



الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية
République Algérienne Démocratique Et Populaire
وزارة التعليم العالي والبحث العلمي
Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique
جامعة العربي التبسي - تبسة
Université Larbi Tebessi - Tébessa
معهد المناجم
Institut des Mines
قسم الإلكتروميكانيك
Département Electromécanique



MEMOIRE

Présenté en vue de l'obtention d'un diplôme de Master

Filière : Génie Minier

Option : Electromécanique Minière

Optimisation des efforts électrodynamiques dans les réseaux électriques THT

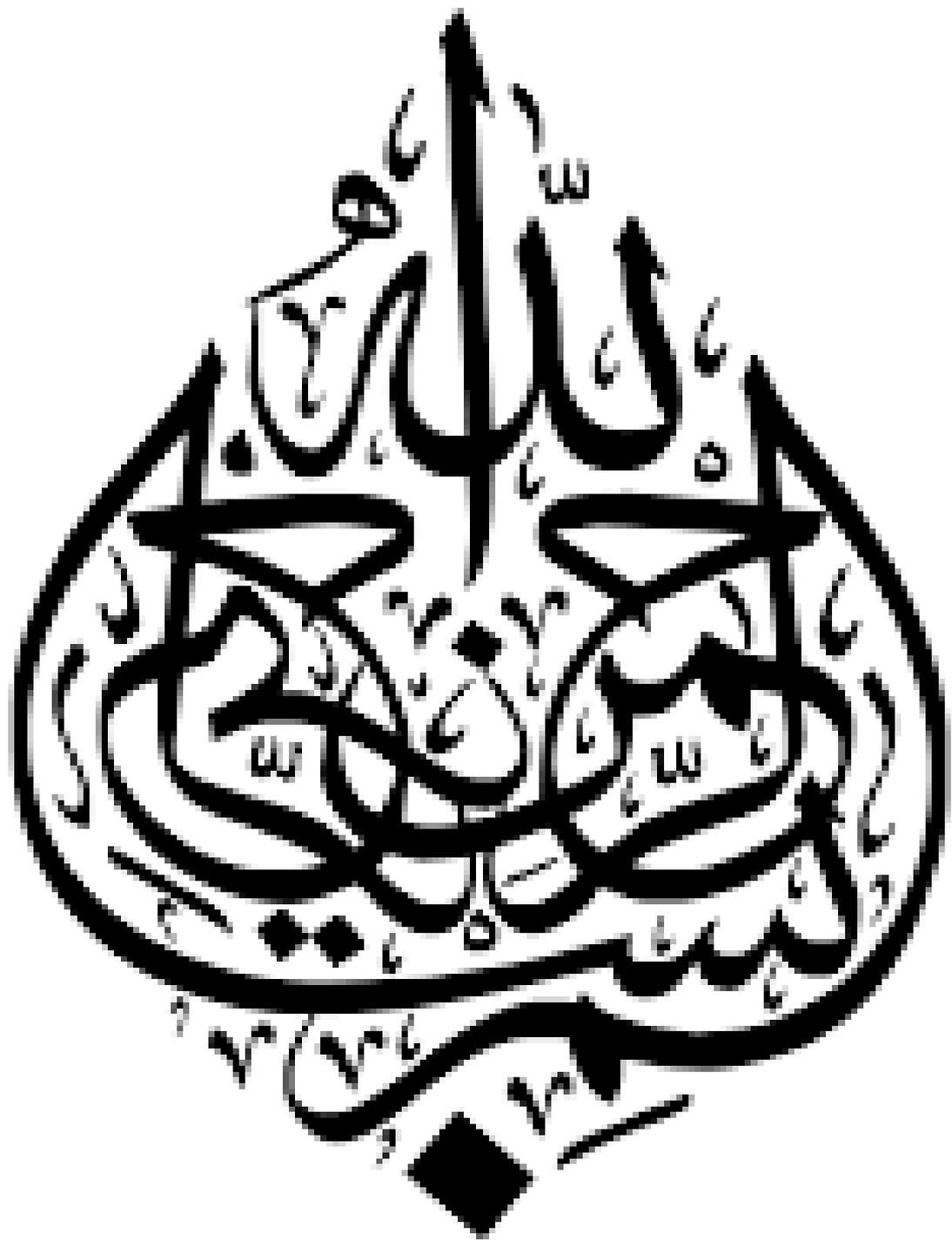
Par

Dahou Mbarka

Devant le jury :

Mr. Kara Mohammed	Pr	Président	Université Larbi TebessiTébessa
Mr.Soudani Mohammed Saleh	MAA	Encadreur	Université Larbi TebessiTébessa
Mr.Racheche Abdelkrim	MAA	Examineur	Université Larbi TebessiTébessa

Promotion 2020-2021





REMERCIEMENTS

Avant tout ; nous remercions dieu le tout puissant de nous avoir donné courage, patience et force durant toutes ces années d'étude et que grâce à lui ce travail a pu être réalisé

J'adresse mes plus sincères remerciements à ma mère, le paradis de ma vie, mon père, mon âme et mon modèle, et toute ma famille pour leur soutien et leur confiance dans ma réussite.

*Des mots sont parsemés d'encre et d'amour sur les feuilles de papier pour tous ceux qui m'ont appris et qui ont enlevé le nuage d'ignorance que j'ai traversé et corrigé mes faux pas depuis cette chaire. J'adresse un salut de remerciement et de respect au **Mr SOUDANI MOHAMED SALEH** pour sa motivation, ses encouragements, sa confiance en moi et la supervision de mon humble travail*

*J'adresse mes remerciements à Monsieur **RECHRACH el-hachmi** chef de subdivision maintenance postes HTB « Tébessa » qui*

*m'aider et orienter toute la période de stage, je tiens à remercier, **Mr. SEBTI, Mr SEGNI Mr BOUGUERA Kamal** et toute l'équipe de GRTE « Tébessa » qui a contribué de près ou de loin au bon acheminement de cette formation*

Nous remercions au département de génie minier de l'université de Tébessa et à tous les enseignants qui nous enseignés durant les années du cursus.

*Nos remerciements sont également adressés aux membres de jury **Mr RACHECH** et **Mr KARA** qui ont accepté de juger ce travail.*

Enfin nous remercions aussi toutes les personnes qui nous ont aidés de près ou de loin à la rédaction de ce travail

Brkouka.....



The background of the page is decorated with several large, soft pink flowers, possibly peonies, with delicate petals and visible centers. The flowers are arranged in a way that frames the central text, with some appearing at the top, bottom, and sides. The overall aesthetic is gentle and romantic.

Dédicace

*A cœur vaillant rien d'impossible
A conscience tranquille est accessible
Quand il y a la soif d'apprendre
Tout vient à point à qui sait attendre
LES études sont avant tout
Notre unique et seul atout
Ils représentent la lumière de notre existence
L'étoile brillante de notre réjouissance
Souhaitant que le fruit de nos efforts fournis
Jour et nuit, nous mènera vers le bonheur fleuri
Nous prions Dieu que cette soutenance
Fera signe de persévérance Et que nous serions
enchantés Par notre travail honoré
Je dédie ce travail avec tous mes vœux de
bonheur, de santé et de réussite*

The background of the page is a soft, light pink color, decorated with several large, detailed pink cherry blossoms. The flowers are in various stages of bloom, with some showing their centers and others as buds. The overall aesthetic is gentle and romantic.

*A ma mère bien-aimée **Bakhita**, la prunelle
de mes yeux, la source de la tendresse, et un
exemple de dévouement qui n'a cessé de me
soutenir, de m'encourager et de prier pour moi ;
Peu importe combien vous parlez de votre s'il
vous plaît, je serai négligent dans votre droit et
injuste, alors je prie Dieu de vous protéger pour
que nous vous rendions votre faveur.*

*À mon père **RABEH**, mon bras de sécurité, mon
compagnon et ma source de réconfort. Aucun
mot ne peut exprimer l'amour et l'appréciation
que vous m'avez donnés tout au long de mes
années, et remercier Dieu pour votre présence et
votre soutien pour moi.*

*A mes très chère sœurs Bouchra ; Hafida ;
Zineb ; Zohra*

*A mes chers frères Abdelkader ; Toufik ;
Nacer*

A toute ma famille DAHOU

*A mes collègues : Bouchra ; Loubna ; Hanaa ;
Adel ; Yasser ; Mostafa ; Oussama ; Haroun ;
Anwar ; Hicham ; Abdellah .*

*Je remercie en particulier et j'ai toutes les
expressions de respect et*

*d'affection à Amina ; Afaf ; Abir ; Amani ;
Asma ; Assil ; Bouchra ; Bicha ; Batoule ;
Doudja ; Hadjou ; Marwa ; Nissa ; Oumaima ;
Oum Lkhir ; Salma ; Samira vous êtes vraiment
une merveilleuse amies je souhaite du succès.*

*Sans oublier toute la promotion de
2ème Année Master 2 mines.*

Barkouka.....

LE RESUME

Les réseaux de transport et de distribution d'électricité sont une partie essentielle de l'approvisionnement en énergie électrique de divers consommateurs haute, basse et moyenne tension. Nous avons d'abord présenté des généralités sur les réseaux électriques, puis parlé des défauts les plus importants auxquels ils sont confrontés « Le court-circuit », qui est causé par des facteurs internes et externes. Ces dysfonctionnements sont connus grâce au système de protection dont nous avons évoqué les bases les plus importantes. L'objectif principal de cette mémoire est d'étudier les défauts les plus courants rencontrés par les conducteurs électriques, c'est-à-dire la force dynamique résultante des défauts qui se produisent lors de la transmission électrique. La force dynamique produit des contraintes sur les chemins de courant et les équipements électriques et peut également déformer ou détruire les chemins de courant ainsi que des éléments de construction (tels que des isolateurs). Nous avons simulé la Méthode énergétique pour connaître et étudier les valeurs de cette force dynamique.

ABSTRACT

Electricity transmission and distribution networks are an essential part of the electrical energy supply to various high, low and medium voltage consumers. We first presented generalities about electrical networks, then talked about the most important faults they face "The short circuit", which is caused by internal and external factors. These malfunctions are known thanks to the protection system, the most important bases of which we have mentioned. The main objective of this dissertation is to study the most common faults encountered by electrical conductors, that is to say the dynamic force resulting from faults that occur during electrical transmission. The dynamic force produces stresses on current paths and electrical equipment and can also distort or destroy current paths as well as building elements (such as insulators). We simulated the Energy Method to know and study the values of this dynamic force.

المخلص

تعتبر شبكات نقل وتوزيع الطاقة الكهربائية جزء أساسي للتزود بالطاقة الكهربائية من أجل مختلف المستهلكين ذوي الجهد العالي و المنخفض والمتوسط. لقد عرضنا أولاً عموميات حول الشبكات الكهربائية ثم تكلمنا عن أهم الأعطال التي تواجهها "المس كهربائي" التي تسببها عوامل داخلية وخارجية. يتم معرفة هذه الأعطال عن طريق نظام الحماية التي قمنا بالتطرق إلى أهم أساسياته. الهدف الأساسي من هذه المذكرة هو دراسة أكثر العيوب التي تواجهها النواقل الكهربائية وهي القوة الديناميكية الناتجة عن الأعطال التي تحدث أثناء النقل الكهربائي، تنتج القوة الديناميكية ضغوط على المسارات الحالية والمعدات الكهربائية و يمكنها أيضاً أن تشوه أو تدمر المسارات الحالية وكذلك عناصر البناء (مثل عوازل). قمنا بمحاكاة طريقة الطاقة وذلك لمعرفة قيم القوة الديناميكية ودراستها.

Notations et Abréviations

HT	Haute Tension
THT	Très Haute Tension
HTB	haute tension de niveau B
MT	Moyenne Tension
BT	Basse Tension
THT	Très Haute Tension
Un	tension nominale
BTA	Basse Tension de niveau A
HTA	haute tension de niveau A
TBT	Très Basse Tension
SF6	l'hexafluorure de soufre
p	La puissance
I	Le courant
TC	transformateur de courant
TP	transformateur de potentiel
U	tension composée entre phases
Zcc	l'impédance du réseau amont ou point de défaut
R	résistances
X	réactances
Icc3	L'intensité de court-circuit triphasé
Icc2	L'intensité de court-circuit biphasé
Icc1	L'intensité de court-circuit monophasé
Icc0	L'intensité de court-circuit à la terre
v	tension simple
Va	Vecteur a
Vb	Vecteur b
Vc	vecteur c
C.E.I	la Commission électrotechnique internationale
DRD	Déclenchement ré enclenchement déclenchement
D	La distance
RL	Résistance de la ligne

Rd	Résistance de défaut.
Ll	Inductance de la ligne.
Xcc	La réactance de court-circuit
X _{0L}	La réactance linéique de la ligne.
L	Longueur de la canalisation.
S	Section de la canalisation
ρ	Résistivité de la ligne
x	Réactance linéique du câble (Ω/km)
Zd	l'impédance directe
Xl0	La réactance homopolaire
R	Élément résistif
L	Élément inductif
C	Élément capacitif
d	diamètre de conducteur en cm.
f	fréquence du réseau en Hz.
B	champ magnétique
ψ	le flux du champ magnétique
μ₀	la perméabilité magnétique du vide
φ	flux magnétique
F	Force magnétomotrice
W_m	l'énergie magnétique
M	les inductances mutuelles
\vec{H}	l'intensité du champ magnétique

Liste des figures

Chapitre I : Généralités sur les réseaux électriques

Figure I. 1	Les niveaux de tensions des réseaux.	5
Figure I. 2	Les structures topologiques des réseaux électriques	9
Figure I. 3	Exemple d'une structure d'un réseau maillé	10
Figure I. 4	La structure des réseaux en antenne	11
Figure I. 5	La structure des réseaux bouclés ou en coupure d'artère	12
Figure I. 6	Les différents éléments dans un poste	13
Figure I. 7	Jeux de barres.	14
Figure I. 8	Poste en cabine maçonnée	15
Figure I.9	Schéma d'un poste aérien sur poteau ou pylône	15
Figure I. 10	Les types des lignes.	18
Figure I.11	Les pylônes (poste HAMAMET 220kv).	19
Figure I. 12	Types de pylônes	20
Figure I. 13	Câble conducteur (poste HAMAMET 220kv).	21
Figure I. 14	Câble de garde (poste HAMAMET 220kv).	22
Figure I. 15	Isolateur (poste HAMAMET 220kv).	23
Figure I. 16	parafoudre (poste HAMAMET 220kv).	24
Figure I. 17	éclateurs	24
Figure I. 18	Mise à la terre des pylônes	25
Figure I. 19	Flèche et portée d'une ligne	26
Figure I. 20	Ligne galopante	27
Figure I. 21	Le centre de contrôle PCG HAMAMAT POSTE TEBESSA 220KV	28
Figure I. 22	Disjoncteur sf6 (poste HAMAMET 220kv).	29
Figure I. 23	transformateur220kv/90kv (poste HAMAMET 220kv).	30
Figure I. 24	autotransformateur.	31
Figure I. 25	Un Transformateur de courant (poste HAMAMET 220kv).	32
Figure I. 26	transformateur de tension (TP) (poste HAMAMET 220kv).	33
Figure I. 27	sectionneur (poste HAMAMET 220kv).	34
Figure I. 28	sectionneurs de mise à la terre (poste HAMAMET 220kv).	34
Figure I. 29	Circuit bouchon	35

Chapitre II : Phénomènes Lies Aux Efforts Electrodynamiques

Figure II. 1 Défaut simple	37
Figure II. 2 Défaut double.	38
Figure II. 3 Différents types de court-circuit.	43
Figure II. 4 Court-circuit triphasé.	45
Figure II. 5 Court-circuit biphasé isolé.	45
Figure II. 6 Court-circuit monophasé isolé.	46
Figure II. 7 Court-circuit à la terre.	46
Figure II. 8 Système déséquilibré triphasé obtenu en additionnant les trois systèmes équilibrés	47
Figure II. 9 Circuit équivalent des séquences.	48

