des composante symétriques.

Les figures IV.9 et IV.10 représentent respectivement les signaux des tensions et courants des trois phases de la ligne en défaut au jeu de barres A pour un défaut monophasé avec terre pour une résistance de défaut (R_f=10 Ω), à une distance d = 10 km à partir du jeu de barres A.

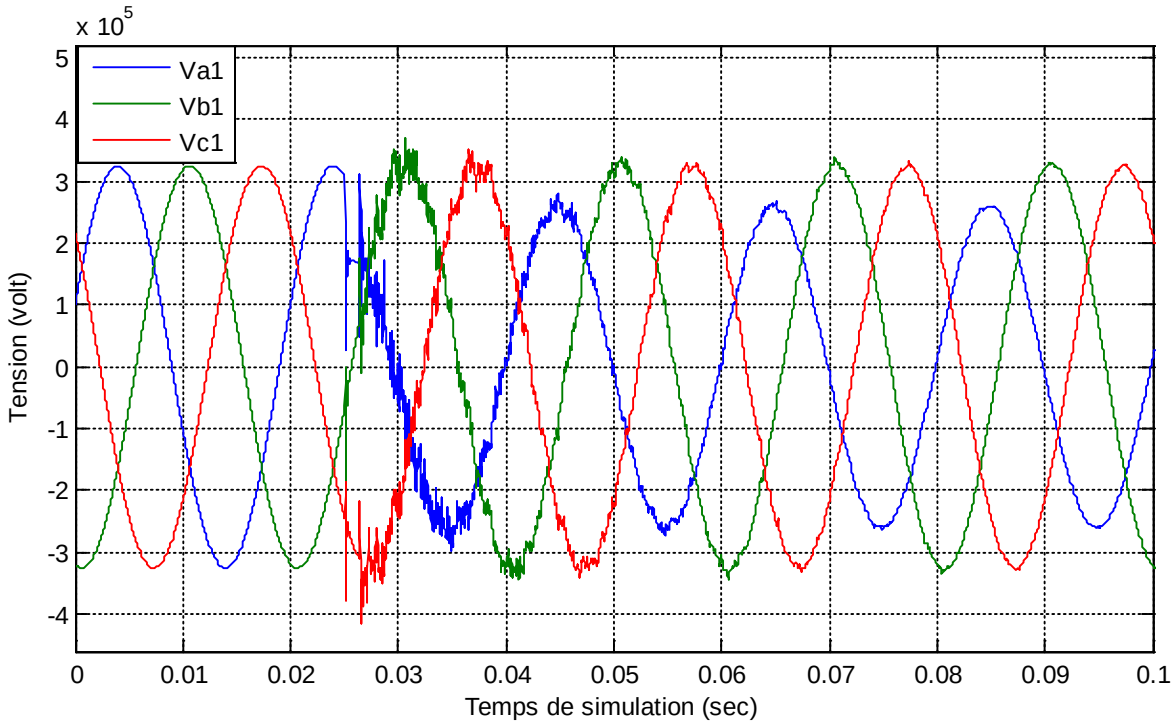


Figure (IV.9) : Tensions des trois phases de la ligne en défaut au jeu de barres A.

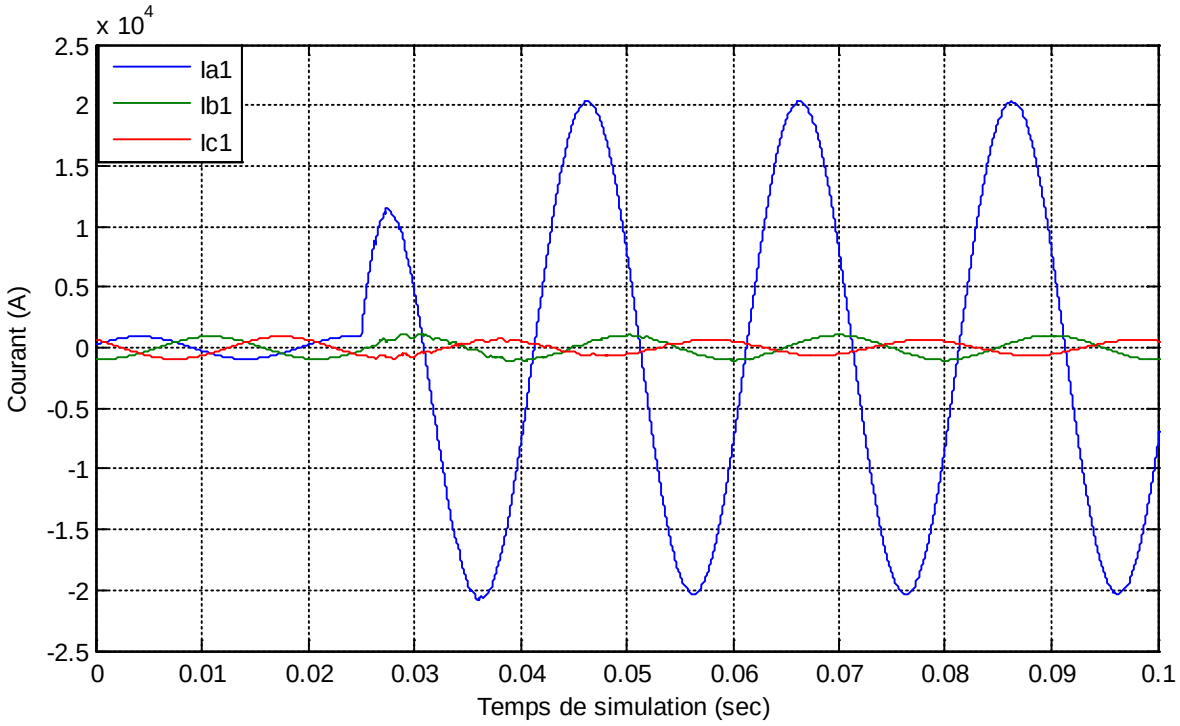


Figure (IV.10) : Courants des trois phases de la ligne en défaut au jeu de barres A.

Les figures IV.11 et IV.12 représentent respectivement les signaux des tensions et courants des trois phases de la ligne saine au jeu de barres A pour un défaut monophasé avec terre pour une résistance de défaut (R_f=10 Ω), à une distance d = 10 km à partir du jeu de barres A.

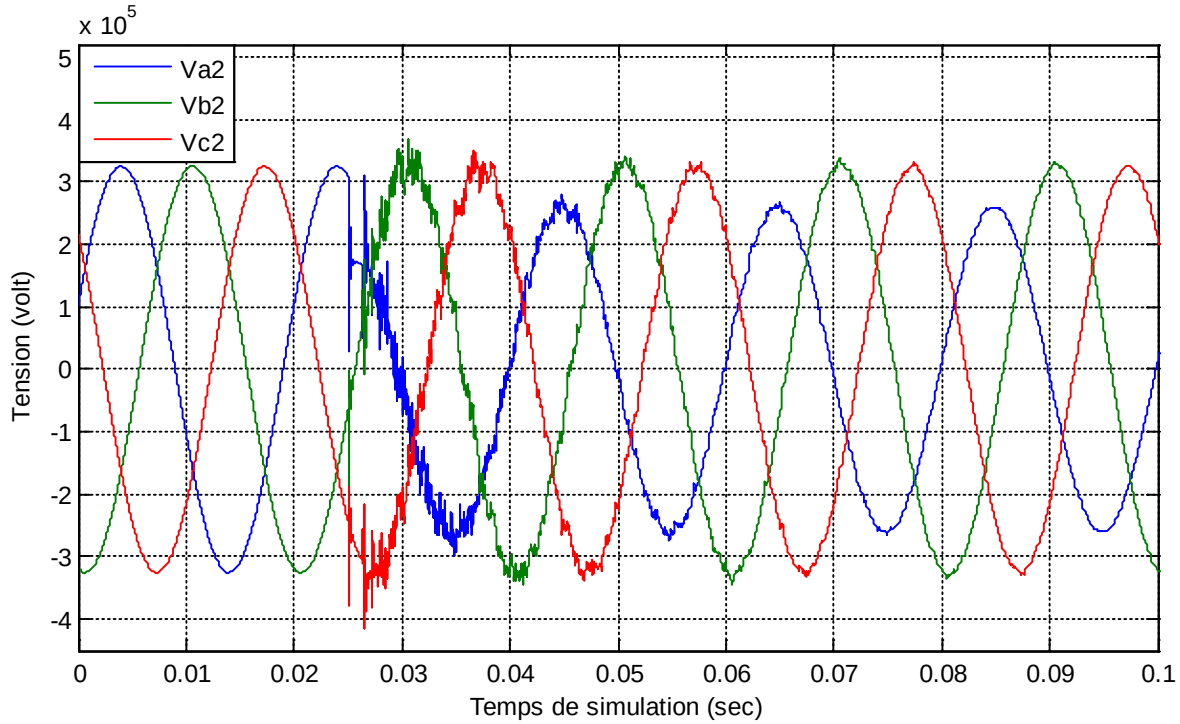


Figure (IV.11) : Tensions des trois phases de la ligne saine au jeu de barres A.

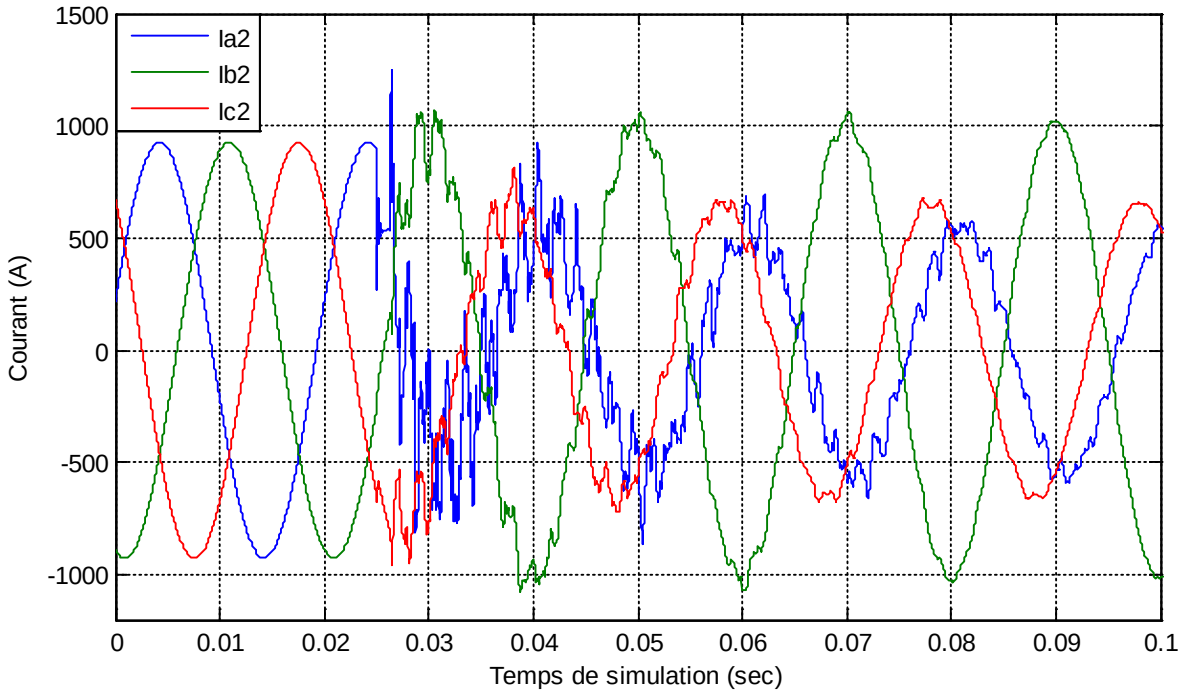


Figure (IV.12) : Courants des trois phases de la ligne saine au jeu de barres A.

Les figures IV.13 et IV.14 représentent respectivement le filtrage des signaux de tension et courant de la phase « a » de la ligne en défaut au jeu de barres A pour un défaut monophasé avec terre pour une résistance de défaut (Rf = 10 Ω), à une distance x = 10 km à partir du jeu de barres A. La performance de l'algorithme du filtrage numérique (Butterworth) montre son exactitude pour obtenir une tension typique et un courant en forme d'onde à 50Hz, dans une ligne de transport à haute tension en défaut.

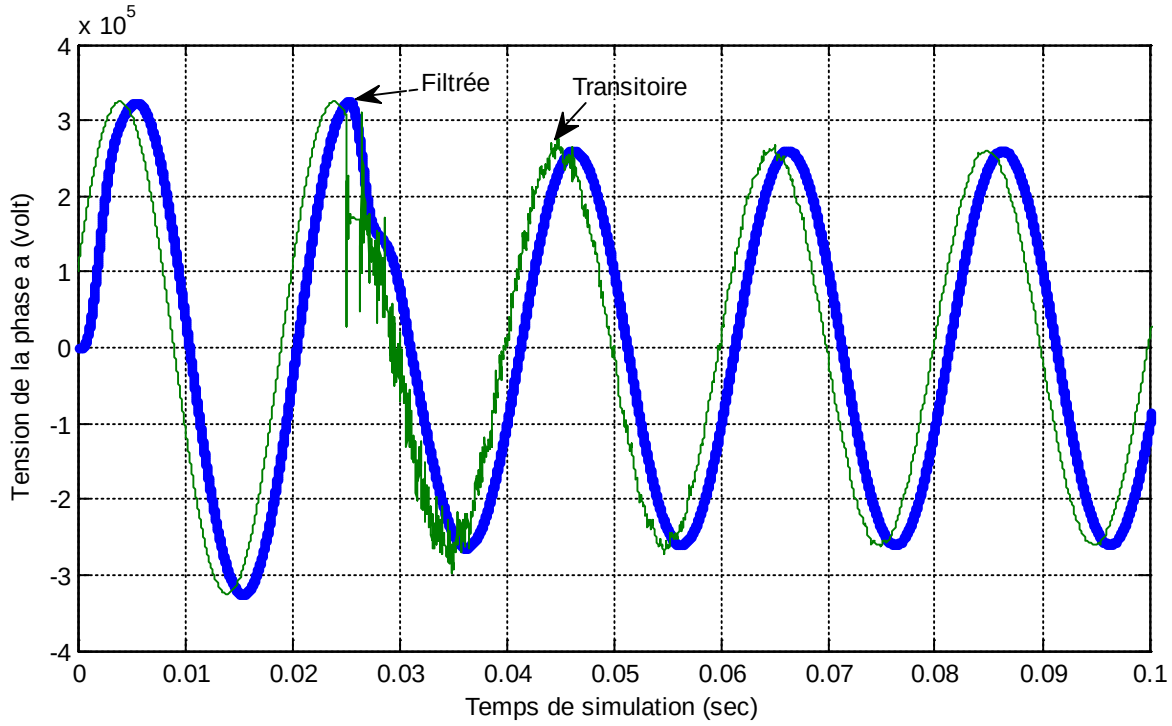


Figure (IV.13) : La tension de la phase « a » filtrée.

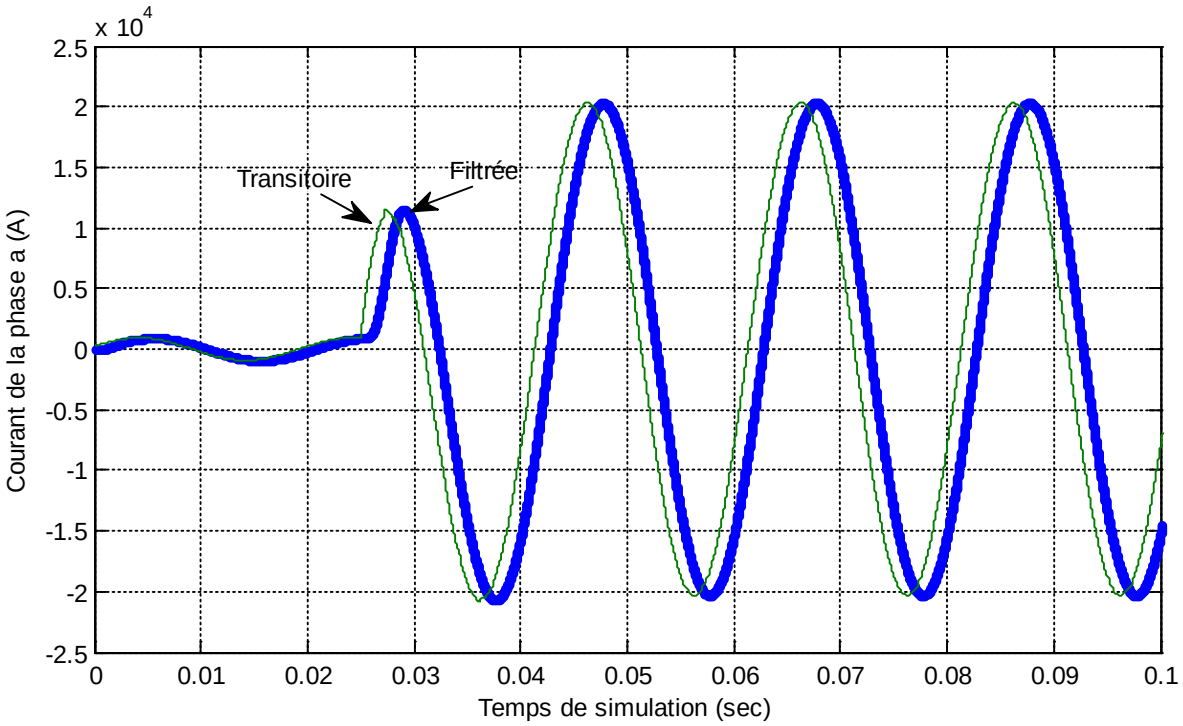


Figure (IV.14) : Le courant de la phase « a » filtré.

Les figures IV.15 et IV.16 représentent respectivement l'échantillonnage d'une période des signaux filtré de tension et courant de la phase « a » de la ligne en défaut au jeu de barres A pour un défaut monophasé avec terre pour une résistance de défaut (Rf = 10 Ω), à une distance x = 10 km à partir du jeu de barres A. la fréquence d'échantillonnage utilisée est de l'ordre de 1KHZ (Fe = 1/Te). Cette fréquence est employée par la majorité des relais actuels.

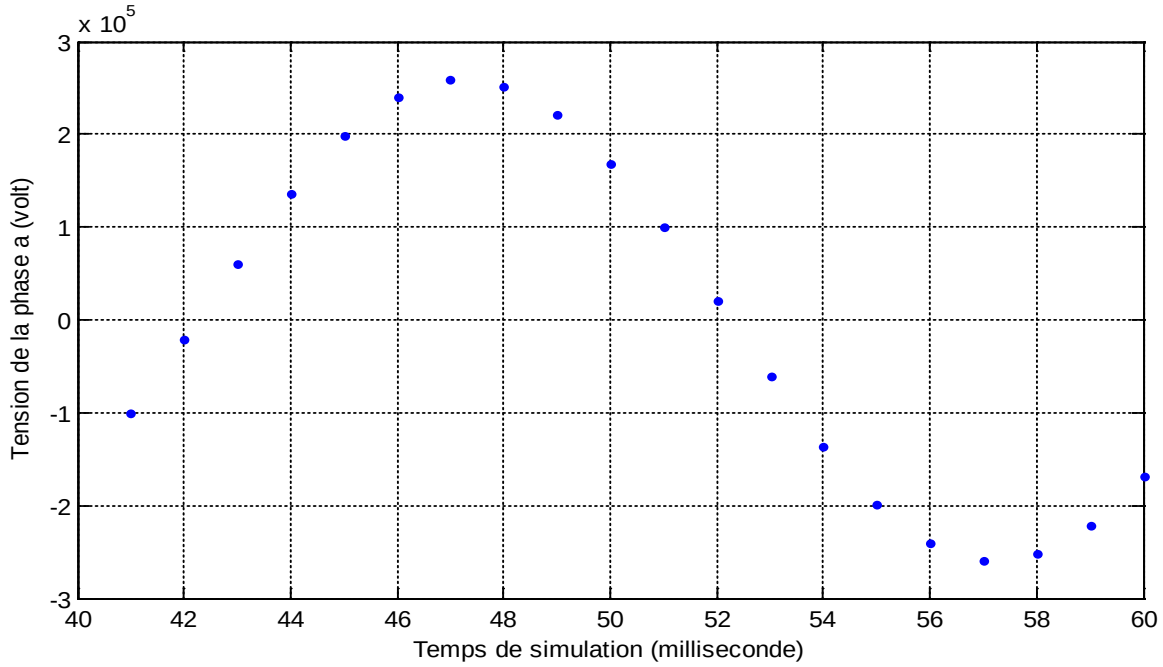


Figure (IV.15) : Une période de la tension de la phase « a » échantillonné.