Chapitre III : Protection Du Réseau Electrique

Figure.III.1 protections par relais	58
Figure.III.2 Chaîne de protection.	59
Figure.III.3 Les zones de protection d'un réseau électrique.	61
Figure.III.4 Localisateur de défaut numérique (poste HAMAMET 220kv).	67
Figure III.5 Protection de surcharge et max de I (poste HAMAMET 220kv)	69
Figure III.6 Protection à distance en absence d'un défaut.	73
Figure III.7 Protection à distance en présence d'un défaut	73
Figure III.8 Effets résistifs de la ligne	75
Figure III.9 effet inductif	76
Figure III.10 Effets capacitifs	77
Figure III.11 Phénomène de pincement sur un faisceau double	79

Chapitre IV : Optimisation des efforts électrodynamiques

Figure. IV.1 la règle du "bonhomme d'Ampère	82
Figure. IV.2 la loi de Biot & Savart.	83
Figure IV.3 La force de Laplace	83
Figure IV.4 Cas d'une disposition plate de triphasés conducteurs	84
Figure IV.5 Relatif à la méthode énergétique.	85
Figure IV.6 Schéma électrique équivalente de l'électraimant.	86

Figure IV.7 Interaction entre deux courants	87
Figure IV.8 Schema bloc d'un système(1)	90
Figure IV.9 de l'effort électrodynamique sans défaut .	91
Figure IV.10 Mesure la tension sans défaut	91
Figure IV.11 Mesure L'intensité sans défaut	92
Figure IV.12 Défaut monophasé à la terre phase A.	93
Figure IV.13 Défaut monophasé à la terre phase B	94
Figure IV.14 Défaut monophasé à la terre phase C .	95
Figure IV.15 Défaut biphasé phases AB.	96
Figure IV.16 Défaut biphasé phases AC.	97
Figure IV.17 Défaut biphasé phases BC.	98
Figure IV.18 Défaut biphasé phases AB à la terre.	99
Figure IV.19 Défaut biphasé phases AC à la terre.	100
Figure IV.20 Défaut biphasé phases BC à la terre.	101
Figure IV.21 Défaut triphasé ABC sans la terre.	102
Figure IV.22 Défaut triphasé ABC à la terre.	103
Figure IV.23 Défaut monophasé à la terre phase A (avec zoom).	104
Figure IV.24 Schema bloc d'un système(2)	105
Figure IV.25 la somme de courant du défaut triphasé ABC sans la terre.	106
Figure IV.26 Schema bloc d'un système(3)	107
Figure IV.27 l'effort électrodynamique (1) ;(2) mesuré sur les phases A ;B ;C .	108

Liste des tableaux

Tableau I. 1	Définition des niveaux de tension	7
Tableau IV.1	Détail de l'application variation de distance et de court-circuit.	89
Tableau IV.2	Détail l'application de court-circuit.	92
Tableau IV.3	Détail de l'application variation de distance.	106



Table des matières



Table des matières

Remerciements	
Dédicace	
Le résumé	V
Notations et abréviations	VI
Liste des figures	VIII
Liste des tableaux	XI
Introduction générale	2

Chapitre I : Généralités sur les réseaux électriques

I.1 Introduction	5
I.2 Rôle réseau électrique	6
I.3 Généralité sur les réseaux électriques	6
I.4 Les niveaux de tensions	7
I.5 Système de transformation	8
I.6 Différents types de réseaux électriques	8
I.7 Architecture des réseaux	10
I.8 Les postes électriques	12
I.9 Les différents éléments de poste électrique	13
I.10 Jeux de barres	14
I.11 Les poste de transformations MT/BT	14
I.12 Les différents types de postes de livraison	15
I.13 Structure d'un poste HTA/BT	17
I.14 Lignes	17
I.15 Lignes aériennes	18
I.15.1 Composants des lignes aériennes	18
I.15.2 Propriétés des lignes de transport	26
I.16 Lignes galopantes	26
I.17 Effet couronne - interférences radiophoniques	27
I.18 Pollution	27
I.19 Le centre de contrôle	27
I.20 Le système de protection	28
I.20.1 Rôle d'une protection	28
I.20.2 Disjoncteur à haute tension	29

I.20.3 Transformateur électrique	29
I.20.4 Autotransformateur électrique	30
I.20.5 transformateur de courant « TC »	31
I.20.6 Transformateur de tension	32
I.20.7 Les sectionneurs	33
I.20.8 Sectionneur de mise à la terre	34
I.20.9 Circuit bouchon haute tension	34
I.20.10 Les fusibles	35
I.21 Conclusion	35

Chapitre II : Phénomènes Lies Aux Efforts Electrodynamiques

II.1 Introduction	37
II.2 Caractéristiques des défauts	37
II.3 Phénomènes lies au courant et la tension électrique	39
II.3.1 Les surintensités	40
II.3.2 Rigidité diélectrique	40
II.3.3. Isolant électrique	40
II.3.4 Claquage électrique	40
II.3.5 Les efforts électrodynamiques	41
II.3.6 L'arc électrique	41
II.3.7 Les oscillations	41
II.3.8 Le court-circuit	42
II.3.9 Les surtensions	49
II.3.10 La surcharge	50
II.3.11. Les dés équilibrés	52
II.3.12 Chutes de tensions	52
II.3.13 L'effet de la foudre	53
II.4 Régime du neutre	53
II.5 Conclusion	54

Chapitre III : Protection Du Réseau Electrique

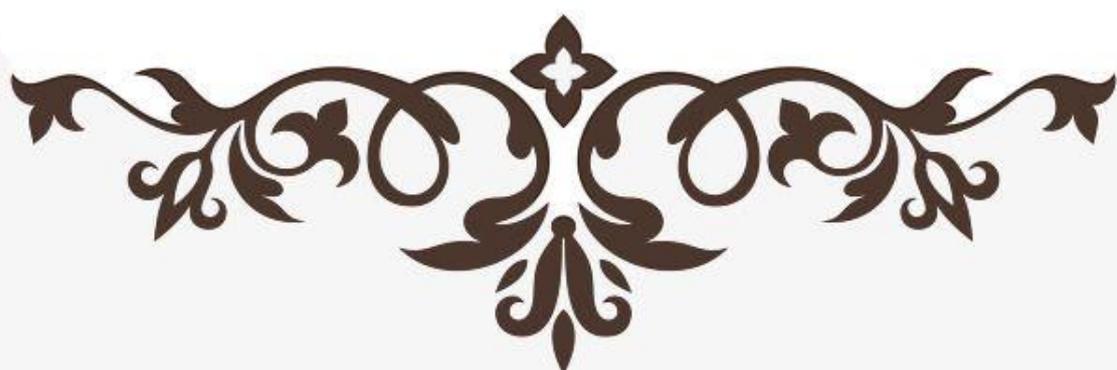
III.1 Introduction	56
III.2 Rôle de protection	56
III.3 Philosophie de réglage des protections des réseaux de SONELGAZ	57
III.4 Plan de protection	58

III.4.1 Définition d'un système de protection	58
III.4.2 Rôle d'une protection	58
III.4.3 Constitution d'un système de protection	59
III.4.4 Constitution d'un système de protection	59
III.5 Zone de Protection	61
III.6 Protection d'un poste d'interconnexion	61
III.6.1 Caractéristiques générales des plans de protections	61
III.7 Protection des lignes T.H.T d'interconnexion	64
III.7.1 Lignes aériennes longues	64
III.8 Protection des transformateurs T.H.T/H.T	67
III.8.1 Protections internes	67
III.8.2 Protection externe	68
III.8.3 Protection par parafoudre	70
III.9 Résistance aux efforts électrodynamiques	70
III.10 Caractéristiques diélectriques	70
III.11 Disjoncteurs	70
III.12 Les relais de protection	71
III.13 Le signal de défauts	71
III.14 Protection de distance	72
III.15 Modèle électrique d'une ligne	74
III.15.1 la résistance de la ligne	75
III.15.2 Inductance de la ligne	76
III.15.3 La capacité de la ligne	77
III.16 Phénomène d'effort électrodynamique	78
III.17 Pincement dans un faisceau de conducteurs	78
III.17.1 Description du phénomène	78
III.18 Conclusion	79
Chapitre IV : Optimisation des efforts électrodynamiques	
IV.1 Introduction	81
IV.2 Efforts électrodynamiques	81
IV.3 Origine des efforts électrodynamiques	81
IV.4 Méthodes de calcul des efforts électrodynamiques	82
IV.4.1 Loi de Biot et Savart	82

IV.4.2 Théorème d'Ampère	83
IV.4.3 Méthode de la formule de Laplace	83
IV.4.4 Théorème de Maxwell	84
IV.4.5 Méthode énergétique	85
IV.5 Stabilité électrodynamique des équipements électriques	89
IV.6 Application et résultats	89
IV.7 Modélisation du phénomène physique	89
IV.8 Résultats et discussion	90
IV.8.1 Résultats et interprétation	90
IV.8.2 Simulation de variation de la distance entre les Tébessa et clients imaginaires	106
IV.9 Conclusion	109
Conclusion générale	111
Bibliographie	113



Introduction générale



INTRODUCTION GENERALE

L'électricité est une énergie non stockable qui doit être produite, transportée et distribuée par la société de production ; la société de transport et la société de distribution d'électricité pour sa consommation.

Le réseau électrique est un ensemble d'infrastructures qui permet le transport de l'énergie électrique des centres de production vers les consommateurs.

Le réseau électrique est constitué de lignes électriques fonctionnant à différents niveaux de tension interconnectées avec des sous stations constituées de plusieurs éléments (Jeux de barres ; disjoncteur ; des sectionneurs ; transformateurs électriques ; autotransformateurs électriques ; parafoudre ; transformateurs de courant et de tension). Ces stations permettent la continuité de la distribution électrique et la transmettent d'une tension à une autre à l'aide de transformateurs.

L'électricité est transmise par des lignes à très haute tension, alors qu'elle transmet de l'électricité, elle est soumise à de nombreuses perturbations (court-circuit) dues à divers phénomènes comme les coups de foudre, les arbres mal élagués, des engins ou des grues de grande hauteur travaillant au voisinage, le vent, la pollution...etc. A une augmentation de l'énergie, ces perturbations entraînent la formation d'une force dynamique qui affecte négativement les différentes parties des installations dans les réseaux électriques.

Pour résoudre ce problème, il faut d'abord le définir et s'avoir tous ces causes et ces conséquences.

Notre problématique et la suivante : optimisation des efforts électrodynamiques dans les réseaux électriques.

Dans le premier chapitre on l'a consacré à définir des généralités sur les réseaux électriques, l'architectures et l'exploitation de ces différents types de réseaux ;

Dans le deuxième chapitre, on l'a consacré aux types des défauts des efforts électrodynamiques. La cause et les conséquences de ces efforts, aussi les différentes méthodes mathématiques utilisées pour le calculer ;

Dans le troisième chapitre, présente le système de protection et la Philosophie de réglage des protections des réseaux pour le protéger des dangers des efforts électrodynamiques ;

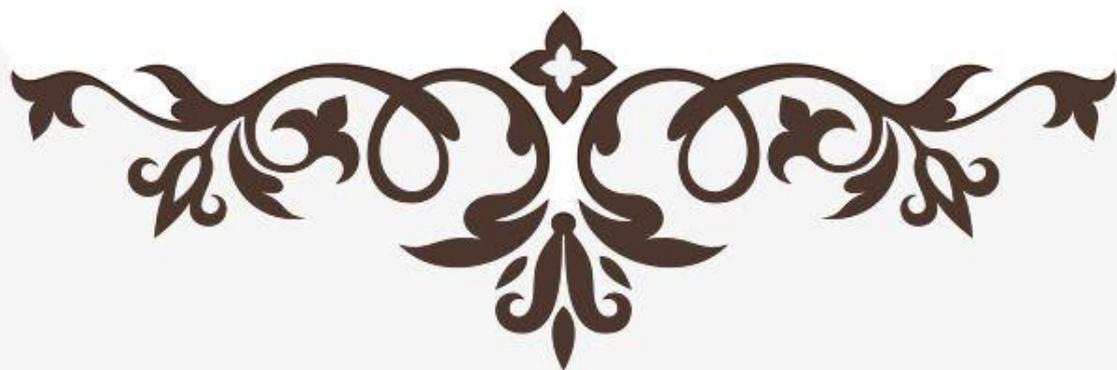
Dans le quatrième chapitre, la modélisation de la méthode énergétique sur les lignes qui subit ces efforts électrodynamiques par le biais du SIMULINK/MATLAB.

Ce mémoire se termine par une conclusion générale dans laquelle on cite les grandes lignes de ce travail et résume les principaux résultats obtenus.



Chapitre I

Généralité sur les réseaux électrique



I.1 Introduction

On appelle réseau électrique, l'ensemble des infrastructures permettant d'acheminer l'énergie électrique des centres de production vers les consommateurs d'électricité.

Le réseau est constitué de lignes électriques exploitées à différents niveaux de tension, connectées entre elles dans des postes électriques, qui permettent de répartir l'électricité et de la faire passer d'une tension à l'autre grâce aux transformateurs.

Un réseau électrique doit aussi assurer la gestion dynamique de l'ensemble de production-transport-distribution (consommation), mettant en œuvre des réglages ayant pour but d'assurer la stabilité de l'ensemble [1].

L'origine, du réseau électrique a été construit et dimensionné pour transporter l'énergie électrique produite par les centres de production jusqu'aux consommateurs d'autre part le réseau électrique doit répondre à certaines exigences, telle la stabilité du courant et la continuité de service par l'assurance de l'alimentation électrique vers consommateurs.

Les lignes de transport et les postes de transformations HT constituent une partie essentielle d'un réseau électrique. Nous allons dans ce chapitre présenter les différentes structures pour chaque réseau, ainsi son niveau de tension [2].

En Algérie, ce service est assuré par la SONELGAZ qui est une société nationalisée à cet effet, SONELGAZ à une triple mission [2]:

- ❖ Produire l'énergie dans des centrales (thermiques ou autres ...).
- ❖ Transport d'énergie par des lignes à haute tension HTA ou très haute tension HTB.
- ❖ Distribuer cette énergie aux usagers en basse tension BTB.

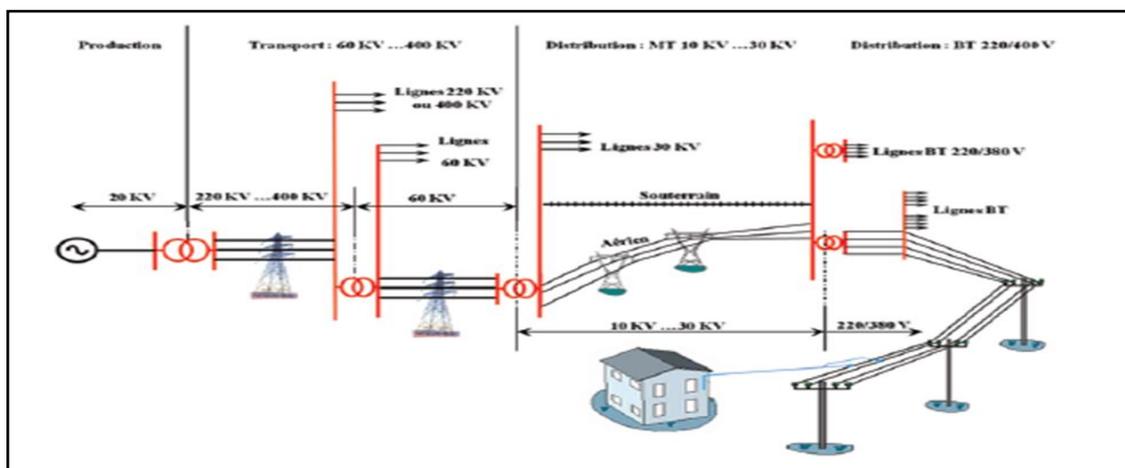


Figure I. 1 Les niveaux de tensions des réseaux [1].

I.2 Rôle du réseau électrique

Le courant alternatif s'est généralisé avec l'évolution technologique qui a permis d'adapter les tensions à des puissances importantes grâce aux transformateurs.