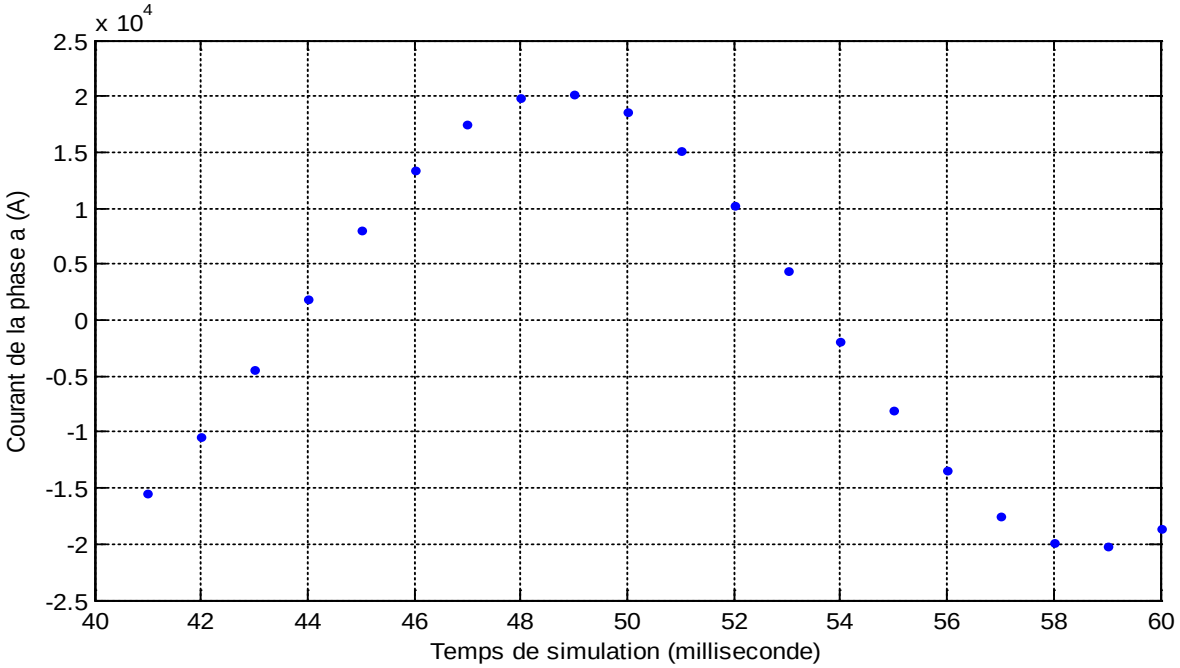


Figure (IV.16) : Une période du courant de la phase « a » échantillonné.

Les figures IV.17 et IV.18 représentent respectivement la DFT d'une période des signaux échantillonnée de tension et courant de la phase « a » de la ligne en défaut au jeu de barres A pour un défaut monophasé avec terre pour une résistance de défaut (Rf = 10 Ω), à une distance x = 10 km à partir du jeu de barres A. Cette étape est très importante car elle nous permet d'éliminé les harmonique et d'extraire la fondamentale qui sera utilisé dans l'algorithme de localisation de défaut.

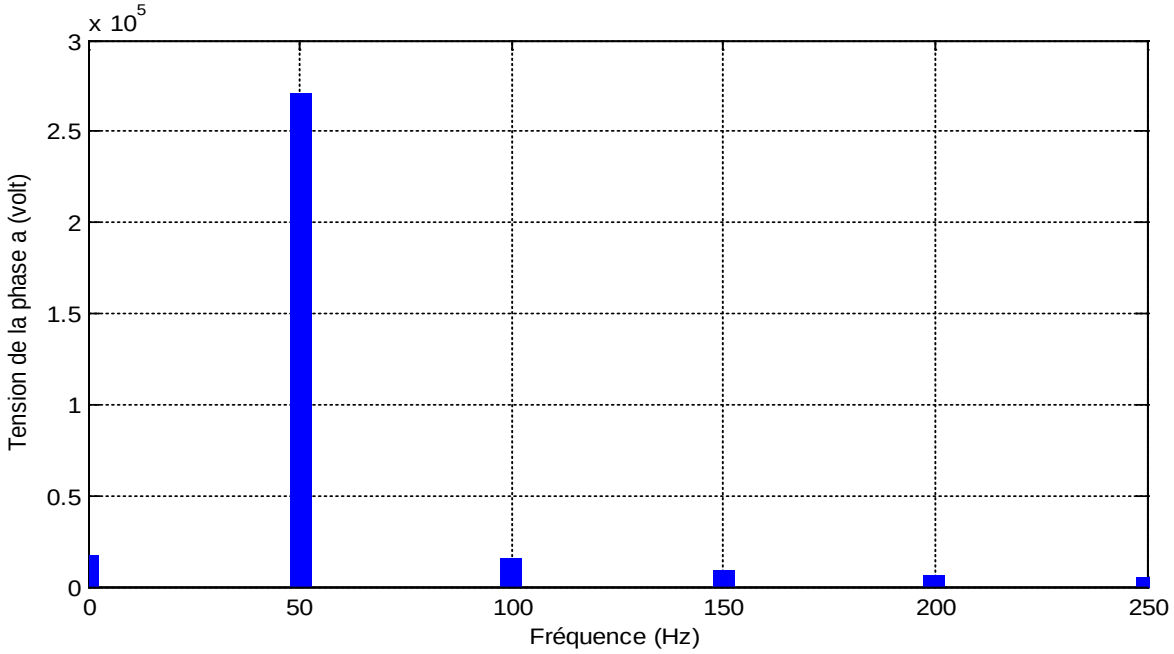
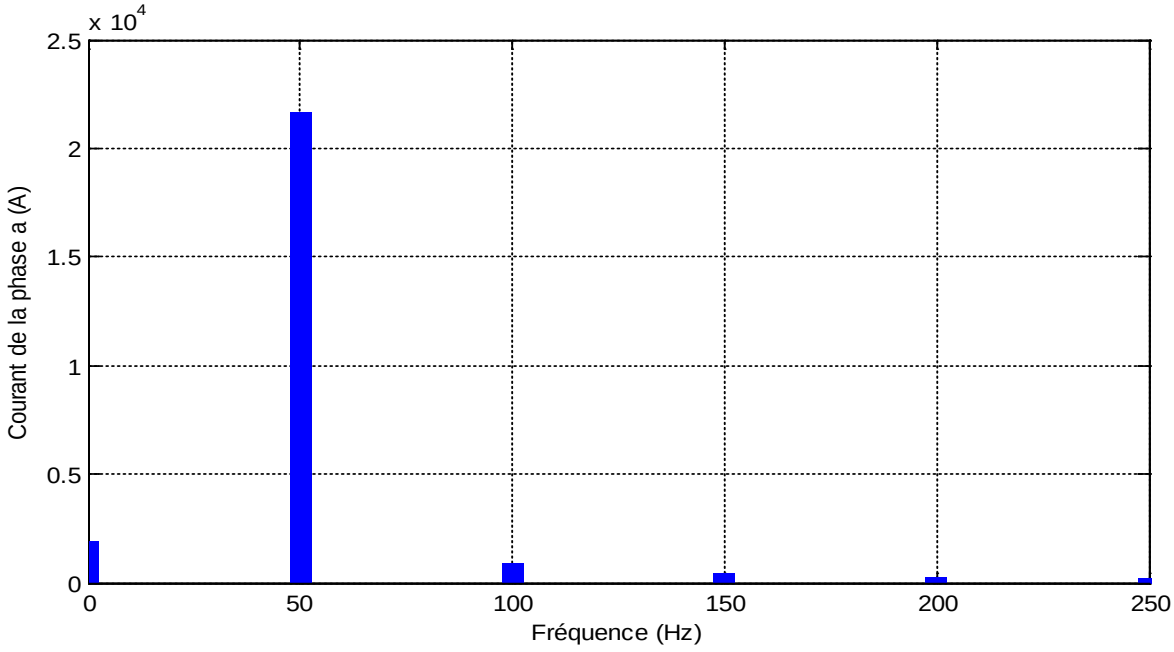


Figure (IV.17) : La DFT d'une période de la tension de la phase « a ».



Figures (IV.18) : La DFT d'une période du courant de la phase « a ».

IV.6.1)- Calcul de la distance de défaut

Pour évaluer les performances de l'approche proposée tous les types de défaut possibles (monophasé, biphasé avec et sans terre, triphasé) et à chaque endroit (10%, 20%, 30%, 40%,…..90%) de la longueur totale l de la ligne ont été testés en utilisant le logiciel Matlab pour découvrir l'erreur E maximum qui est exprimée en pourcentage par la relation suivante :

$$\text{erreur}(\%)=\frac{d_R - d}{l} * 100 \qquad \text{(IV.21)}$$

d_R : La distance réelle de défaut.

d : La distance calculée de défaut.

l : La longueur totale de la ligne.

Pour mieux comprendre le principe de fonctionnement de l'algorithme de localisation de défaut on a proposé d'étudier un exemple d'un défaut monophasé à la terre situe au milieu de la ligne (d_R = 100 km) avec une résistance de défaut : R_F = 10 Ω (figure IV.19).Les résultats continus ont été moyennés dans la période de défaut (40: 60) ms.

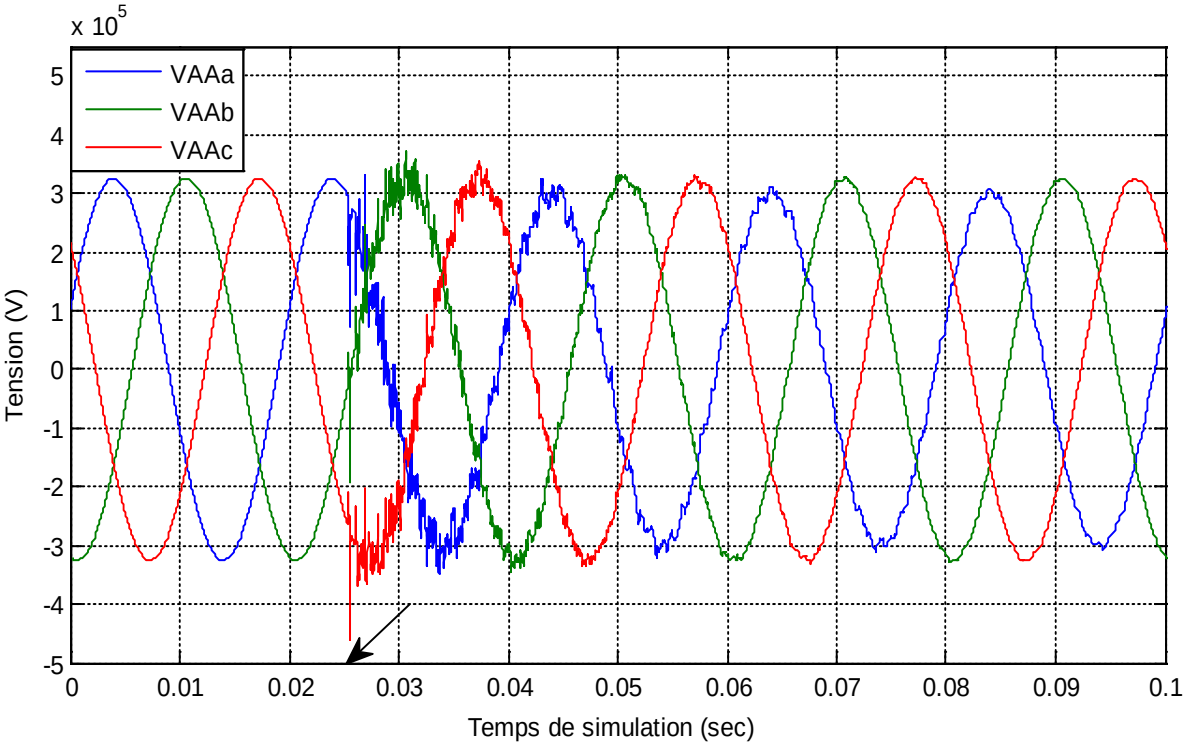


Figure (IV.19a): Tensions des trois phases de la ligne en défaut au jeu de barres A.

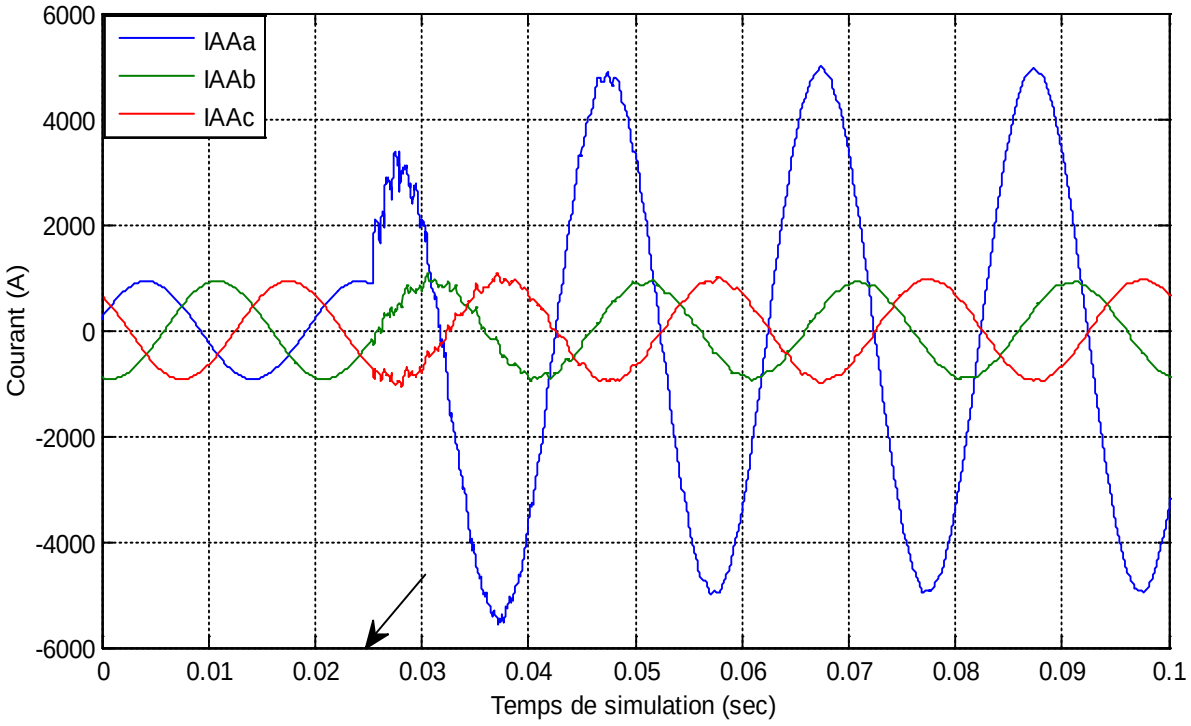


Figure (IV.19b): Courants des trois phases de la ligne en défaut au jeu de barres A.

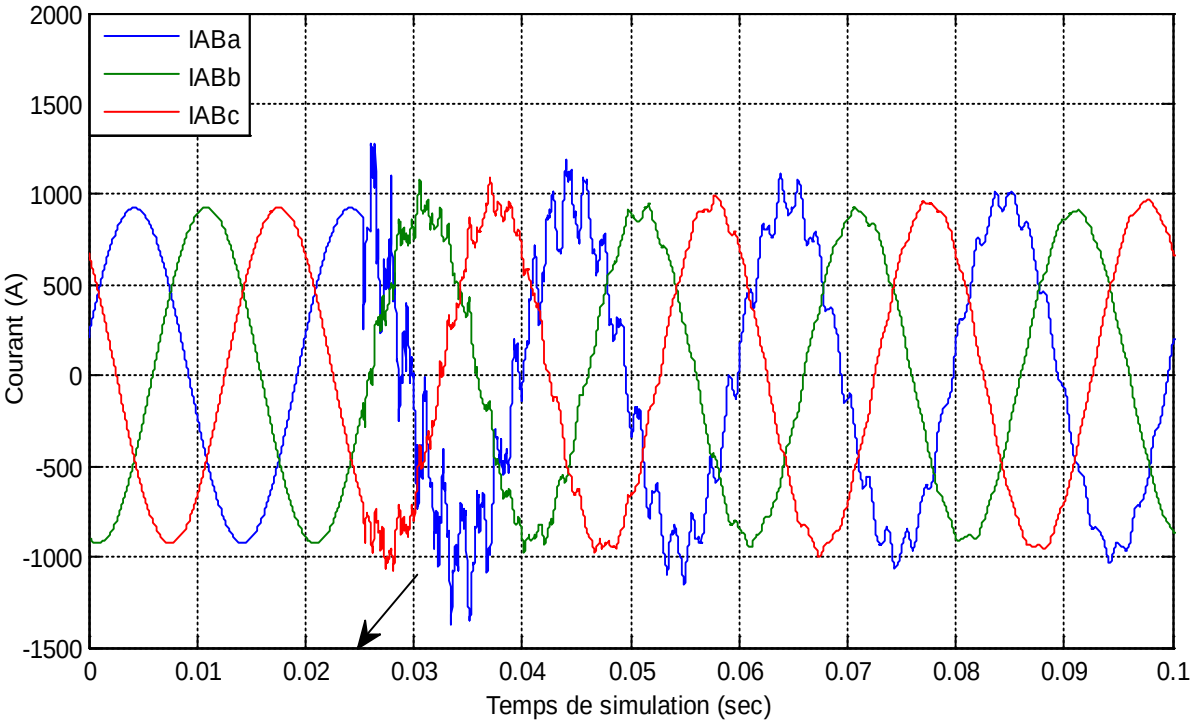


Figure (IV.19c): Courants des trois phases de la ligne saine au jeu de barres A.