Le réseau électrique est hiérarchisé par niveau de tension, celui-ci est fractionné en trois principales subdivisions à savoir le réseau de transport, de répartition et de distribution. Une notion de frontière peut être définie entre les niveaux de tension du réseau électrique ; ces frontières sont assurées par les postes sources et les transformateurs [3].

I.3 Généralité sur les réseaux électriques

Les réseaux sont traditionnellement décomposés en trois parties [4]:

- La source d'énergie : la production ;
- Le transfert de masse : le transport ;
- La fourniture aux consommateurs individuels : la distribution.

I.3.1. Production d'énergie électrique

La production sert à produire l'énergie électrique soit à travers la transformation de l'énergie mécanique des turbines pour tourner les alternateurs à partir des sources primaires (comme le gaz, le pétrole, le carbone et le nucléaire), soit en utilisant les sources renouvelables qui sont l'énergie solaire, éolienne, hydraulique, géothermique, marine et la biomasse [4].

I.3.2. Transport d'énergie électrique

Beaucoup de gros générateurs exigent un accès facile à leur fourniture de combustible et d'eau de refroidissement, ils ne peuvent pas être placés près des zones de consommation majeure. Des contraintes environnementales peuvent aussi écarter une situation proche des zones de consommation. Un réseau de transport d'énergie est donc nécessaire entre les générateurs et les consommateurs.

Le réseau de transport (en Algérie 220kV, 400kV) ou réseau de haute tension de niveau B (HTB) est généralement en courant alternatif et aérien a une architecture maillée, ainsi les productions ne sont pas isolées mais toutes reliées entre elles, cette structure permet une sûreté de fonctionnement accrue et assure la continuité du service ou d'alimentation en cas d'aléas comme la perte d'une ligne, d'une production, etc. En effet, lors de l'ouverture d'une ligne, le fait d'avoir cette structure maillée permet au flux de puissance de trouver un nouveau chemin pour contourner cette ligne en défaut et

donc de garantir la continuité de l'alimentation en aval du problème. C'est à ce niveau de tension que sont assurées les interconnexions entre régions au niveau nationale et les échanges (importation/exportation) d'énergie électrique au niveau internationale, en 400 kV). Si un trajet aérien de la ligne est impossible à cause de l'encombrement en zone urbaine ou pour des raisons environnementales, des câbles enterrés peuvent être employés, mais le coût est 15 à 20 fois plus élevé que celui de la ligne aérienne équivalente. Dans les traversées maritimes, un câble sous-marin est la seule solution, mais celui-ci est souvent en courant continu [4].

I.4 Les niveaux de tensions

Les niveaux de tension utilisés pour le transport sont différents d'un pays à un autre, mais une tendance à une normalisation existe. Font partie du réseau de transport toutes les lignes dont le niveau de tension est supérieur ou égale à 60kV. En Algérie les tensions usitées pour le transport sont de 60KV, 220KV et en cours de finalisation la gamme de 400KV ; Il est important de citer aussi les gammes 90KV et 150KV qui existe encore à l'est du pays [2].

Selon la norme CEI38, les tensions dans le réseau électrique sont classées en trois catégories, Haute Tension (HT) Moyenne Tension (MT) et Basse Tension (BT) Avec [2]:

- ✓ HT (THT et HT) : pour une tension composée comprise entre 40 kV et 1000kV ;
- ✓ Les valeurs normalisées sont : 45 kV - 66 kV - 110 kV - 132 kV - 150 kV – 220kV;
- ✓ MT : pour une tension composée comprise entre 1000 V et 35 kV ;
- ✓ Les valeurs normalisées sont : 3,3 kV - 6,6 kV - 11 kV - 22 kV - 33 kV ;
- ✓ BT : pour une tension composée comprise entre 100 V et 1000 V ;
- ✓ Les valeurs normalisées sont : 400 V - 690 V - 1000 V (à 50 Hz).

De nouveaux domaines de tension sont définis actuellement, et selon UTE C 18-510, ils sont:

Domaine haute tension (HT)	Domaine basse tension (BT)
HTB : $U_n > 50\,000(V)$	BTB : $500 < U_n < 1000 (V)$
HTA : $1000 < U_n < 50.000(V)$	BTA : $50 < U_n < 500 (V)$
/	TBT : $U_n < 50 (V)$

Tableau I. 1 Définition des niveaux de tension [4].

I.5 Système de transformation

Pour transporter une énergie électrique à grande distance, il est essentiel, sur le plan économique, de minimiser l'énergie gaspillée par effet Joule le long de la ligne de transport, la solution la plus rentable consiste à élever le niveau de la tension au départ pour le ramener à une tension plus basse, éventuellement la tension de départ, au point d'utilisation. Les deux opérations de changement de tension sont effectuées par des transformateurs [5].

I.6 Différents types de réseaux électriques

Les réseaux électriques se décomposent en cinq grands types de réseaux [1] :

- ❖ Le réseau d'interconnexion ;
- ❖ Le réseau de transport ;
- ❖ Le réseau de répartition ;
- ❖ Le réseau de distribution MT ;
- ❖ Le réseau de distribution BT.

I.6.1 Réseau de transport

Les réseaux de transport sont constitués des lignes à très haute tension (THT) et haute tension (HT). La fonction de ces réseaux est de collecter la puissance produite par les centrales importantes et de l'acheminer vers les zones de consommation [1].

I.6.2 Réseau d'interconnexion

Les réseaux d'interconnexion assurent la liaison entre les centres de production et permettent des échanges d'énergie entre différentes régions et même avec les autres pays voisins [1].

I.6.3 Le réseau de répartition

Il est généralement à plus basse tension et donc moins dispendieux et contraignant à installer et opérer. De plus, son rôle est de répartir la puissance vers les centres de charges dans un rayon d'environ 100 kilomètres d'un poste de répartition. Le réseau de répartition est donc formé des lignes et des postes alimentant le réseau de distribution à partir du réseau de transport. Généralement, le réseau de répartition est aérien. Il existe aussi certaines installations de répartition souterraines. Certaines entreprises grandes consommatrices d'énergie sont parfois branchées directement au réseau de répartition sans passer par le réseau de distribution [2].

I.6.4 Réseaux de distribution

Ces réseaux alimentent un grand nombre d'utilisateurs, soit directement pour des puissances allant jusqu'à quelques MW, soit après transformation en basse tension [1].

a) Réseaux de distribution à moyenne tension MT [6]

- ❖ HTA (30 et 10 kV le plus répandu) ;
- ❖ Neutre à la terre par une résistance ;
- ❖ Limitation à 300 A pour les réseaux aériens ;
- ❖ Limitation à 1000 A pour les réseaux souterrains ;
- ❖ Réseaux souterrains en boucle ouverte.

b) Réseaux de distribution à basse tension BT [6]

- ❖ BTA (230 / 400 V) ;
- ❖ Neutre directement à la terre ;
- ❖ Réseaux de type radial, maillés et bouclés ;

La (Figure I.2) montre le schéma général des réseaux électriques (Hiérarchisation par niveau de tension).

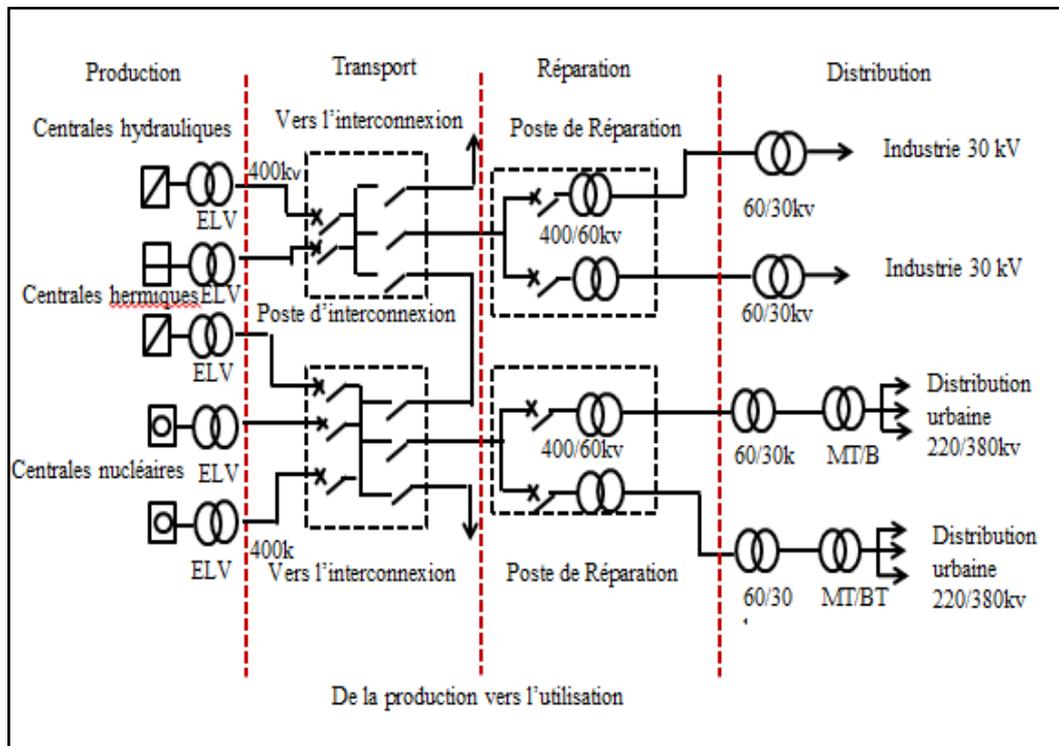


Figure I. 2 Les structures topologiques des réseaux électriques [1].

I.7 Architecture des réseaux

L'architecture d'un réseau électrique est définie suivant le niveau de tension, la puissance demandée et la sûreté requise. A partir de ces trois paramètres, on définit trois types de structures pour un réseau électrique [1] :

a) Les réseaux maillés

Sont des réseaux où toutes les lignes sont bouclées. Cette structure nécessite que tous les tronçons de lignes soient capables de surcharges permanentes, et qu'il soit muni, a leurs deux extrémités, d'appareils de coupure. On obtient ainsi la meilleure sécurité, mais au prix le plus élevé (figure I-3) [3].

◆ Avantages

Le réseau maillé est caractérisé par [1] :

- Une grande sécurité d'exploitation ;
- Une chute de tension réduite.

◆ Inconvénient

Les dépenses pour la réalisation d'un tel réseau sont énormes et nécessite des protections sophistiquées [1].

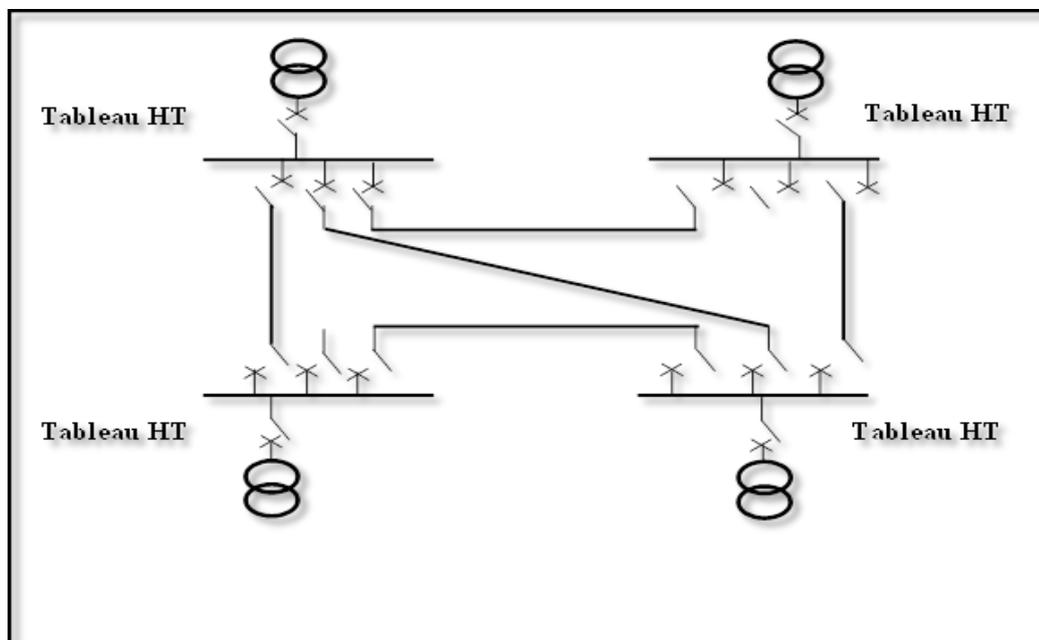


Figure I.3 Exemple d'une structure d'un réseau maillé [1].

b) Les réseaux radiaux

C'est le réseau le plus simple du point de vue conception. Il est disposé de façon à ce qu'en partant du point d'alimentation, toutes les lignes sont développées en antennes et alimentées par une seule ligne principale (figure I-4) [1].

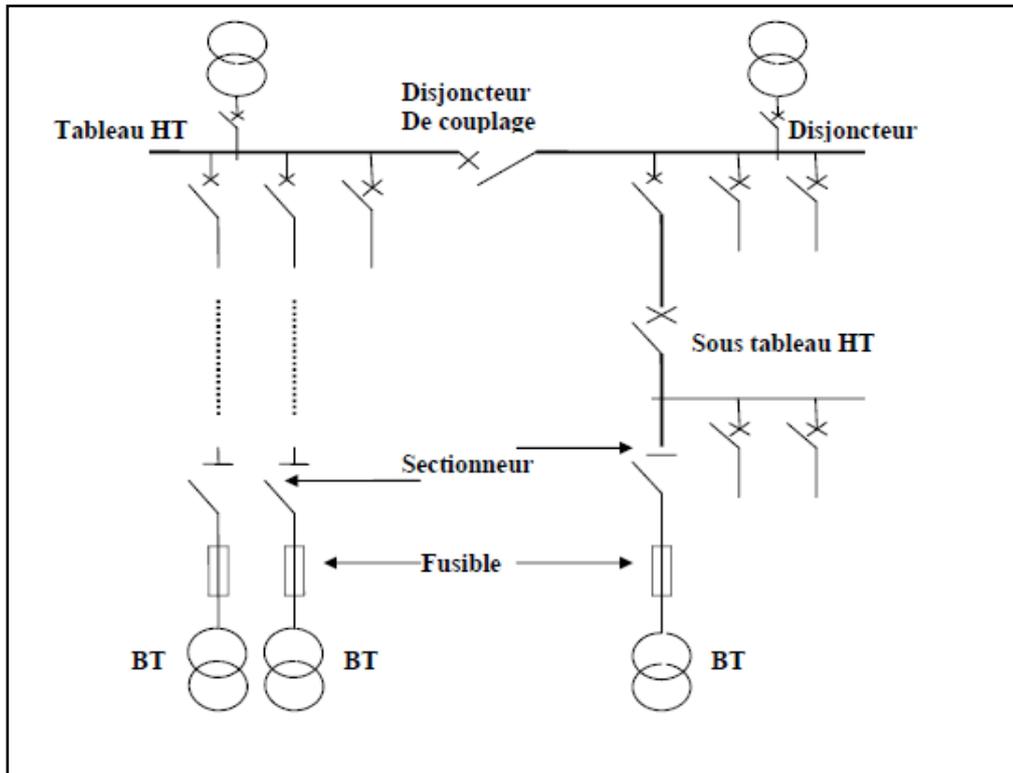


Figure I. 4 La structure des réseaux en antenne [1].

◆ Avantages

Les avantages d'un réseau radial sont [1] :

- Facilité de construction et d'exploitation ;
- Les dépenses pour la réalisation et la protection d'un tel réseau sont minimales.

◆ Inconvénient

Ce réseau possède un inconvénient majeur qui est le déclenchement du disjoncteur principal qui entraîne une interruption du service pour tous les usagers en aval, en cas d'avarie sur une ligne [1].

C) Les réseaux en boucle

Le schéma en boucle ouverte permet la réalimentation de tout client, en cas d'incident ou de défaut sur l'un des éléments de la boucle, par report de l'alimentation sur la partie saine de la boucle (figure I-5) [2].

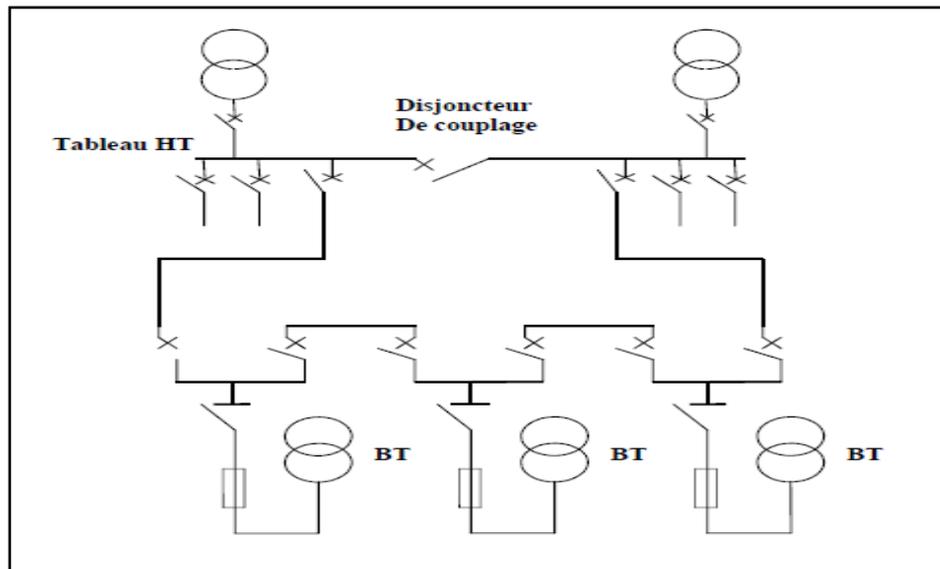


Figure I. 5 La structure des réseaux bouclés ou en coupure d'artère [1].

◆ **Avantages**

Ce type de réseau possède l'avantage [1] :

- D'avoir une meilleure continuité de service ;
- D'être facile à construire et à étudier.

◆ **Inconvénient**

La construction d'un tel réseau est plus coûteuse que celle d'un réseau radial et il est plus difficile à exploiter [1].

I.8 Les postes électriques

Selon la définition de la Commission électrotechnique internationale CEI : « un poste électrique est la partie d'un réseau électrique, située en un même lieu, comprenant principalement les extrémités des lignes de transport ou de distribution, de l'appareillage électrique, des bâtiments, et, éventuellement, des transformateurs » [4].

I.8.1 Types de postes

On distingue, suivant les fonctions qu'ils assurent, trois grandes catégories de postes électriques [4] :

I.8.1.1 Les poste à fonction d'interconnexion

Qui comprennent à cet effet un ou plusieurs points communs triphasés appelés jeu de barres, sur lesquels différents départs (lignes, transformateurs, etc.) de même tension peuvent être aiguillés.

I.8.1.2 Les poste de transformation

Dans lesquels il existe au moins deux jeux de barres à des tensions différentes liés par un ou plusieurs transformateurs

I.8.1.3 Les postes mixtes

Les plus fréquents, qui assurent une fonction dans le réseau d'interconnexion et qui comportent en outre un ou plusieurs étages de transformation

I.9 Les différents éléments de poste électrique

On distingue parfois les éléments d'un poste en « éléments primaires » (les équipements moyenne tension) et "éléments secondaires"(équipements basse tension) [3].

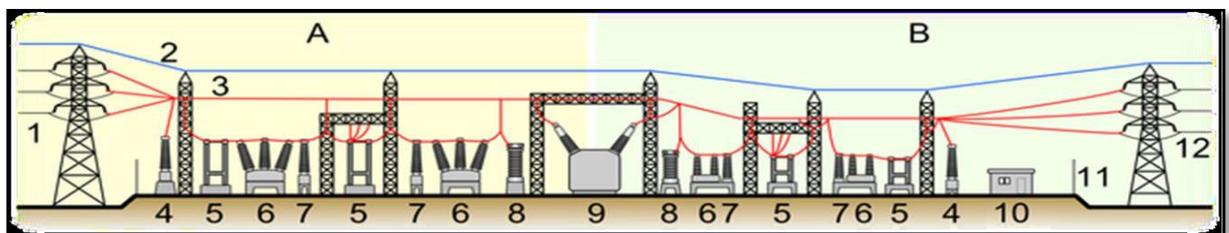


Figure I. 6 Les différents éléments dans un poste [4].

A : côté primaire, **B** : côté secondaire.

1. Ligne électrique primaire ; 2. Câble de garde ; 3. Ligne électrique ; 4. Transformateur de tension ; 5. Sectionneur ; 6. Disjoncteur ; 7. Transformateur de courant ; 8. Parafoudre ; 9. Transformateur (de puissance) ; 10. Bâtiment secondaire ; 11. Clôture ; 12. Ligne électrique secondaire.

Parmi les équipements primaires, on peut citer :

- Transformateur électrique ;
- Autotransformateur électrique ;
- Sectionneur ;
- Sectionneur de mise à la terre ;
- Parafoudre ;
- Transformateur de courant ;
- Transformateur de tension ;
- Combiné de mesure (courant+ tension) ;
- Jeux de barres.

Parmi les éléments secondaires on peut citer :

- Relais de protection ;
- Équipements de surveillance :
- Système de télé conduite ;
- Équipements de télécommunication ;
- Comptage d'énergie ;
- Équipements de contrôle.

I.10 Jeux de barres

Le jeu de barres est constitué de tubes en cuivre ou en aluminiums rigide, leur section dépend du transit de courant appelée à circuler dans le poste et de la puissance de court-circuit. C'est le point d'arrivée du courant, cette énergie sera ensuite répartie entre les divers circuits à alimenter lignes et transfo.

La performance principale qui caractérise un jeu de barres est sa tenue au courant de court-circuit, c'est-à-dire, le courant maximal qu'il est capable de supporter sans aucune défaillance [7].

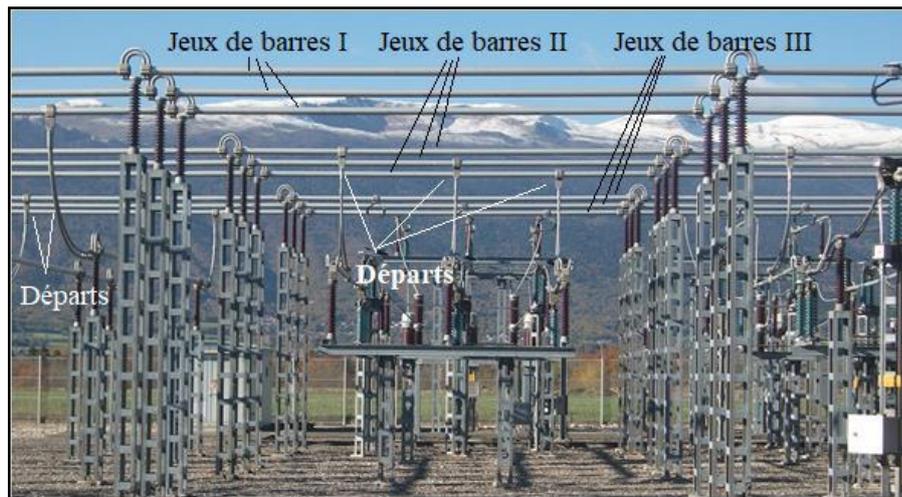


Figure I. 7 Jeux de barres [8].

I.11 Les poste de transformations MT/BT

On rencontre essentiellement 2 types de postes de transformation MT/BT en cabine Maçonnée, aérien sur poteau ou pylône [9].

I.11.1 Poste en cabine maçonnée

C'est le modèle le plus répandu actuellement. Il constitue en lui-même une unité complète comportant le transformateur MT/BT (Matériel d'interruption, de protection) [9].



Figure I. 8 Poste en cabine maçonnerie [9].

I.11.2 Poste aérien sur poteau ou pylône

Ce poste est d'une conception nettement périmée à l'heure actuelle. Sa structure électrique est rigoureusement identique à celle du poste en cabine maçonnerie, mais l'ensemble du matériel est monté à l'air libre en haut d'un poteau [9].



Figure I.9 Schéma d'un poste aérien sur poteau ou pylône [10].

I.12 Les différents types de postes de livraison

On peut classer les postes HTA/BT en deux catégories.

I.12.1 Les postes d'extérieur

a) Poste sur poteau : puissances 25 – 50 – 100 kVA.

Le transformateur et l'appareillage sont fixes sur le poteau, l'alimentation est aérienne, le départ s'effectue en aérien ou en souterrain.

Protection : Côté haute tension, protection contre la foudre par éclateur. Côté basse tension, un disjoncteur protège le transformateur contre les surintensités [11] [12].

b) Postes préfabriqués

- **En bas de poteau** : puissances 100 à 250 kVA ;
- **Poste compact** : puissances 160 à 1 250 kVA.

Ces postes peuvent être soit en bas de poteau soit sur une plate-forme extérieure. Le raccordement s'effectue par câble soit au réseau aérien, soit au réseau souterrain. Le tableau BT comporte un interrupteur avec fusibles ou un disjoncteur avec coupure visible [11] [12].

c) Poste maçonné traditionnel : puissances 160 à 1 250 kVA.

I.12.2 Les postes d'intérieur

a) Postes ouverts maçonnés ou préfabriqués ;

b) Postes en cellules préfabriquées métalliques

Puissances sont comprises entre 100 et 1 250 kVa. Le comptage BT doit être remplacé par un comptage HT dès que l'installation dépasse 2 000 A, où s'il existe plusieurs transformateurs.

L'installation d'un poste de livraison en intérieur se justifie lorsqu'on doit protéger l'appareillage HT et BT du poste contre les fortes variations de température, ou dans le cas de puissances importantes. L'appareillage HT est sous enveloppe métallique (cellules préfabriquées métalliques); ils présentent l'avantage d'une meilleure sécurité, et d'une mise en place rapide [11] [12].

I.12.3 Rôle du poste

Un poste électrique est l'élément principale du réseau électrique servant à la fois transformation et à la distribution d'électricité, il permet d'élever la tension électrique pour sa transmission puis de l'abaisser en vue de sa distribution pour les utilisateurs (clients haute tension ou distribution). Les postes hautes tension se trouvent aux extrémités des lignes THT-HT-MT.

Les postes électriques ont trois fonctions principales :

- Raccordement d'une centrale électrique au réseau d'électricité.

- L'interconnexion entre les différents postes (assurer la réparation de l'électricité entre les différentes lignes issues du poste).
- La transformation de l'énergie en différents plans de tension.

Pour les transformations de l'énergie électrique, il est économiquement intéressant d'augmenter les tensions car cela limite les déperditions d'énergie par effet joule.

Les tensions utilisées sont généralement 60kv, 90kv, 150kv, 220kv, 400kv qualifiés de très hautes tensions [7].

I.13 Structure d'un poste HTA/BT

Le poste de livraison comporte essentiellement de l'appareillage et un ou plusieurs transformateurs afin d'assurer les fonctions suivantes [12]:

- Dérivation du courant sur le réseau ;
- Protection du transformateur côté HT ;
- Transformation HTA/BT ;
- Protection du transformateur côté BT ;

- **Comptage d'énergie** : Toutes les masses métalliques du poste sont reliées à la terre. Pour l'intervention dans le poste, les arrivées doivent être sectionnées et les câbles reliés entre eux mis à la terre [2].

I.14 Lignes

L'énergie produite par les différents sites de production doit être acheminée sur tout le territoire. Cet acheminement est réalisé par des lignes aériennes ou souterraines [11].

I.14.1 Lignes aériennes

A haute et très haute tension, les lignes de transport sont aériennes dans leur grande majorité. Elles sont constituées de conducteurs nus en alliage d'aluminium et de supports (pylônes). Leur diamètre augmente avec la puissance à transporter.

I.14.2 Lignes Souterraines

Les liaisons souterraines nécessitent des câbles de fabrication plus complexe. Ils sont constitués d'une partie conductrice centrale en cuivre ou en aluminium, l'âme du câble, entourée d'une gaine isolante en matière synthétique.

En MT, ces câbles sont enterrés dans de simples tranchées.

En HT et THT, c'est un peu plus compliqué. Le recours aux liaisons souterraines s'impose surtout pour des raisons de sécurité ou d'esthétique.



Lignes aériennes

les câbles souterrains

les câbles sous-marins

Figure I. 10 Les types des lignes [4].

I.15 Lignes aériennes

I.15.1 Composants des lignes aériennes

Une ligne aérienne est composée de pylônes (supports), de câbles conducteurs et des isolateurs, des éclateurs, accessoires

a) Les pylônes

Pour les lignes aériennes, des pylônes, généralement réalisés en treillis d'acier supportent et maintiennent les conducteurs à une distance suffisante du sol et des obstacles : ceci permet de garantir la sécurité et l'isolement par rapport à la terre, les câbles étant nus (non isolés) pour en limiter le poids et le coût. L'inconvénient est leur exposition aux intempéries (embruns salés, tempêtes, poids de la glace qui peut les endommager). La distance entre les fils conducteurs doit être suffisante pour empêcher leur contact, même sous l'action d'un vent violent. L'écartement entre les fils doit être d'autant plus grand que la distance entre les pylônes est plus grande et que la tension de la ligne est plus élevée. Par exemple, l'écartement entre les phases est habituellement de 12 m sur les lignes à 735 kV [3].

Le rôle des pylônes est de maintenir les câbles à une distance minimale de sécurité du sol et des obstacles environnants, afin d'assurer la sécurité des personnes et des installations situées au voisinage des lignes. Le choix des pylônes se fait en fonction des lignes à réaliser, de leur environnement et des contraintes mécaniques liées au terrain et aux conditions climatiques de la zone. Leur silhouette est caractérisée par la disposition des câbles conducteurs. Pour les lignes à très haute tension, on a recours à des pylônes composés d'un treillis en acier. Plus la tension est élevée, plus l'envergure est grande et plus les poteaux sont élevés [13].



Figure I. 11 Les pylônes (poste HAMAMET 220kv).

a.1 Types de pylônes

➤ Pylône nappe

C'est le pylône le plus utilisé pour les lignes de transport surtout du type chat (en Algérie). Il est d'usage fréquent pour les lignes HTA et HTB. Il sert aux paliers de tension allant de 110 KV à 735 KV. Ce pylône convient aux lignes qui traversent des terrains très accidentés, car il peut être assemblé facilement [4].

➤ Pylône Triangle

Occupant une place réduite au sol, ce pylône est utilisé pour des paliers de tension allant de 110 KV à 315 KV. Sa hauteur varie entre 25 et 60 mètres [4].

➤ Pylône double drapeaux

Très utilisé sur le réseau 400 kV. Installé depuis les années 1960. Généralement, plus la tension de la ligne est élevée, plus les pylônes sont hauts. Un pylône soutenant une ligne de 400 000 V peut atteindre 90 m de haut [4].



(a)

(b)

(c)

Figure I. 12 Types de pylônes [4].

b) Les câbles conducteurs

Chacune des phases peut utiliser 1 conducteur ou, 2, 3, 4 câbles conducteurs, appelés faisceaux. Le courant utilisé étant triphasé, il y a trois câbles (ou faisceaux de câbles) conducteurs par circuit. Les lignes sont soit simples (un circuit), soit doubles (deux circuits par file de pylônes). Les câbles conducteurs sont « nus » c'est-à-dire que leur isolation électrique est assurée par l'air. La distance des conducteurs entre eux et avec le sol garantit la bonne tenue de l'isolement. Cette distance augmente avec le niveau de tension. Les conducteurs en cuivre sont de moins en moins utilisés. On utilise en général des conducteurs en aluminium, ou en alliage aluminium-acier ; on trouve aussi des conducteurs composés d'une âme centrale en acier sur laquelle sont tressés des brins d'aluminium [2].