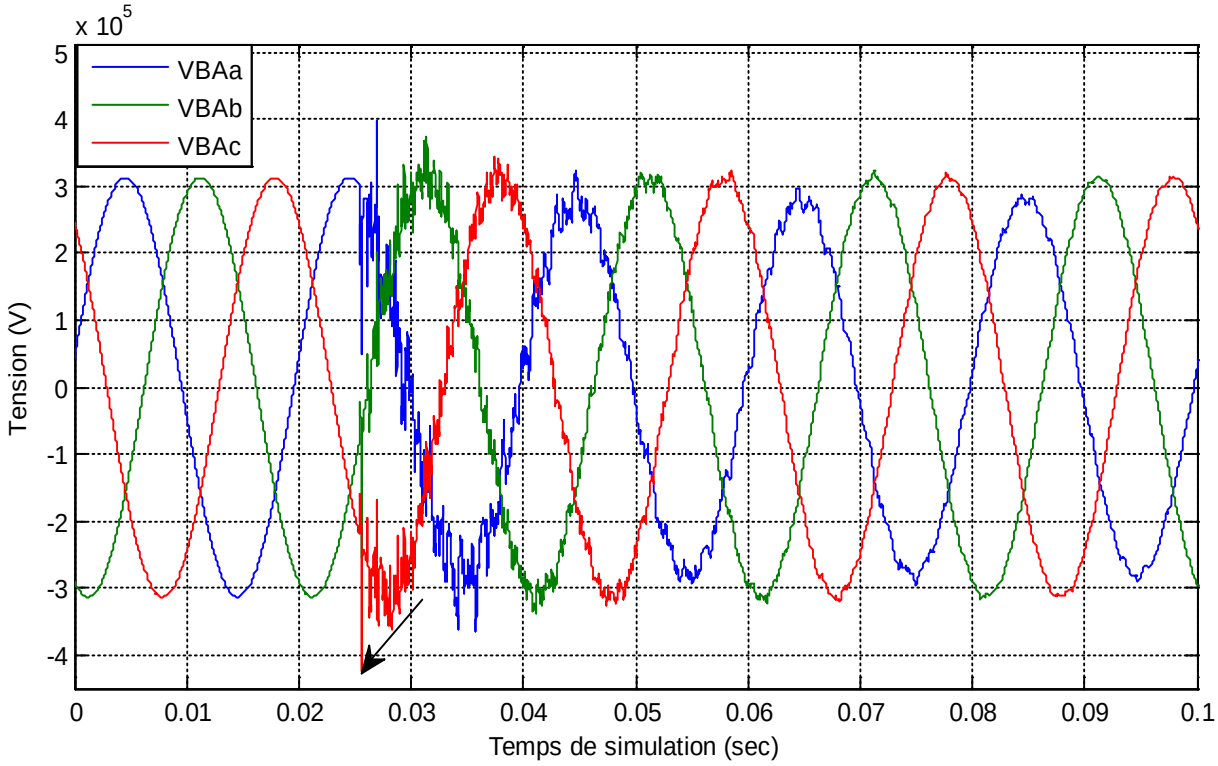


Figure (IV.19d): Tensions des trois phases de la ligne en défaut au jeu de barres B.

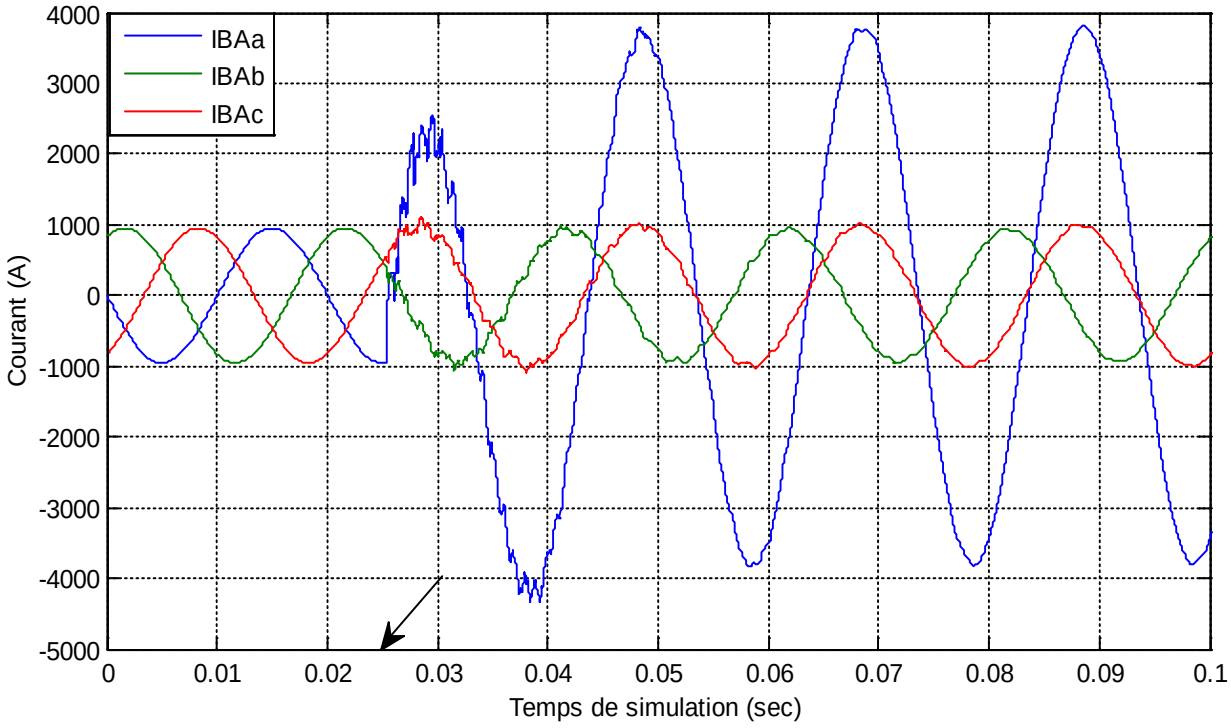


Figure (IV.19e): Courants des trois phases de la ligne en défaut au jeu de barres B.

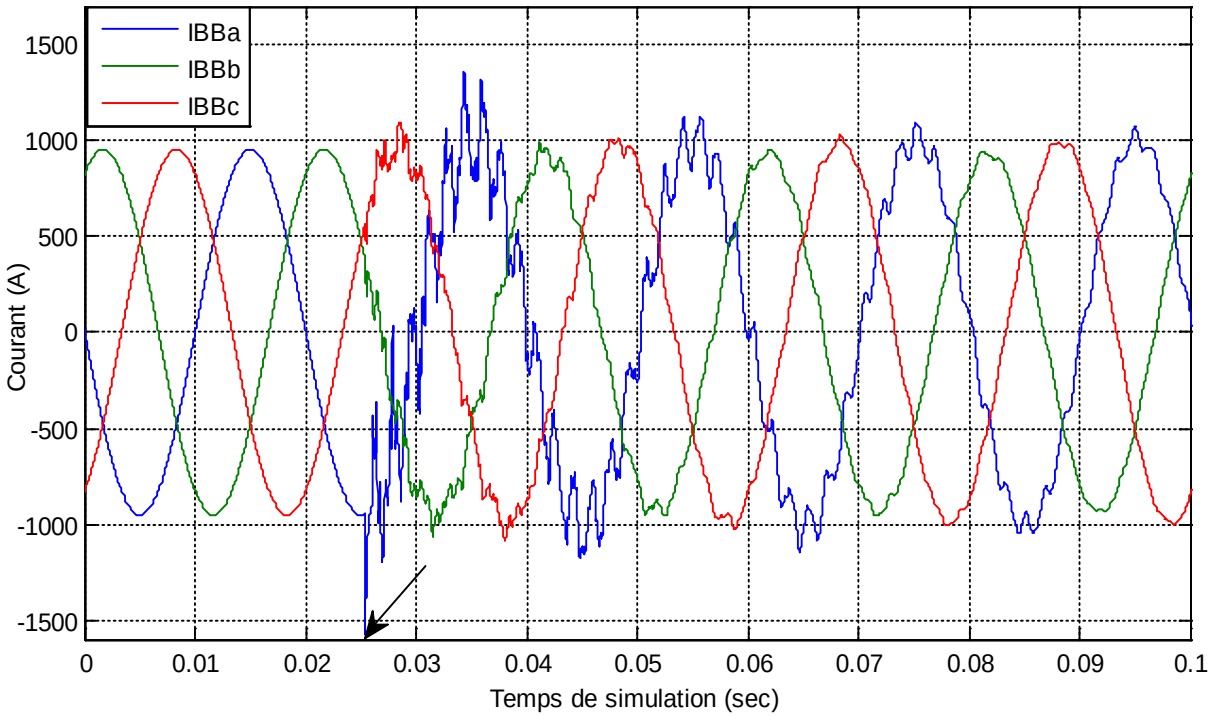


Figure (IV.19f): Courants des trois phases de la ligne saine au jeu de barres B.

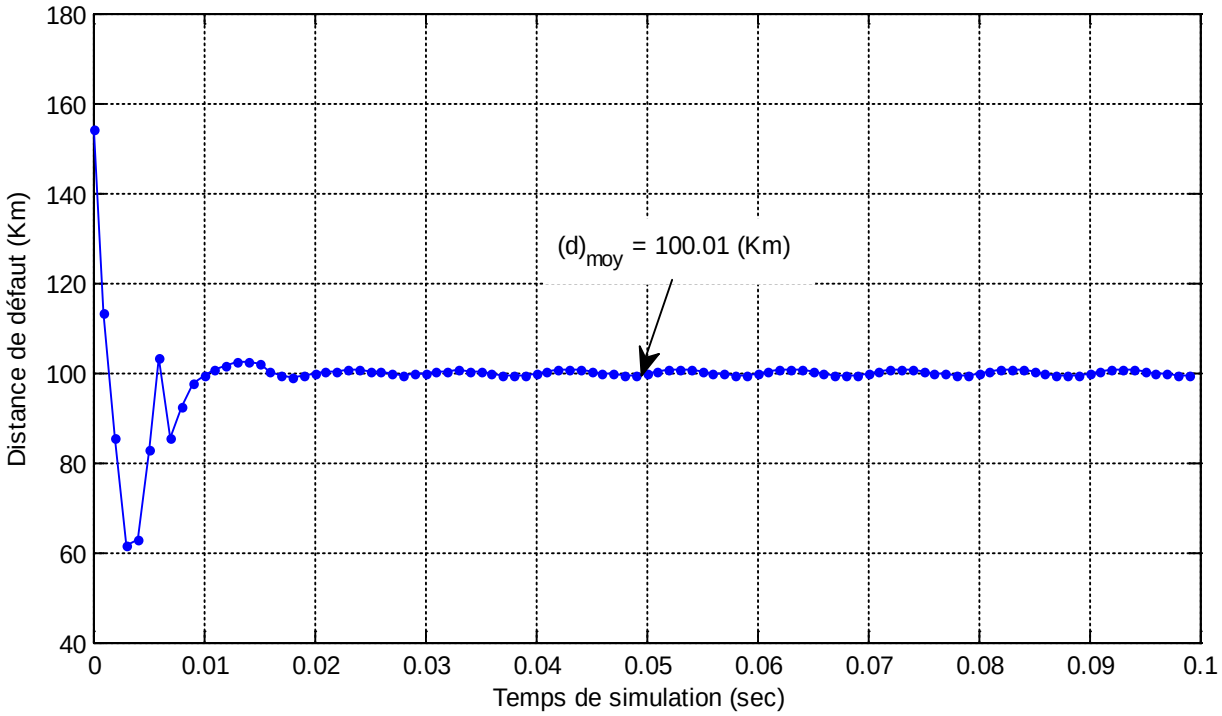


Figure (IV.19g): la distance de défaut calculé.

Figure (IV.19) : représente un exemple de calcul de la distance d'un défaut monophasé **a-T.** (d_F = 100 km, R_F = 10 Ω).

IV.6.1.1)- Défauts monophasés

Le tableau IV.4 représente les valeurs des distances des défauts calculées (d) pour des défauts monophasés et les erreurs dans le calcul des distances des défauts E(%) pour différentes valeurs des résistances des défauts R_f.

Tableau (IV.4): Valeurs des distances des défauts monophasés calculées d (km) et les erreurs E(%) en fonction des distances des défauts réelles d_R .

	$R_f = 0\ \Omega$		$R_f = 10\ \Omega$		$R_f = 20\ \Omega$	
d_R(km)	d(km)	E (%)	d(km)	E (%)	d(km)	E (%)
20	19.89	0.055	19.84	0.08	19.83	0.085
40	39.87	0.065	39.83	0.085	39.81	0.095
60	59.88	0.06	59.86	0.07	59.85	0.075
80	79.94	0.03	79.93	0.035	79.92	0.04
100	100	0	100.01	0.005	100.02	0.01
120	120.07	0.035	120.10	0.05	120.11	0.055
140	140.13	0.065	140.17	0.085	140.19	0.095
160	160.15	0.075	160.22	0.11	160.23	0.115
180	180.13	0.065	180.21	0.105	180.23	0.115

La figure IV.20 représente les erreurs de localisation E (%) des défauts monophasés en fonction des endroits de défaut d en (km) pour différentes valeurs de la résistance des défauts R_f.

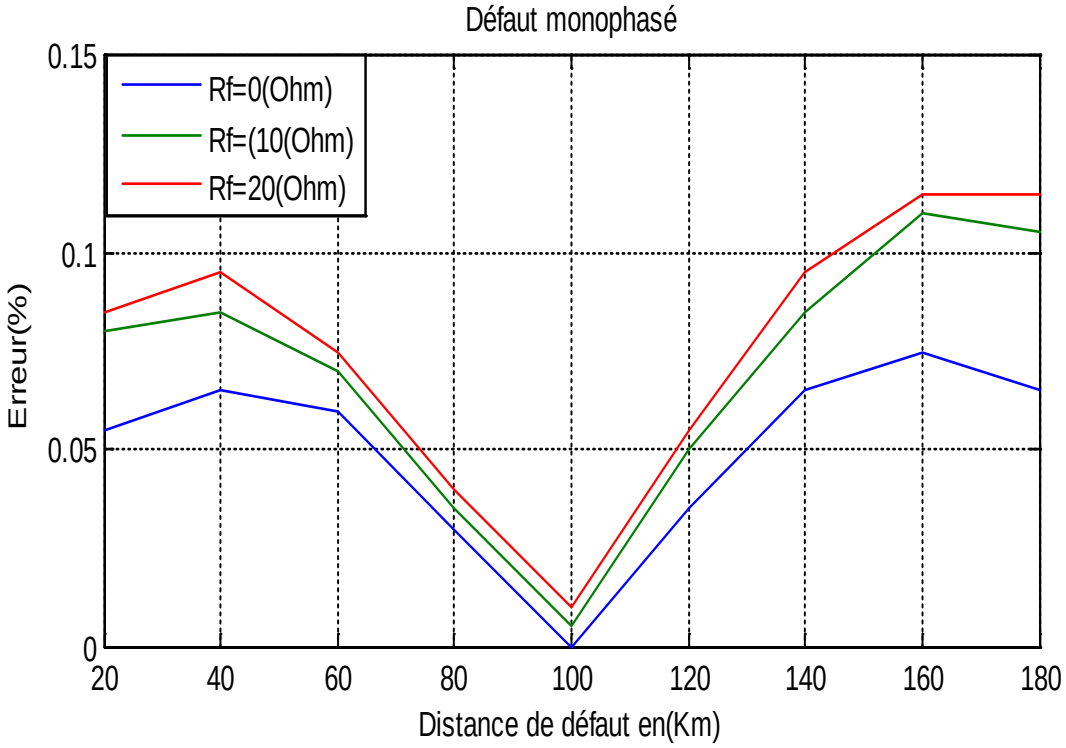


Figure (IV.20): Les erreurs de localisation E (%), en fonction des endroits réels des défauts monophasés d (km) pour différents valeurs des résistances des défauts R_f

IV.6.1.2)-Défauts biphasés sans terre

Le tableau IV.5 représente les valeurs des distances des défauts calculées (d) pour des défauts biphasés sans terre et les erreurs dans le calcul des distances des défauts E(%) pour différentes valeurs des résistances des défauts R_f.

Tableau (IV.5): Valeurs des distances des défauts biphasés sans terre calculées d (km) et les erreurs E(%) en fonction des distances des défauts réelles d_R .

	$R_f = 0\ \Omega$		$R_f = 10\ \Omega$		$R_f = 20\ \Omega$	
d_R(km)	d(km)	E (%)	d(km)	E (%)	d(km)	E (%)
20	19.74	0.13	19.70	0.15	19.74	0.13
40	39.70	0.15	39.67	0.165	39.69	0.155
60	59.75	0.125	59.73	0.135	59.74	0.13
80	79.85	0.075	79.86	0.07	79.86	0.07
100	100	0	100.01	0.005	100.02	0.01
120	120.13	0.065	120.17	0.085	120.18	0.09
140	140.25	0.125	140.31	0.155	140.31	0.155
160	160.34	0.17	160.40	0.2	160.39	0.195
180	180.33	0.165	180.40	0.2	180.39	0.195

La figure IV.21 représente les erreurs de localisation E (%) des défauts biphasés sans terre en fonction des endroits de défaut d en (km) pour différentes valeurs de la résistance des défauts R_f.

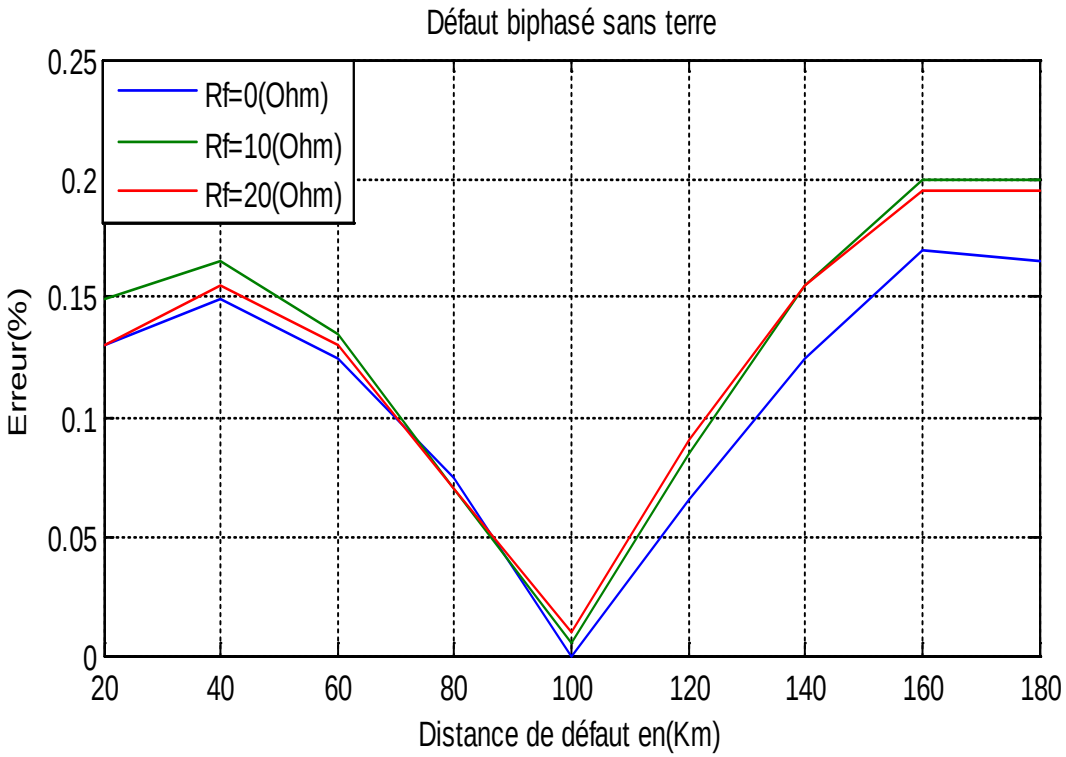


Figure (IV.21): Les erreurs de localisation E (%), en fonction des endroits réels des défauts biphasés sans terre d (km) pour différents valeurs des résistances des défauts R_f.

IV.6.1.3)-Défauts biphasés avec terre

Le tableau IV.6 représente les valeurs des distances des défauts calculées (d) pour des défauts biphasés aves terre et les erreurs dans le calcul des distances des défauts E(%) pour différentes valeurs des résistances des défauts R_f.

Tableau (IV.6): Valeurs des distances des défauts biphasés avec terre calculées d (km) et les erreurs E(%) en fonction des distances des défauts réelles d_R .

	$R_f = 0\ \Omega$		$R_f = 10\ \Omega$		$R_f = 20\ \Omega$	
d_R(km)	d(km)	E (%)	d(km)	E (%)	d(km)	E (%)
20	19.74	0.055	19.70	0.15	19.74	0.13
40	39.70	0.15	39.67	0.165	39.69	0.155
60	59.75	0.125	59.73	0.135	59.74	0.13
80	79.85	0.075	79.86	0.07	79.86	0.07
100	100	0	100.01	0.005	100.02	0.01
120	120.13	0.065	120.17	0.085	120.18	0.09
140	140.25	0.125	140.31	0.155	140.31	0.155
160	160.34	0.17	160.40	0.2	160.39	0.195
180	180.33	0.165	180.40	0.2	180.39	0.195

La figure IV.22 représente les erreurs de localisation E (%) des défauts biphasés avec terre en fonction des endroits de défaut d en (km) pour différentes valeurs de la résistance des défauts R_f.