Figure I. 13 Câble conducteur (poste HAMAMET 220kv).

b) Câbles de garde

Le câble de garde est constitué d'un ou plusieurs conducteurs de sections différentes ou équivalentes au conducteur de phase d'une ligne. Il est situé parallèlement aux conducteurs de phase à un niveau supérieur d'eux et relié à la terre par l'intermédiaire de chaque pylône. Son rôle se résume en ces quelques points [14] :

- Protéger les conducteurs contre les chocs de foudre ;
- Réduire les tensions induites dans les circuits de télécommunication parallèles à la ligne ;
- Protéger la ligne en cas de rupture accidentelle d'un conducteur (torsion, flexion) ;
- Diminuer l'élévation de potentiel du support au moment du défaut en drainant une partie du courant de court-circuit.



Figure I. 14 Câble de garde (poste HAMAMET 220kv).

d) Isolateurs de haute tension

L'isolateur est utilisé comme son nom l'indique pour l'isolement entre deux corps ou deux pièces sous différentes tensions pour empêcher les courts circuits, les pertes de courant et les charges d'électrocution. L'isolateur est un matériau solide, liquide ou gaz qui a une très grande résistance au passage du courant et dont la conductibilité est pratiquement nulle. Les isolateurs des lignes aériennes ont deux fonctions principales. D'une part, ils permettent d'isoler électriquement les lignes de transport d'énergie électrique des pylônes mis à la terre, et d'autre part, ils ont un rôle mécanique qui consiste à soutenir ces mêmes lignes et donc résister aux différentes contraintes mécaniques dues surtout au poids de la ligne, son mouvement en présence du vent [15].



Figure I. 15 Isolateur (poste HAMAMET 220kv).

e) Les Parafoudres

Ce sont des appareils statiques chargés de limiter en un point donné du réseau l'amplitude des surtensions qui peuvent se produire. La limitation des surtensions est faite en écoulant l'énergie à la terre. Se sont des appareils de protection situés de part et d'autre des transformateurs de puissance ou l'arrivée d'une ligne. La partie supérieure est raccordée à un des conducteurs tandis que la partie inférieure est reliée directement à la terre. Les parafoudres protègent les appareils électriques des surtensions causées par la foudre ou lors des manœuvres dans le poste. On utilise aussi des éclateurs qui sont réglés suivant la tension du réseau à protéger. Ces appareils sont simples mais présentent cependant l'inconvénient de rester conducteur après amorçage et nécessite donc l'intervention d'un disjoncteur pour l'élimination du courant du défaut qui résulte de leur fonctionnement [7].



Figure I. 16 parafoudre (poste HAMAMET 220kv).

f) Eclateurs à cornes

L'éclateur est un dispositif simple constitué de deux électrodes, la première reliée au conducteur à protéger, la deuxième reliée à la terre. A l'endroit où il est installé dans le réseau, l'éclateur représente un point faible pour l'écoulement des surtensions à la terre et protège ainsi le matériel [2].

Des éclateurs à cornes sont disponibles sur demande. La corne inférieure est fixée à un des boulons de fixation de la bride et la corne supérieure est fixée à la plaque d'extrémité supérieure à l'aide d'un support [16].

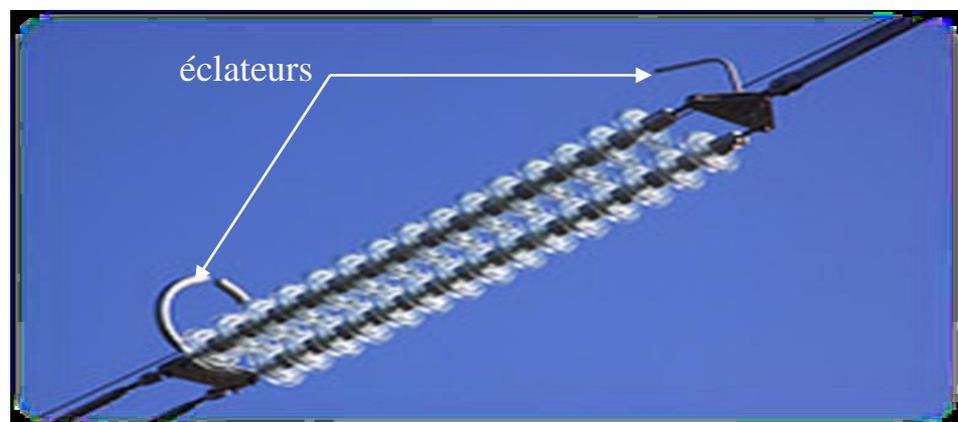


Figure I. 17 éclateurs [10].

g) Mise à la terre des pylônes

Ils doivent être mis à la terre à l'aide d'un conducteur de 48 mm² de section en cuivre, ceci se fait grâce à l'utilisation de sabot de terre qui présente néanmoins un inconvénient, celui de mettre le maillage en discontinuité hors des terrains naturels. Pour parer à des problèmes en pratique une dérivation en T est assurée par brassage [14].

Le rôle d'une mise à la terre d'une installation électrique est de permettre l'écoulement rapide à l'intérieur du sol de courants de défaut de toutes origines, qu'il s'agisse, par exemple, cause dû aux surtensions encore de défauts à 50 Hz. La conception des prises et des réseaux de terre doit permettre, même dans ces conditions d'assurer le maintien de : La sécurité des personnes et des animaux [17].

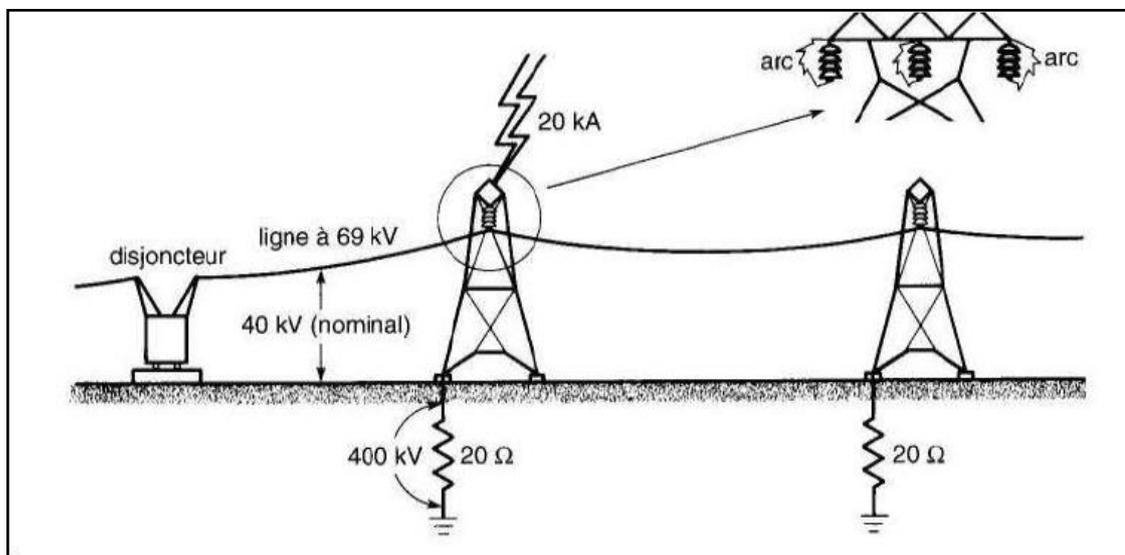


Figure I. 18 Mise à la terre des pylônes [2].

h) Portée et la flèche

Une fois que la section des conducteurs, la hauteur des poteaux et la distance entre les poteaux (portée) ont été déterminées, on peut procéder à la pose des conducteurs. Un fil supporté et tendu entre deux poteaux n'est pas horizontal ; il prend plutôt une forme courbée. La distance verticale entre la droite qui joint les deux points de support et le point le plus bas d'un fil porte le nom de flèche. Plus le fil est tendu, plus la flèche est courte [2].

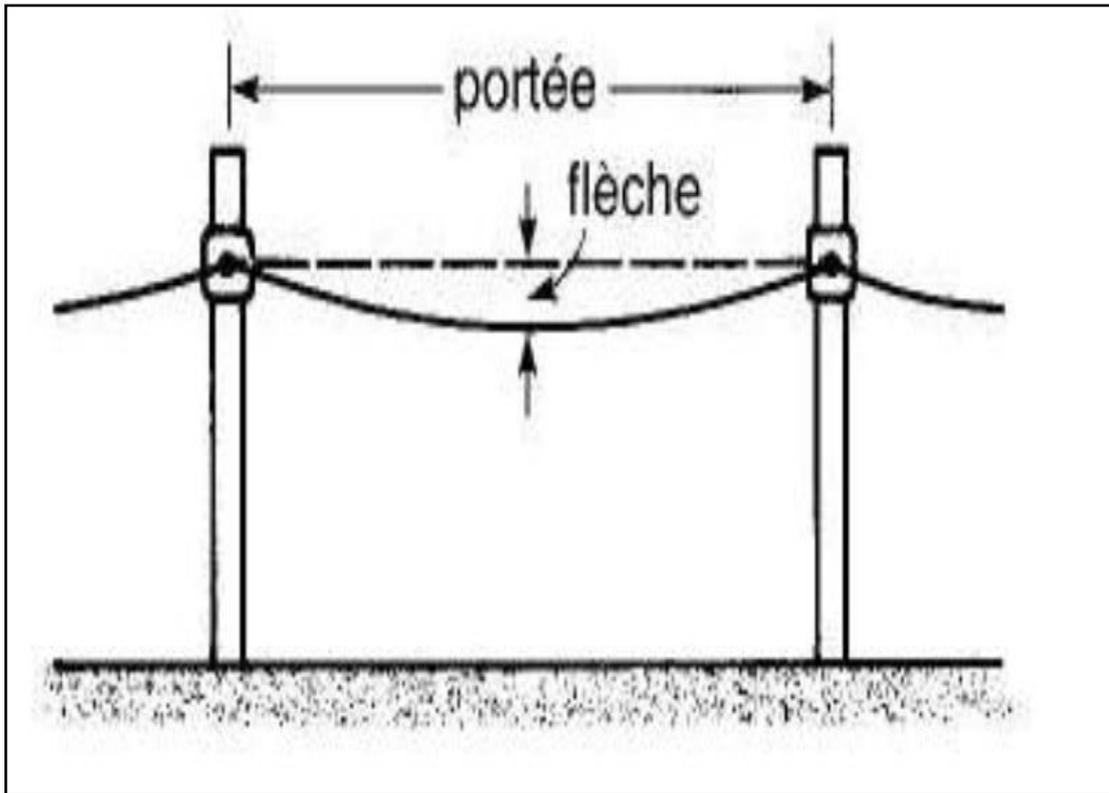


Figure I. 19 Flèche et portée d'une ligne [2].

I.15.2 Propriétés des lignes de transport

Le rôle fondamental d'une ligne est de transporter une puissance active. Si elle doit également transporter une puissance réactive, celle-ci doit être faible par rapport à la puissance active. En plus de ces exigences, une ligne de transport doit posséder les caractéristiques de base suivantes [1]:

- a) La tension doit demeurer constante sur toute la longueur de la ligne et pour toutes les charges comprises entre zéro et la charge nominale;
- b) Les pertes doivent être faibles afin que la ligne possède un bon rendement;
- c) Les pertes joule ne doivent pas faire surchauffer les conducteurs.

I.16 Lignes galopantes

Lorsqu'une couche de verglas se dépose sur une ligne en présence de vent, la ligne se met à osciller. Si les conditions sont favorables, ces oscillations peuvent devenir très grandes; on dit alors que la ligne se met à «galoper». Ce phénomène peut produire des courts circuits entre les phases ou la rupture des conducteurs. Pour éviter ces problèmes, on pose parfois sur les conducteurs des amortisseurs qui empêchent les oscillations de se développer [2].



Figure I.20 Ligne galopante [2].

I.17 Effet couronne - interférences radiophoniques

Les très hautes tensions électriques créent des décharges importantes autour des conducteurs (effet couronne). Ces décharges produisent des pertes le long de la ligne et, de plus, elles possèdent un spectre de fréquences radiophoniques qui brouille la réception sur les postes de radio et les téléviseurs situés dans le voisinage de la ligne. Pour réduire l'effet couronne, on diminue le champ électrique créé par les conducteurs en grossissant leur diamètre ou en les arrangeant en faisceaux de deux, trois ou quatre conducteurs par phase. ; Comme cet arrangement diminue aussi l'inductance de la ligne, on augmente du même coup la puissance qu'elle peut transporter [2].

I.18 Pollution

La poussière, les acides, le sel et les autres polluants qu'on retrouve dans l'atmosphère se déposent sur les isolateurs et diminuent leurs propriétés isolantes. Cette pollution des isolateurs risque de produire des court-circuités pendant les orages ou lors de surtensions momentanées. L'interruption du service et la nécessité de nettoyer ou de remplacer les isolateurs sont donc un souci constant créé par la pollution [3]

I.19 Le centre de contrôle

Pour un fonctionnement fiable et économique d'un réseau d'énergie électrique, il est indispensable de surveiller, contrôler le réseau, dans sa globalité à partir d'un centre de contrôle ou centre de conduite ou encore dispatching. Ces derniers sont équipés

d'ordinateurs traitants en temps réel les signaux provenant d'un dispositif d'acquisition de données ; Ces ordinateurs effectuent leurs traitements de données selon une structure hiérarchique permettant de coordonner, et de répondre, aux différentes exigences, liées aussi bien au fonctionnement normal du réseau, qu'aux situations d'urgences. Ils alertent les opérateurs, dès que toute situation normale de fonctionnement est décelée, leur permettant ainsi, d'apprécier l'événement, et de prendre les mesures adéquates, en agissant par l'intermédiaire de leur console sur les éléments du réseau et ainsi remédier à cette situation. Des outils de simulation ainsi qu'un ensemble de logiciels, écrit dans un langage de haut niveau, sont implémentés pour assurer un fonctionnement efficace et un contrôle fiable du réseau [3].



Figure I.21 Le centre de contrôle PCG HAMAMAT POSTE TEBESSA 220KV.

I.20 Le système de protection

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 [18].

I.20.1 Rôle d'une protection

Lorsqu'un défaut ou une perturbation se produit sur un réseau électrique, il est indispensable de mettre hors tension la partie en défaut à l'aide d'un système de

protection. Ce dernier aura pour rôle de limiter les dégâts qui peuvent être causés par le défaut [18].

I.20.2 Disjoncteur à haute tension

Il est destiné à établir, supporter et interrompre des courants sous sa tension assignée à la fois :

- Dans des conditions normales de service, par exemple pour connecter ou déconnecter une ligne dans un réseau électrique ;
- Dans des conditions anormales spécifiées, en particulier pour éliminer un court-circuit, ou les conséquences de la foudre.

De par ses caractéristiques, un disjoncteur est l'appareil de protection essentiel d'un réseau à haute tension, car il est seul capable d'interrompre un courant de court-circuit et donc d'éviter que le matériel connecté sur le réseau soit endommagé par ce court-circuit.

La coupure d'un courant électrique par un disjoncteur à haute tension est obtenue en séparant des contacts dans un gaz (air, SF₆..) ou dans un milieu isolant (par exemple l'huile ou le vide). Après séparation des contacts, le courant continue de circuler dans le circuit à travers un arc électrique qui s'est établi entre les contacts du disjoncteur [3].

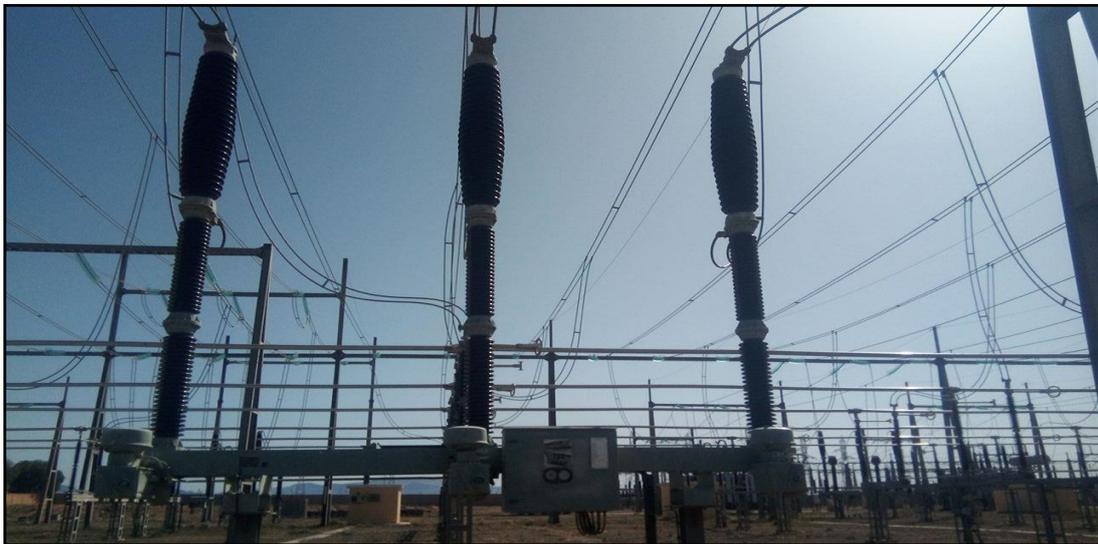


Figure I.22 Disjoncteur sf6 (poste HAMAMET 220kv).