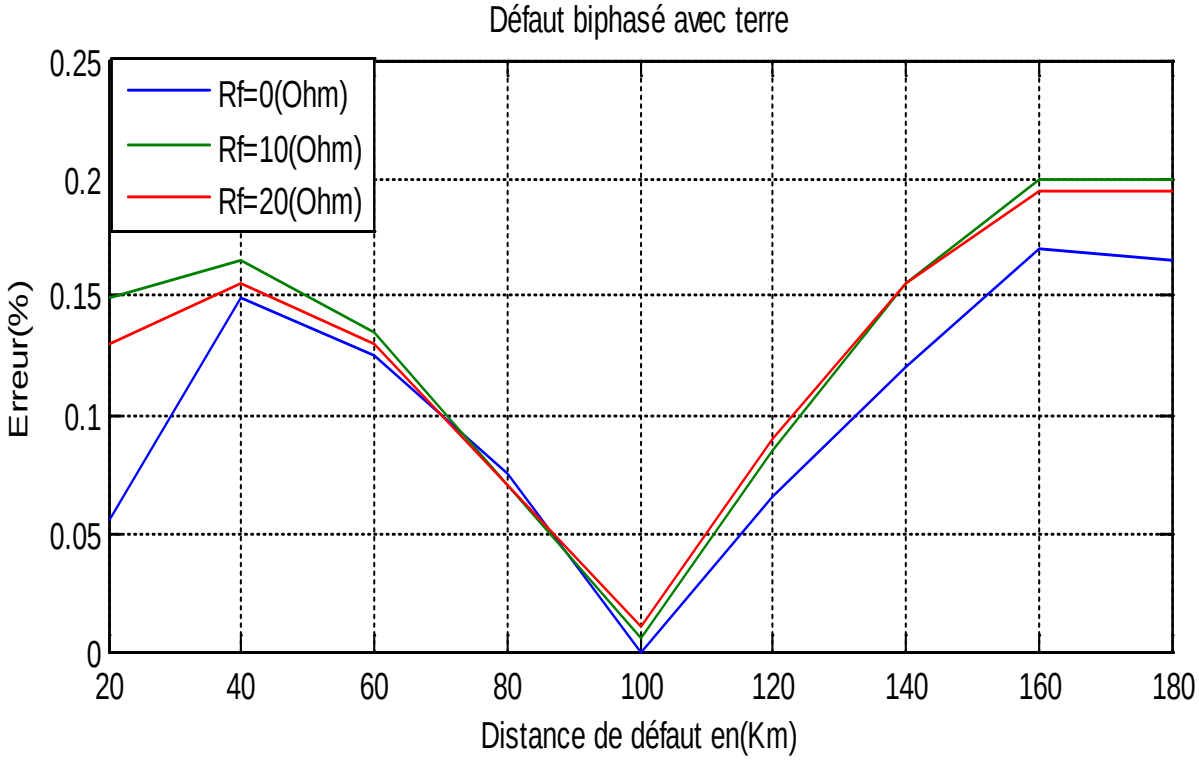


Figure (IV.22): Les erreurs de localisation E (%), en fonction des endroits réels des défauts biphasés avec terre d (km) pour différents valeurs des résistances des défauts R_f.

IV.6.1.4)-Défauts triphasés

Le tableau IV.7 représente les valeurs des distances des défauts calculées (d) pour des défauts triphasés et les erreurs dans le calcul des distances des défauts E(%) pour différentes valeurs des résistances des défauts R_f.

Tableau (IV.7): Valeurs des distances des défauts triphasés calculées d (km) et les erreurs E(%) en fonction des distances des défauts réelles d_R .

	$R_f = 0\ \Omega$		$R_f = 10\ \Omega$		$R_f = 20\ \Omega$	
d_R(km)	d(km)	E (%)	d(km)	E (%)	d(km)	E (%)
20	19.74	0.13	19.70	0.15	19.74	0.13
40	39.70	0.15	39.67	0.165	39.69	0.155
60	59.75	0.125	59.73	0.135	59.74	0.13
80	79.85	0.075	79.86	0.07	79.86	0.07
100	100	0	100.01	0.005	100.02	0.01
120	120.13	0.065	120.17	0.085	120.18	0.09
180	180.33	0.165	180.40	0.2	180.39	0.195
140	140.25	0.125	140.31	0.155	140.31	0.155
160	160.34	0.17	160.40	0.2	160.39	0.195

La figure IV.23 représente les erreurs de localisation E (%) des défauts triphasés en fonction des endroits de défaut d en (km) pour différentes valeurs de la résistance des défauts R_f.

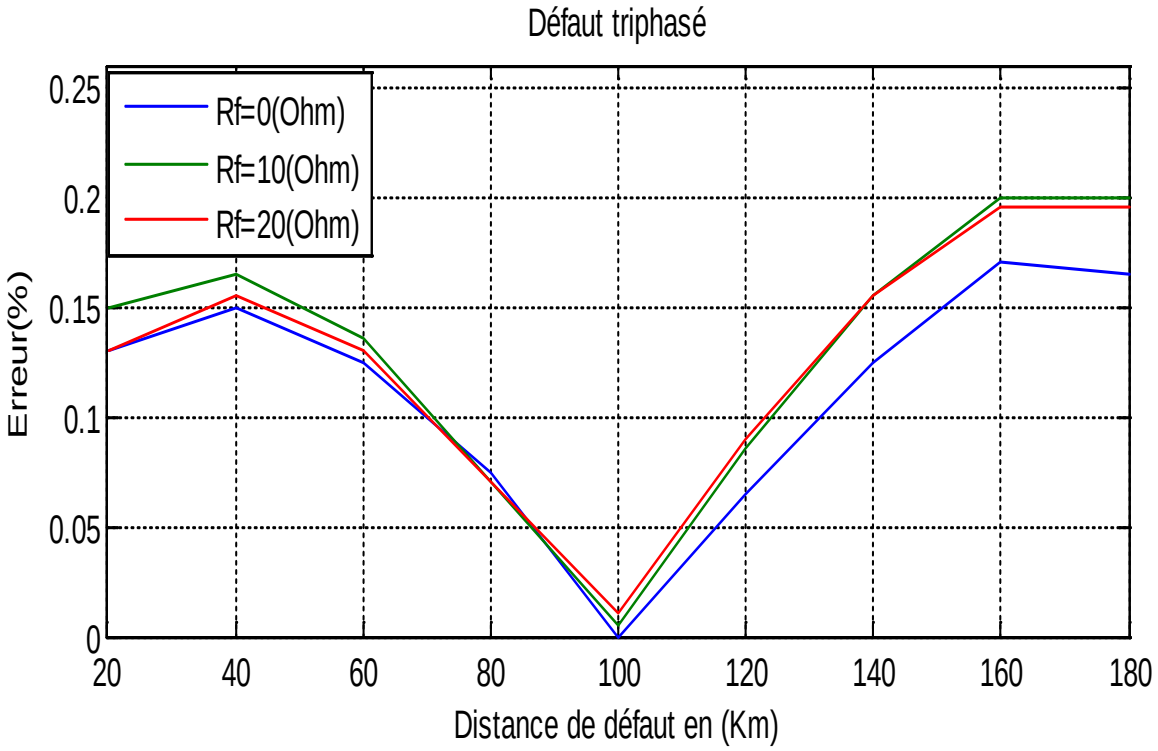


Figure (IV.23): Les erreurs de localisation E (%), en fonction des endroits réels des défauts triphasé d (km) pour différents valeurs des résistances des défauts R_f.

IV.6.2)- Interprétation des Résultats :

Les résultats obtenus montrent clairement que l'algorithme développé dans ce travail donne des résultats très satisfaisante avec une grande précision puisque l'erreur maximum enregistrée dans l'estimation de la distance de défaut reste très petite est ne dépasse pas 0.2% même pour des grandes valeurs de la résistance de défaut qui peut aller jusqu'à 20 Ω est cela pour tous les types de défauts (monophasé, biphasé et triphasé). On remarque aussi que l'erreur dans l'estimation de la distance de défaut est minime au milieu de la ligne est qu'il ya peut d'influence de la présence d'une autre ligne (couplage mutuel) sur la précision dans la localisation de défaut.

IV.7)-Conclusion

Ce chapitre est consacré à l'étude des problèmes associer à la protection des lignes électrique à double circuit où on a vu l'impact de la résistance de défaut et l'effet mutuelle sur l'estimation de la distance de défaut et à l'aide du programme de simulation MATLAB _Simulink on évaluer les performances de l'algorithme de calcul de la distance de défaut développé pour assurer la bonne fonctionnement des systèmes de protection. Les cas de test couvrent la plupart des conditions anormales incluant le déséquilibre de la ligne, les variations de la résistance du défaut et de paramètres du réseau. Tous les tests appliqués révèlent des résultats très satisfaisante et une exécution prometteuse pour toutes les situations.

Conclusion Générale

Les lignes électriques à double circuit ont été largement utilisées dans les réseaux électriques modernes pour augmenter la fiabilité et la sécurité des systèmes de transport d'énergie électrique. En plus, les lignes à doubles circuits sur le même pylône réduisent l'espace d'occupation du sol, l'investissement et la période de construction. Bien qu'elles aient trouvé des applications larges, la structure a des problèmes avec la localisation de l'endroit de défaut en raison de l'effet mutuelle entre les circuits. À cette fin, un algorithme a été développé dans cette mémoire pour obtenir une meilleure évaluation de la distance de défaut selon les données extraites des deux extrémités de la ligne.