I.20.3 Transformateur électrique

Le transformateur est un appareil électromagnétique statique destiné à transformer un courant (tension) alternatif primaire en un autre courant (tension) secondaire de même fréquence ayant dans le cas général une autre tension et un autre courant.

Un transformateur se compose d'un noyau en tôles d'acier, de deux ou de plusieurs enroulements à couplage électromagnétique, selon le nombre d'enroulements, le transformateur est dit à deux, trois ou à plusieurs enroulements. Conformément au genre du courant on distingue, les transformateurs monophasés, triphasés et polyphasés [19].

I.20.3.1. Le rôle du transformateur

Suivant le poste électrique, le transformateur sera [1]:

- Elévateur : si la tension (en sortie) sera plus élevée que la tension primaire (en entrée), généralement en sortie d'une centrale ;
- Abaisseur : si la tension au secondaire (en sortie) sera moins élevée que la tension Primaire (en entrée), utilisé pour l'adaptation à l'utilisation.

Remarque :

- Le rapport de transformation U_2/U_1 ($n_2/n_1=I_1/I_2$), tel que U_1 , U_2 , I_1 et I_2 tension et courant de l'enroulement primaire et secondaire respectivement, n_1 et n_2 sont le nombre d'enroulement du primaire et secondaire respectivement.
- La puissance instantanée du transformateur est $P=U_1 \times I_1=U_2 \times I_2$.



Figure I.23 transformateur 220kv/90kv (poste HAMAMET 220kv).

I.20.4 Autotransformateur électrique

L'autotransformateur est un appareil statique à induction électromagnétique destiné à transformer un système de courant alternatif en un système de courant alternatif de même fréquence, d'intensité et de tension efficaces généralement différents, sans assurant un isolement galvanique. L'autotransformateur présente des avantages et des inconvénients par rapport au transformateur.

A performances égales, l'autotransformateur présente un encombrement moindre et une masse inférieure (moins de cuivre et moins de fer), ainsi que des pertes plus petites (pertes par effet Joule et pertes ferromagnétiques). Le principal inconvénient de l'autotransformateur est l'absence d'isolation galvanique entre primaire et secondaire, ce qui l'élimine de certaines applications [3].

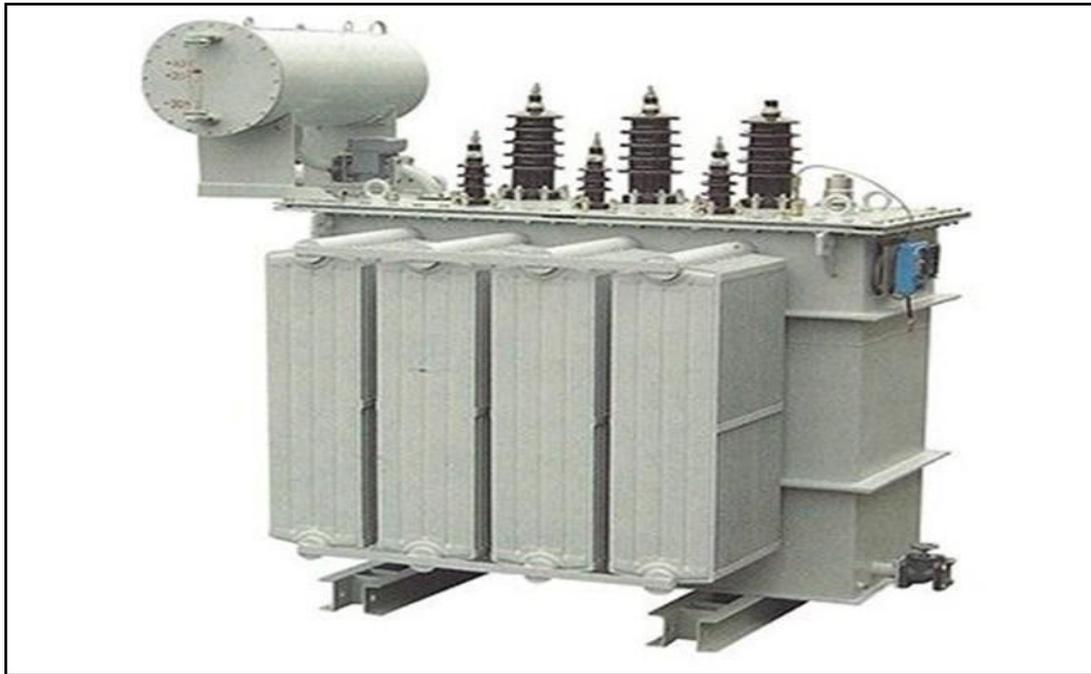


Figure I.24 Autotransformateur [10].

I.20.5 transformateur de courant « TC »

Les transformateurs de courant sont utilisés pour fournir l'information aux « relais » de protection et/ou de mesure et les protéger. Pour cela, ils doivent délivrer un courant secondaire proportionnel au courant primaire qui les traverse. Ils doivent donc être adaptés aux caractéristiques du réseau : tension, fréquence et courant. Les TC ont différentes fonctions [2]:

- Mesure du courant pour l'affichage ;
- Mesure du courant pour le circuit de protection :
 - a. Protection différentielle (comparaison des courants dans les différentes phases) ;
 - b. Protection masse cuve (signale un défaut d'isolement de la cuve).

- Image thermique (permet d'obtenir la température des enroulements en fonction de la température de l'huile et le courant passant dans les enroulements). Primaire et secondaire, ce qui l'élimine de certaines applications.



Figure I.25 Un Transformateur de courant (poste HAMAMET 220kv).

I.20.6 Transformateur de tension

Selon la définition donnée par la commission électrotechnique internationale (C.E.I), un transformateur de tension ou potentiel est un « transformateur de mesure dans lequel la tension secondaire est dans les conditions normales d'emploi, pratiquement proportionnelle à la tension primaire et déphasée par rapport à celle-ci d'un angle voisin de zéro, pour un sens approprié des connexions ». On utilise aussi le terme transformateur de potentiel (TP).

Il s'agit donc d'un appareil pour mesure de fortes tensions électriques. Il sert à faire l'adaptation entre la tension élevée d'un réseau électrique HTA ou HTB (jusqu'à quelques centaines de kilovolts) et l'appareil de mesure (voltmètre, ou wattmètre par exemple) ou le relais de protection, qui eux sont prévus pour mesurer des tensions de l'ordre de centaine de volts [20].



Figure I. 26 transformateur de tension (TP) (poste HAMAMET 220kv).

I.20.7 Les sectionneurs

Le sectionneur est un appareil électromécanique permettant de séparer un circuit électrique aval d'alimentation et qui assure en position ouverte une distance de sectionnement généralement visible par l'intervenant, ils sont situés à plusieurs endroits dans le poste, ainsi, ils jouent un rôle principal dans l'isolement des différents circuits. Le sectionneur à la différence du disjoncteur n'a pas de pouvoir de coupure ni de fermeture, la manipulation n'est possible que lorsqu'il y a aucune charge. La coupure visible permet d'isoler électriquement et mécaniquement les circuits afin de sécuriser les équipements et les travailleurs lors des activités d'entretien [7].

Il existe deux types de sectionneurs :

- Sectionneur à commande installée dans les travées barres (sectionneurs barres) ;
- Sectionneur à commande mécanique installé sur les départs lignes.



Figure I. 27 sectionneur (poste HAMAMET 220kv).

I.20.8 Sectionneur de mise à la terre

Des interrupteurs de sécurité qui isolent un circuit et qui grâce à leur mise à la terre empêchent l'apparition de toute tension sur une ligne pendant les réparations [21].



Figure I.28 sectionneurs de mise à la terre (poste HAMAMET 220kv).

I.20.9 Circuit bouchon haute tension

Les circuits bouchons sont utilisés dans les Réseaux de transport et de distribution. Les circuits Bouchons sont des composants clés des systèmes de courant porteurs en ligne (CPL), utilisés pour les signaux de télécommande, les communications vocales, la télémétrie et la télé conduite entre les postes d'un réseau électrique [21].



Figure I. 29 Circuit bouchon.

I.20.10 Les fusibles

Il est utilisé soit directement comme un dispositif de coupure soit indirectement connecté au circuit secondaire d'un transformateur de courant, avec un contact de fusion donnant un ordre de déclenchement au disjoncteur. L'inconvénient majeur de ces dispositifs réside dans le fait qu'ils sont endommagés par les défauts et qu'ils ont une faible sensibilité.

L'exploitation doit disposer d'un grand nombre de fusibles de recharge pour les différents calibres. La grande variété de réseaux électrique impose des modèles de fusibles de différentes natures selon l'application [21].

I.21 Conclusion

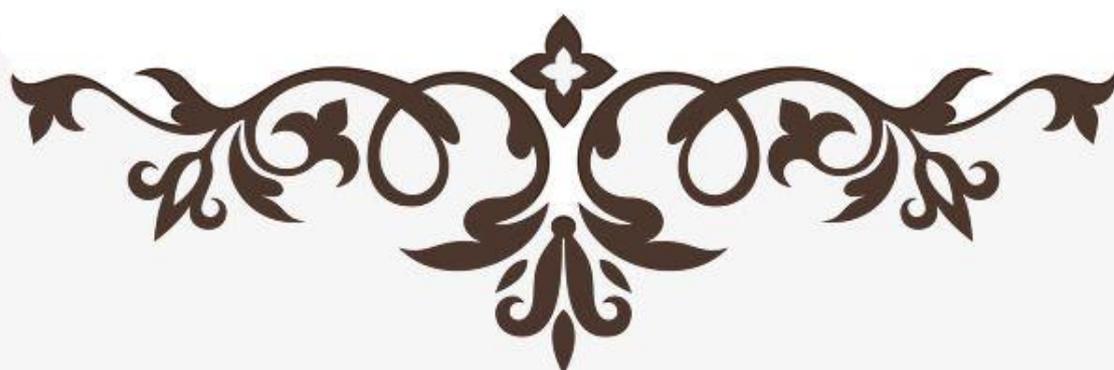
Nous avons présenté dans ce chapitre une étude générale du réseau électrique, avec l'étude de différentes structures topologiques et les différents éléments constituant les réseaux électriques (postes, lignes aériennes, câbles souterraines,...etc.).

Dans le chapitre suivant on va voir les différents défauts dans les réseaux électriques.



Chapitre II

Phénomène liés aux efforts électrodynamiques



II.1 Introduction

Les sociétés qui gèrent les réseaux de transport de l'électricité, leur rôle est la continuité de service, éviter les coupures suite les défauts, et la qualité par maintenir la tension à U_n et la fréquence à 50Hz.

Le présent chapitre donne une idée sur l'origine et les types de défauts affectant les réseaux électriques surtout les lignes hautes tension.

II.2 Caractéristiques des défauts

Les défauts peuvent être caractérisés par leur nombre de conducteurs, leur durée et l'intensité du courant [18].

II.2.1 En fonction du nombre de conducteurs affectés [18]

- **Triphasé** : Il s'agit d'un défaut entre trois phases par l'intermédiaire de la terre ou non ;
- **Biphasés** : entre deux phases du réseau ;
- **Biphasé** : Il s'agit d'un défaut entre deux phases par l'intermédiaire de la terre ;
- **Monophasé** : Il s'agit d'un défaut entre une phase et la terre.

II.2.2 En fonction de la localité du défaut

Selon ce critère, on distingue deux types de défauts [2] :

a) Défaut simple (localisé en un seul point)

C'est un défaut qui est localisé sur un seul point d'une phase, le courant de défaut retourne via la terre et passe à travers l'impédance de mise à la terre du neutre du transformateur.

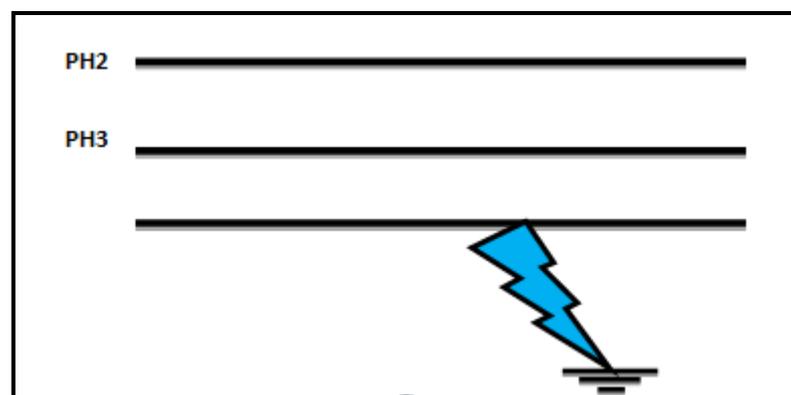


Figure II. 1 Défaut simple.

b) Défaut double (localisé en deux points)

C'est un défaut simple qui évolue et affecte une deuxième phase saine de la ligne sur un point différent du premier défaut.

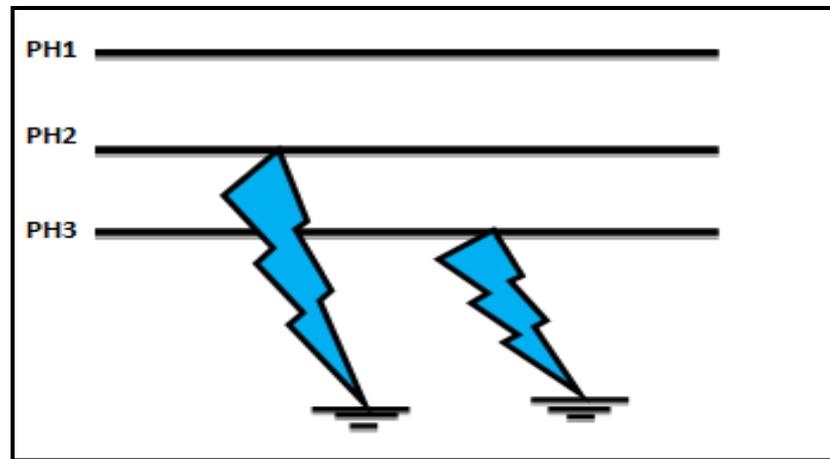


Figure II. 2 Défaut double.

II.2.3 En fonction de la durée

On effectue généralement le classement des défauts en fonction de leur durée. Cette dernière a un impact sur le comportement des protections. On distingue les défauts [18] :

a) Défauts auto-extincteurs

Ils disparaissent naturellement avant le fonctionnement des protections, en une durée inférieure à environ 100 ms.

b) Défauts fugitifs

Ils nécessitent le fonctionnement des protections et sont éliminés par les automatismes de reprise de service après une ouverture d'environ 0,3 s ou par le disjoncteur shunt.

c) Défauts semi-permanents

Ils nécessitent le fonctionnement des protections et sont éliminés par les automatismes de reprise de service à l'issue du 1er ou du 2ème ré enclenchement lent.

d) Défauts permanents

Ils mettent le réseau hors tension et nécessitent l'intervention du personnel d'exploitation d'abord pour isoler l'équipement en défaillance, rétablir l'équipement en défaut.

e) Défauts évolutifs

Défaut monophasé évoluant au même lieu en défaut biphasé ou triphasé (accompagné d'un creux de tension perceptible par les clients).

f) Défaits intermittents

Ce sont des défauts monophasés de durée de 10 à 20 ms qui se réamorcent selon une périodicité généralement comprise entre 100 et 200 ms. On les trouve actuellement sur les réseaux souterrains (1 % des défauts) et surtout sur les réseaux compensés.

Ces défauts ne se produisent pas à la même fréquence, car les statistiques donnent la répartition suivante:

- Auto-extincteurs : 5 % ;
- Fugitifs : 70 % à 80 % ;
- Semi-permanents : 5 % à 15% ;
- Permanents : 5% à 15 %.

Ces chiffres justifient l'utilisation d'appareils automatiques qui coupent les départs affectés dans le temps nécessaire à l'élimination des défauts non permanents.

II.2.4 Rupture de conducteur

Il y a deux situations dans ce cas [2] :

1^{ère} situation : le conducteur est à terre cela représente un risque pour les tiers surtout lorsque le défaut est au bout du réseau avec une faible valeur du courant de défaut ;

2^{ème} situation : cette situation va engendrer une élévation de la tension dans les deux phases saines.

II.3 Phénomènes lies au courant et la tension électrique

L'installation électrique permet de fournir l'énergie électrique nécessaire au bon fonctionnement des récepteurs. Ceux-ci consomment une puissance électrique dont l'expression est fonction de l'intensité du courant qui traverse le récepteur et de la tension à ses bornes.

Ces deux grandeurs électriques ont une influence directe sur la conception des appareillages;

- Le courant électrique va conditionner la notion de pouvoir de coupure et de fermeture. En effet, la problématique essentielle de l'appareillage électromécanique est la coupure de l'arc électrique qui se forme systématiquement à l'ouverture d'un circuit électrique;

- La tension d'alimentation va définir les distances d'isolement entre les bornes et les contacts. Dans ce qui suit nous allons voir les phénomènes liés au courant et à la tension électrique [2].

II.3.1 Les surintensités

Dans un circuit électrique, la surintensité est atteinte lorsque l'intensité du courant dépasse une limite jugée supérieure à la normale. Les causes et les valeurs des surintensités sont multiples. On distingue habituellement dans les surintensités, les surcharges et le court-circuit [22].

II.3.2 Rigidité diélectrique

La rigidité diélectrique d'un milieu isolant représente la valeur maximum du champ électrique que le milieu peut supporter avant le déclenchement d'un arc électrique (donc d'un court-circuit).

Dans le cas d'un disjoncteur à haute tension, c'est la valeur maximum du champ qui peut être supportée après l'extinction de l'arc (l'interruption du courant). Si la rigidité diélectrique est inférieure au champ imposé par le rétablissement de la tension, un réamorçage de l'arc se produit d'où l'échec de la tentative d'interruption du courant [22].

II.3.3 Isolant électrique

En électricité comme en électronique, un isolant, ou isolant électrique, est une partie d'un composant ou un organe ayant pour fonction d'interdire le passage de tout courant électrique entre deux parties conductrices.

Un isolant possède peu de charges libres, elles y sont piégées, contrairement à un matériau conducteur où les charges sont nombreuses et libres de se déplacer sous l'action d'un champ électromagnétique [22].

II.3.4 Claquage électrique

Le claquage est un phénomène qui se produit dans un isolant quand le champ électrique est plus important que ce que peut supporter cet isolant. Il se forme alors un arc électrique.

Dans un condensateur, lorsque la tension atteint une valeur suffisante pour qu'un courant s'établisse au travers de l'isolant, cette tension critique est appelée tension de claquage. Elle est liée à la géométrie de la pièce et à une propriété des matériaux appelée rigidité diélectrique [22].

II.3.5 Les efforts électrodynamiques

Nous savons que la circulation de courants dans des conducteurs parallèles induit dans ces conducteurs des forces électromagnétiques proportionnelles au produit des courants circulant dans les deux conducteurs.

En cas de court-circuit dans une configuration de ligne ou de poste en conducteurs souples, on mesure alors des surtensions mécaniques (traction et flexion) appelées efforts électrodynamiques au niveau des supports et des isolateurs d'ancrage. On observe également des mouvements de conducteurs très importants. Ces efforts pouvant être considérables, il est indispensable de les prendre en compte dès la conception d'un nouvel ouvrage [22].

II.3.6 L'arc électrique

L'arc électrique correspond à une décharge lumineuse qui accompagne le passage de l'électricité entre deux conducteurs présentant une différence de potentiel convenable [2].

a) Dangers de l'arc électrique [7]

- Pas de rupture instantanée du circuit ;
- Dégradation des contacts par micro-fusion et risques de soudure ;
- Contraintes thermiques élevées avec risques de brûlure, d'incendie pour le matériel ;
- Onde parasite, rayonnement U-V.

II.3.7 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 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 appelle phénomènes transitoires électromécaniques [23].

II.3.8 Le court-circuit

Les courts-circuits sont des phénomènes transitoires, ils apparaissent lorsque l'isolement entre deux conducteurs de tension différente ou entre un conducteur sous tension et la terre est rompu. Ils engendrent des courants très importants dans les éléments constituant le réseau. Le courant de court-circuit est une donnée essentielle pour le dimensionnement des équipements électrique [23].

II.3.8.1 Causes du court-circuit

On peut classer les causes qui provoquent un court-circuit en quatre catégories [24] :

- **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.

II.3.8.2 Conséquences des court-circuités

Elles sont variables selon la nature et la durée des défauts, le point concerné de l'installation et l'intensité du courant [20]:

- ❖ Au point de défaut, la présence d'arcs de défaut, avec :
 - Détérioration des isolants.
 - Fusion des conducteurs.
 - Incendie et danger sur les personnes.
- ❖ Et Pour le circuit défectueux les efforts électrodynamiques, avec :
 - Déformation des jeux de barres.
 - Arrachement des câbles.
- ❖ sur échauffement par augmentation des pertes joules, avec risque de détérioration des isolants;
- ❖ pour les autres circuits électriques du réseau concerné ou de réseaux situés à proximité;
- ❖ les creux de tension pendant la durée d'élimination du défaut, de quelques millisecondes à quelques centaines de millisecondes;
- ❖ La mise en hors service d'une plus ou moins grande partie du réseau suivant son schéma de la sélectivité de ses protections ;
- ❖ l'instabilité dynamique et/ou la perte de synchronisme des machines;

- ❖ les perturbations dans les circuits de contrôle commandent.

II.3.8.3. Types de court-circuit

Plusieurs types de court-circuit peuvent se produire dans un réseau électrique [20] :

- ❖ **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.

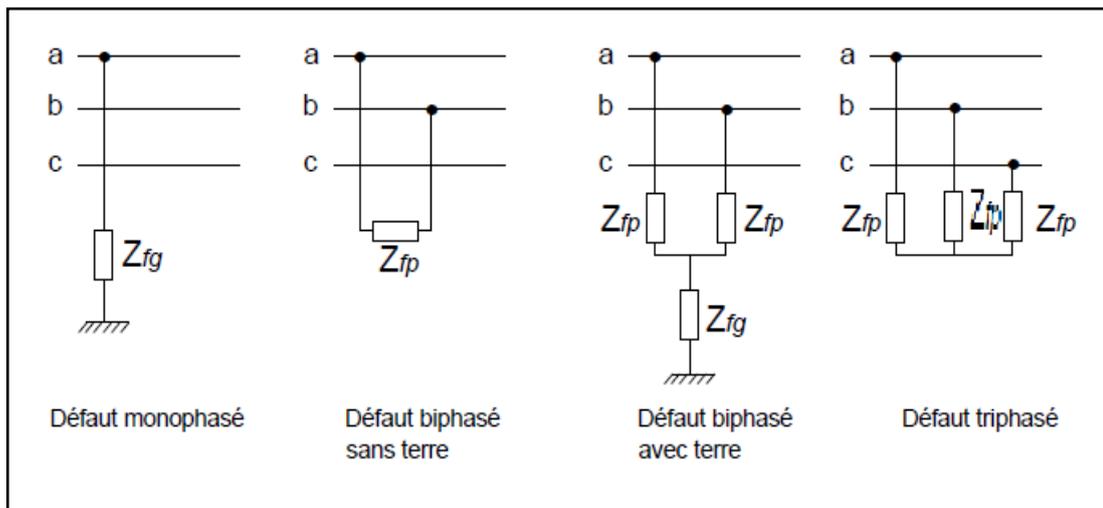


Figure II. 3 Différents types de court-circuit.

Les défauts de court-circuit amènent à deux types de contraintes [25] :

- **Contraintes thermiques**

Sont dues aux dégagements de chaleur par effet Joule dans les conducteurs électriques.

- **Contraintes mécaniques**

Sont dues aux efforts électrodynamiques entraînent le balancement des conducteurs aériens et le déplacement des bobinages des transformateurs. Ces efforts s'ils dépassent les limites admises sont souvent à l'origine d'avaries graves.

De plus l'arc électrique consécutif à un défaut met en jeu un important dégagement local d'énergie pouvant provoquer d'important dégât au matériel.

II.3.8.4. Nature de Court-circuit [20]

- **Courts-circuits fugitifs** : les court-circuits fugitifs nécessitent une coupure très brève du réseau d'alimentation (de l'ordre de quelques dixièmes de seconde).
- **Courts-circuits permanents** : Ces court-circuits provoquent un déclenchement définitif qui nécessite l'intervention du personnel d'exploitation pour la localisation du défaut et la remise en service de la partie saine.
- **Court-circuit auto-extincteurs** : C'est ceux qui disparaissent spontanément en des temps très courts sans provoquer de discontinuités dans la fourniture d'énergie électrique.
- **Court-circuit semi permanents** : Ces court-circuit exigent de disparaître une ou plusieurs coupures relativement à longueur du réseau d'alimentation (de l'ordre de quelques dizaines de secondes) sans nécessité d'intervention du personnel d'exploitation.

II.3.8.5. Méthodes de Calcul du courant de court- circuit

A) Méthode des impédances [9]

A.1 Court-circuit triphasé

C'est le défaut qui correspond à la réunion des trois phases. L'intensité de court-circuit I_{cc3} est :

$$I_{cc3} = \frac{U/\sqrt{3}}{Z_{cc}} \quad (\text{II.1})$$

Avec

U : tension composée entre phases;

Z_{cc} : l'impédance.

$$Z_{cc} = \sqrt{(\sum R)^2 + (\sum X)^2} \quad (\text{II.2})$$

$\sum R$ = somme des résistances en série;

$\sum X$ = somme des réactances en série.

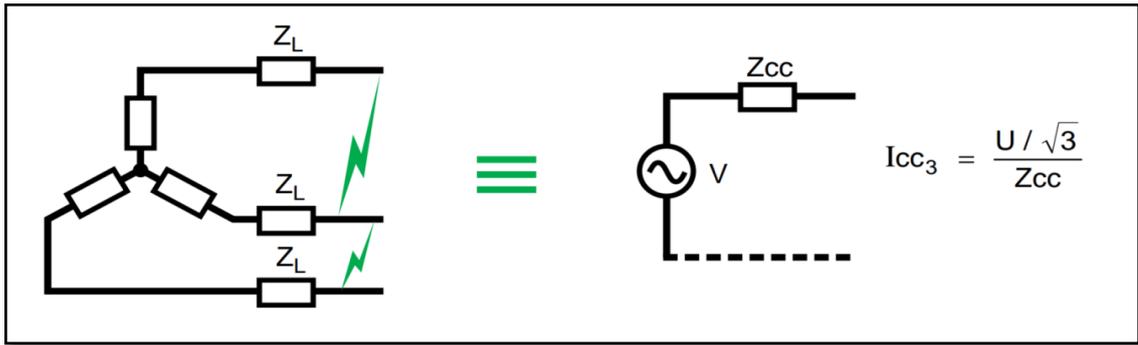


Figure II. 4 Court-circuit triphasé.

A.2 Court-circuit biphasé isolé

Il correspond à un défaut entre deux phases, alimenté sous une tension composée U .L'intensité I_{cc2} débitée est alors inférieure à celle du défaut triphasé.

$$I_{cc2} = \frac{U}{2Z_{cc}} = \frac{\sqrt{3}}{2} I_c \approx 0.86 I_{cc3} \quad (II.3)$$

Dans le cas d'un défaut proche des machines tournantes, les impédances de celles-ci sont telles qu' I_{cc2} est proche d' I_{cc3} .

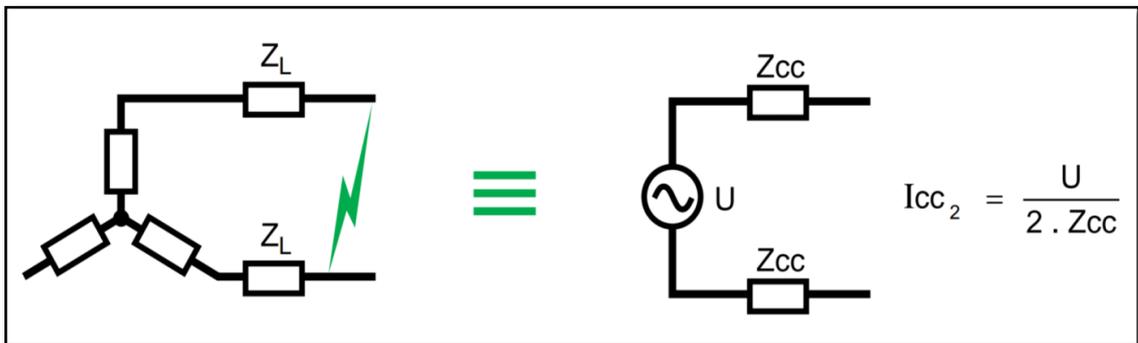


Figure II. 5 Court-circuit biphasé isolé.

A.3 Court-circuit monophasé isolé

Il correspond à un défaut entre une phase et le neutre, alimenté sous une tension simple:

$$v = \frac{u}{\sqrt{3}} \quad (II.4)$$

L'intensité I_{cc1} débitée est alors :

$$I_{cc1} = \frac{u/\sqrt{3}}{Z_{cc} + Z_{ln}} \quad (II.5)$$

Dans certains cas particuliers de défaut monophasé l'impédance homopolaire de la source est plus faible que Z_{cc} .

L'intensité monophasée peut être alors plus élevée que celle du défaut triphasé.

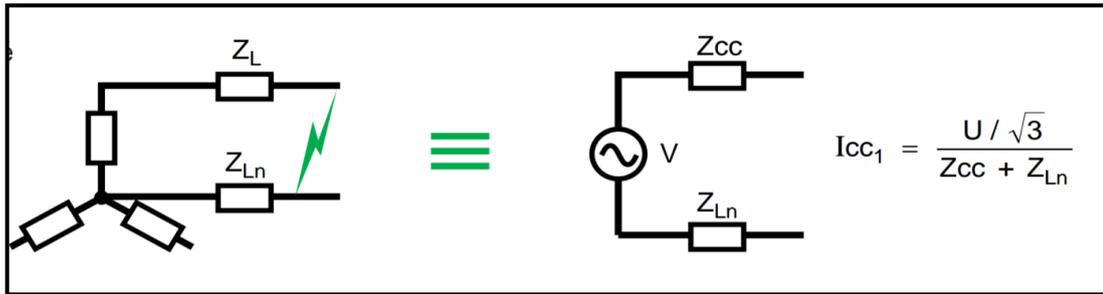


Figure II.6 Court-circuit monophasé isolé.

A.4 Court-circuit à la terre

Ce type de défaut fait intervenir l'impédance homopolaire Z_o . Sauf en présence de machines tournantes où l'impédance homopolaire se trouve réduite, l'intensité I_{cco} débitée est alors inférieure à celle du défaut triphasé. Son calcul peut être nécessaire, selon le régime du neutre.