L'algorithme proposé utilise la théorie des composantes symétriques pour faciliter l'étude d'un réseau déséquilibré. Celle-ci consiste à décomposer un système de trois tensions en une somme de trois systèmes de tensions triphasés équilibrés indépendants, dits : direct (séquence positive), inverse (séquence négative) et homopolaire (séquence zéro). L'utilisation des composantes symétriques avec l'approche de l'impédance apparente simplifie le calcul et rendent l'algorithme plus performant. De plus, l'algorithme est indépendant de la résistance du défaut, de l'impédance de la source et du courant de prédéfaut. Différents test on été effectués sur une ligne électrique à double circuit. Ces tests comprends tous les types de défaut possibles (monophasé, biphasé avec et sans terre et triphasé) et à différentes endroits de la ligne. Les résultats d'essai confirment la validité et l'efficacité de l'approche proposée.

Finalement, nous espérons que notre travail sera fort utile pour l'amélioration des connaissances des étudiants et constituera une étape pour aborder une étude plus approfondie sur la simulation des protections des réseaux électriques par l'utilisation du logiciel de simulation MATLAB et d'autre logiciel.

Bibliographie

[1] G. RAMI, **« Contrôle de tension auto adaptatif pour des productions décentralisées d'énergies connectées au réseau électrique de distribution »**. Ph. D. Thesis, INP Grenoble, 2006.

[2] A. HAMMOUD, **« Etude des convertisseurs haute tension pour la protection et la coordination de réseau de distribution »**. Thèse pour le grade de Docteur en Génie Electrique, INSA de Lyon, 2010.

[3] SIEMENS, **« Power Engineering Guide - Transmission and Distribution »** 4th Edition, 2005.

[4] J.M. DELBARRE, **« Postes à HT et THT - Rôle et Structure »**, Techniques de l'Ingénieur, Traité Génie électrique, D 4570, 2004.

[5] M. ZELLAGUI, **« Etudes des protections des réseaux électriques MT (30 & 10kV) »**, Mémoire de Magistère en Electrotechnique, Université Mentouri Constantine, 2010.

[6] M.ABBACI & A.KHOUAS, **«Etude des différents types de protection des lignes HT »**, Mémoire de Master en Electrotechnique, Université Yahia fares Médéa, 2014.

[7] Groupe SONELGAZ, XD, **« Guide Technique de Distribution »**, Document technique de Groupe SONELGAZ, 1984.

[8] Schneider Electric, **« Architecteur de Réseau de Distribution »**, 2007.

[9] SONELGAZ Prévention et Sécurité, **« Prévention du Risque Electrique »**, Carnet de Prescriptions au Personnel du Groupe SONELGAZ, Edition 2001.

[10] T.Funabashi, H.Otoguro, Y .Mizuma, L. Dube, M. Kizilcay and A.Ametani, **«Influence of Fault Arc Characteristics on the Accuracy of digital Fault Locators »**, IEEE Trans. On Power Delivery, Vol. 16, No. 2, April 2001, pp. 195-199.

[11] M. LAMI, **« Protection et Surveillance des Réseaux de Transport d'Énergie Électrique »**, Volume 2, Electricité de France (EDF), février 2003.

[12] Schneider Electric, **« Protections des Réseaux Electriques »**, Guide de la Protection, 2008.

[13] Cong Duc PHAM, **«Détection et localisation de défauts dans les réseaux de distribution HTA en présence de génération d'énergie dispersée»,** Doctorat 19 septembre 2005.

[14] H.YAHIAOUI& S.BENAROUS, **«Analyse des défauts dans les réseaux électrique en utilisant la transforme d'ondelette», Mémoire de Master en Electrotechnique,** Université Yahia fares Médéa, 2016.

[15] C. PRÉVÉ, **« Protection des Réseaux Electriques »**, Edition HERMES, Paris 1998.

[16] C. RUSSELL MASON, **« The Art and Science of Protective Relaying »**, 1956 - New York.

[17] C. CLAUDE & D. PIERRE, **« Protection des Réseaux de Transport et de Répartition »**, Direction de la Production et du Transport d'Electricité (EDF), octobre 2005.

[18] F.BOULIK & K.CHOUIA, **« Détection et Localisation des Défauts dans les Réseaux Electriques»**, Mémoire de Master en Electrotechnique, Université Yahia fares Médéa, 2017.

[19] M.BENDADA, **« Implantation d'algorithme de filtrage FPGA (réseau de portes programmables numérique sur FPGA (réseau de portes programmables) »**, Mémoire de Master en électronique, Université Ferhat Abbas de Sétif Algérie – 2010.

[20] M.AICHAOUI, N.BOUZERGUI, **« Localisation des défauts sur les lignes aériennes dans la protection numérique »**, Mémoire d'ingénieur d'état en Electrotechnique, U.S.T.H.B, Octobre 2003.

[21] **Y.Daaou**, **«Classification et localisation des défauts dans les lignes de transport à THT en temps réel»**, Mémoire de Magister, U.S.T.O Oran (http://dspace.univ-usto.dz/bitstream/123456789/73/1/magister.pdf).2011

[22] Newcombe, et al. « **Protective Relay Application Guide »**, 1975, Scolar Press.

[23] **« Site Internet EDF partie protection HTB/HTA »**, Année 2008.

[24] Dj. LABED, **« Production Décentralisée et Couplage au Réseau »** Thèse Doctorat D'Etat, Université Mentouri Constantine, Année 2008.

[25] S.G. AQUILES PEREZ, **« Modeling Relays For Power System Protection Studies »**, Ph. D. Thesis, University of Saskatchewan Saskatoon, Saskatchewan, Canada, 2006.

[26] T. BOUTHIBA, **« Contribution au Développement de nouvelles techniques pour la protection des lignes de transport THT contre les surtensions de manœuvre et les défauts électriques »**, Thèse de Doctorat, USTO, 2004.

[27] Melle F.Z. ELMEZOUAR & Melle A. RAOUDl,**« La protection Numérique d'une Ligne Haute Tension »**, Thèse Ingénieur d'Etat ; Université Djillali Liabes de Sidi Bel Abbès, Promotion 2008-2009.

[28] R. C. JAEGER, **« Tutorial: Analog Data Acquisition Technology »**, IEEE Micro, February 1982.

[29] P. G. McLaren, K. Mustaphi, G. Benmouyal, S. Chano, A. Girgis, C. Henville, M.Kezunovic, L. Kojovic, R. Marttila, M. Meisinger, G. Michel, M. S. Sachdev, V. Skendzic, T. S. Sidhu, and D. Tziouvaras, **« Software Models for Relays »**, IEEE Transactions on Power Delivery, Vol. 16, No. 12, April 2001, pp. 238-45.

[30] Dr. Hamid H. Sherwali and Eng. Abdlmnam A. Abdlrahem, **« Simulation of numerical distance relays »**, Al-Fatah University, Tripoli-Libya.

[31] H. A. ELEKERMI, **« Localisation des Défauts dans les Lignes de Transport en utilisant les Valeurs Instantanées des Signaux »**, Mémoire de Magistère, USTO, 2008.

[32] SIEMENS AG, **« Protection de Distance 7SA6 V. 4.6 »**, 7SA6 Manuel, 2004.

[33] Dine mohamed, **« Localisation des Défauts dans les Lignes de Transport d'énergie électrique à double circuit »,**Mémoire de Magister, U.S.T.O Oran, 2010.

[34] Liao, Y. Elangovan, S. « **Improved symmetrical component-based fault distance estimation for digital distance protection** » IEE Proc. -Gerzer. Transin. Disrrib., Vol. 145. No. 6, November 1998

[35] Maja Knezev « **Optimal Fault Location** » Masters of Science December 2007, Texas A&M University.

[36] Gilany, M. El Din, E.S.T. Abdel Aziz, M.M. Ibrahim, D.K. « **An accurate scheme for fault location in combined overhead line with underground power cable Power** » Engineering Society General Meeting, 2005 IEEE June 2005 , page(s): 2521- 2527 Vol. 3

[37] El Sayed Tag El Din, M. M Abdel Aziz , D. k Ibrahim, M. Gilany « **Fault location scheme for combined overhead line with underground power cable** » Electric Power Systems Research Volume 76, Issue 11, July 2006, Pages 928-935.

[38] Ching-Shan Chen, Chih-Wen Liu and Joe-Air Jiang **« A New Adaptive PMU Based Protection Scheme for Transposed/Untransposed Parallel Transmission Lines »,**IEEE Transactions On Power Delivery, Vol. 17, No. 2, Avril 2002.

[39] T. Adu, **« A new transmission line fault locating system »,** IEEE Trans. Power Delivery, vol. 16, pp. 498–503, Oct. 2001.

[40] Xiaojuan Li **« Estimations Of Power System Frequency, Phasors And Their Applications For Fault Location On Power Transmission Lines »** Ph.D. Dissertation 2007, University of Western Australia.

[41] Zheng Chen Chengmu Luo Jinxi Su Xinrong Wu **« A fault location algorithm for transmission line based on distributed parameter »** Developments in Power System Protection IEE 2001page(s): 411-413

[42] Waikar D.L; Elangovan S; Liew A. C **« Further enhancements in the symmetrical components based improved fault impedance estimation method Part I. Mathematical modeling** » Electric power systems research 1997, vol. 40, no3, pp. 189-194.

[43] Waikar D.L; Elangovan S; Liew A. C **« Further enhancements in the symmetrical components based improved fault impedance estimation method Part II. Performance evaluation** » Electric power systems research 1997, vol. 40, no3, pp. 195-201.

[44] Liao, Y. Elangovan, S. « **Improved symmetrical component-based fault distance estimation for digital distance protection** » IEE Proc. -Gerzer. Transin. Disrrib., Vol. 145. No. 6, November 1998.

[45] BehnamMahamedi and JianGuo Zhu, **«Unsynchronized Fault Location Based on theNegative-Sequence Voltage Magnitude forDouble-Circuit Transmission Lines»,**IEEE TRANSACTIONS ON POWER DELIVERY, VOL. 29, NO. 4, AUGUST 2014.

[46] lelogicielMatlab-Simulink, Toolbox, version 7.4.