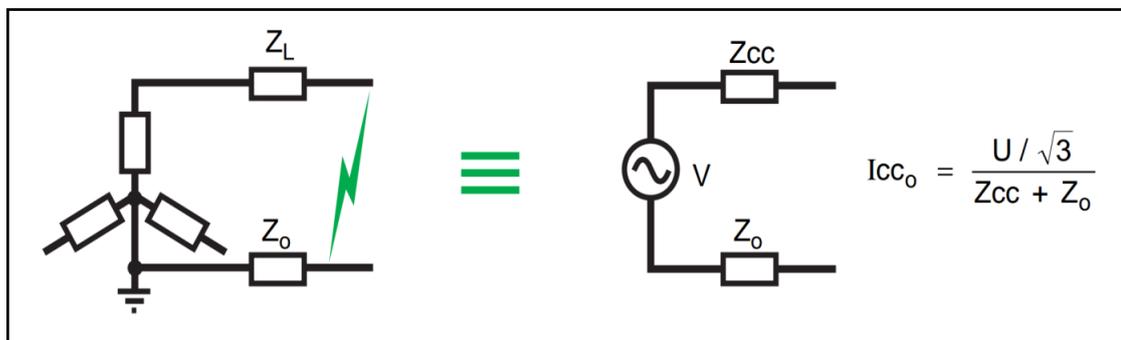


Figure II.7 Court-circuit à la terre.

B) Méthode des composantes Symétriques

B.1 Théorie des composantes symétriques

La définition des composantes symétriques repose sur l'équivalence entre un système triphasé déséquilibré, et la somme de trois systèmes triphasés équilibrés : direct, indirect et homopolaire (figure. II.8) [25].

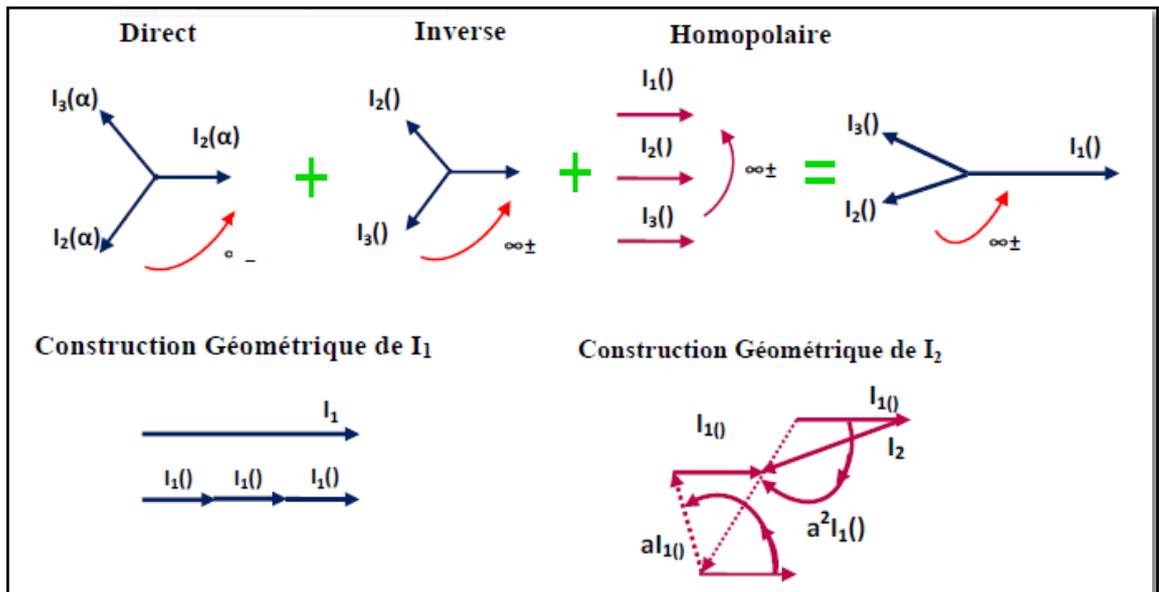


Figure II. 8 Système déséquilibré triphasé obtenu en additionnant les trois systèmes équilibrés

B.1.1 Le système Direct

Consiste en trois vecteurs de même module déphasé de 120° et ayant la même séquence que le système d’origine.

En prenant le vecteur V_a comme référence et sachant que l’opérateur (a):

$$a = -0.5 + j0.866 = 1^{L+120^\circ} \quad \text{(II.6)}$$

Il vient alors :

$$V_{a1} = V_1^{L240^\circ} = a \cdot V_1 \quad \text{(II.7)}$$

$$V_{c1} = V_1^{L120^\circ} = a \cdot V_1 \quad \text{(II.8)}$$

B.1.2 Système inverse

Consiste en trois vecteurs de même module déphasé de 120° mais de séquence opposée au système d’origine.

$$V_{a2} = V_1 \quad \text{(II.9)}$$

$$V_{b2} = V_2^{L120^\circ} = a \cdot V_2 \quad \text{(II.10)}$$

$$V_{c2} = V_2^{L240^\circ} = a^2 \cdot V_2 \quad \text{(II.11)}$$

B.1.3 Le système homopolaire

Formé de trois vecteurs a ayant la même amplitude et le même angle de phase, tournent dans le même sens avec la même vitesse que les vecteurs du système original, on leur attribue l'indice « 0 ».

$$V_{a0} = V_{b0} = V_{c0} = V_0 \quad (\text{II.12})$$

Autrement dit un système triphasé déséquilibré constitué de trois vecteurs, V_c Peut s'écrire en fonction des trois systèmes direct, inverse, homopolaire selon :

$$V_a = V_1 + V_2 + V_0 \quad (\text{II.13})$$

$$V_b = a^2 V_1 + a V_2 + V_0 \quad (\text{II.14})$$

$$V_c = a V_1 + a^2 V_2 + V_0 \quad (\text{II.15})$$

Pour déterminer V_1 , V_2 et V_0 en fonction de V_a , V_b et V_c on a deux méthodes :

- 1^{ère} méthode : utiliser la matrice inverse $[T]^{-1}$
- 2^{ème} méthode : utiliser $1 + a + a^2 = 0$

$$V_1 = \frac{1}{3} [V_a + \alpha V_b + \alpha^2 V_c] \quad (\text{II.16})$$

$$V_2 = \frac{1}{3} [V_a + \alpha^2 V_b + V_c] \quad (\text{II.17})$$

$$V_0 = \frac{1}{3} [V_a + V_b + V_c] \quad (\text{II.18})$$

- Circuit équivalent des séquences

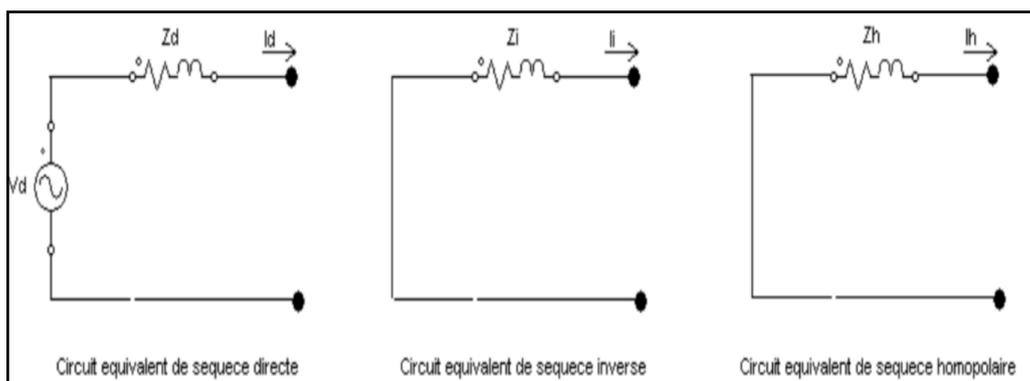


Figure II. 9 Circuit équivalent des séquences.

$$V_1 = V^p_d - Z_1 \cdot I_1 \quad (\text{II.19})$$

$$V_2 = 0 - Z_2 \cdot I_2 \quad (\text{II.20})$$

$$V_0 = 0 - Z_0 \cdot I_0 \quad (\text{II.21})$$

II.3.8.6 Intensité du courant de court-circuit

L'intensité du courant de court-circuit est une caractéristique importante, elle détermine la sévérité de la contrainte appliquée au réseau et au matériel en défaut. Elle dépend de la forme des court-circuits et, pour ceux impliquant la terre, du mode de mise à la terre des points neutres [24].

II.3.9 Les surtensions

Ce sont les tensions qui ont des valeurs plus importantes que celle de régime normal ce qui peut commodément affecter l'installation. Elles peuvent apparaître entre phases ou entre de circuits différents, ou entre les conducteurs actifs et la masse ou la terre [22].

II.3.9.1 Types de surtension dans les réseaux électriques

Quatre types de surtension peuvent perturber les installations électriques et les récepteurs [22]:

a) Surtensions de manœuvre

Surtensions à haute fréquence ou oscillatoire amortie causées par une modification du régime établi dans un réseau électrique .elles sont d'une durée de quelques dizaines microsecondes à quelques millisecondes. La manœuvre d'un sectionneur dans un poste électrique à isolation gazeuse engendre en particulier des surtensions à fronts très raides.

b) Surtensions à fréquence industrielle

Surtensions à la même fréquence que le réseau (50, 60 ou 400 Hz) causées par un changement d'état permanent du réseau (suite à un défaut : défaut d'isolement, rupture conducteur neutre,...). Parmi ces surtensions, on peut citer : surtension provoquée par un défaut d'isolement, surtension sur une longue ligne à vide (effet Ferranti), et surtension par Ferro résonance.

c) Surtensions causées par des décharges électrostatiques

Surtensions à très haute fréquence très courtes (quelques nanosecondes) causées par la décharge de charges électriques accumulées (Par exemple, une personne marchant sur une moquette avec des semelles isolantes se charge électriquement à une tension de plusieurs kilovolts).

d) Surtensions d'origine atmosphérique.

L'orage est un phénomène naturel connu de tous, spectaculaire et dangereux. Mille orages éclatent en moyenne chaque jour dans le monde. Les surtensions d'origine

atmosphérique sont causées par le coup de foudre direct ou indirect sur les lignes électriques.

II.3.9.2 Causes des surtensions

Les causes qui conduisent à des surtensions sont [4][2]:

- Contact avec une ligne de plus forte tension.
- Coupure brutale d'une ligne.
- Capacité des longues lignes à vide.
- Coups de foudre directs ou indirects
- Les manœuvres d'exploitation enclenchement déclenchement d'équipements ;
- Mise sous tension d'une ligne longue à vide (sans charge) ;
- Le court-circuit ;
- Déséquilibre en triphasé ;
- Rupture du neutre.

II.3.9.3 Conséquences des surtensions

Les conséquences des surtensions sont comme suit [2] [4] :

- Effet joule (destruction des équipements) ;
- Claquage (défaut d'isolement, arc électrique, brulure, feu) ;
- Vieillissement des isolants et claquage.
- Surcharge des lignes en cas de durée prolongée.
- Amorçage de court-circuit en cas de claquage des isolants.

II.3.9.4 Solution pour les surtensions

Les solutions mises en œuvre pour remédier aux surtensions sont [2] :

- Ouverture du circuit alimentation ;
- Utilisations des parafoudres ;
- Choix du régime du neutre ;
- Utilisations des éclateurs ;
- Utilisation du para-sur tenseur.

II.3.10 La surcharge

Le courant de surcharge est produit lorsque nous faisons un appel du courant, à partir de la source, plus que celui nominal. Par exemple en alimentant plusieurs récepteurs à partir d'une seule prise de courant. [22]

II.3.10.1 Causes des surcharges [4] [2]

- Les causes les plus réponsus qui conduisent à la surcharge sont :
- Trop de consommateurs (trop de charge) ;
- Démarrage, freinage des moteurs ;
- Surcharge des moteurs (côté mécanique) conduit à une surcharge électrique ;
- Courts-circuits résistants ;
- Couplage difficiles, démarrage de moteur.
- Report de charge sur une ligne ou une machine, lors de la coupure de la parallèle.

II.3.10.2 Conséquences des surcharges [2] [4]

Les conséquences d'une surcharge sont comme suit :

- L'intensité du courant est très grande elle peut atteindre plusieurs fois la valeur du courant nominal de l'installation ;
- Echauffement excessif des conducteurs ;
- Vieillissement primitif des isolants ;
- Fatigue thermique ;
- Feu ;
- Peut évoluer vers un court-circuit ;
- Effets calorifiques ;
- Effets déjà exposés pour les surintensités dues aux court-circuites.

II.3.10.3 Solution pour les surcharges [2]

La solution immédiate pour une surcharge est l'interruption de la fourniture de l'énergie électrique (coupure du courant), les autres solutions sont :

- L'équilibre des charges (voir une restructuration du réseau) ;
- L'augmentation de puissance installé ;
- La création d'autre source de tension ;
- Le redimensionnement des équipements du réseau (lignes, transformateurs...) ;
- Toutes ces solutions ont un coup très important pour le fournisseur d'énergie électrique.

II.3.11 Les dés équilibrés

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 [26]:

- Des chutes de tension supplémentaires ;
- Des pertes de puissance ;
- Des échauffements ;

Les déséquilibres peuvent provenir :

- Court-circuit biphasé ou monophasés ;
- Rupture de conducteur électrique sans contact à la terre (Ou non fermeture ou non ouverture d'un pôle de sectionneur ou disjoncteur) ;
- Fusion fusible ou déclenchement disjoncteur ;
- Inversion de deux phases ;
- Mauvaise répartition de charges électriques ;
- Mauvaise répartition des branchements monophasés (BT) ;
- Mauvais équilibrage des phases pour les branchements triphasés (I1, I2, I3);
- Fraude ;
- Mauvais contact au niveau des raccordements.

II.3.11.1 Causes Les déséquilibre [4]

- Coupure d'une bretelle sans mis à la terre ;
- Pôles de sectionneurs ou de disjoncteurs laissés ouverts.

II.3.11.2 Conséquences Les déséquilibre [4]

Dans les réseaux HT ne comportant que 3 fils, la somme des courants n'est plus nulle :

- Un courant de retour passe dans le sol par le neutre des transformateurs et induit des tensions dangereuses dans les câbles de télécommunication voisins.
- En outre ce courant de retour produit dans l'appareillage, des courants de circulation engendrant des échauffements anormaux.

II.3.12 Chutes de tensions [2]

Lorsque le transit dans une ligne électrique est assez important, la circulation du courant dans la ligne provoque une chute de la tension. La tension est alors plus basse en bout de ligne qu'en son origine, et plus la ligne est chargée en transit de puissance,

plus la chute de tension sera importante. Un réseau dans lequel la consommation est éloignée de la production, présentera un profil de tension différent de celui d'un réseau dans lequel production et consommation sont uniformément réparties. Chaque centrale impose la tension à sa sortie, et la tension évolue dans le réseau en fonction de la consommation alimentée.

II.3.13 L'effet de la foudre

Le courant de foudre est donc un courant électrique haute-fréquence. En plus des effets d'induction et de surtension importants, il provoque les mêmes effets que toute autre courante basse fréquence circulant dans un conducteur [18] :

- Les effets thermiques : fusion aux points d'impacts de la foudre et effet joule dû à la circulation du courant, provoquant des incendies.
- Les effets électrodynamiques : lorsque les courants de foudre circulent dans des conducteurs parallèles, ils provoquent des forces d'attraction ou de répulsion entre les câbles entraînant des ruptures ou des déformations mécaniques (câbles écrasés ou aplatis).
- Les effets de déflagration : le canal de foudre engendre une dilatation de l'air et une surpression jusqu'à une dizaine de mètres de distance. Un effet de souffle brise les vitres ou cloisons et peut projeter des animaux ou des personnes plusieurs mètres. Cette onde de choc se transforme simultanément en onde sonore : le tonnerre.
- Les surtensions conduites à la suite d'un impact sur des lignes aériennes d'alimentation électrique ou téléphonique.
- L'élévation du potentiel de terre par circulation de courant de foudre dans le sol.

II.4 Régime du neutre

Dans un réseau, le régime de neutre joue un rôle très important. Lors d'un défaut d'isolement ou de mise accidentelle d'une phase à la terre, les valeurs prises par les courants de défaut, les tensions de contact et les surtensions sont étroitement liées au mode de raccordement du neutre. Un neutre mis directement à la terre limite fortement les surtensions, par contre, il engendre des courants de défauts très importants, au contraire un neutre isolé limite les courants de défaut à des valeurs très faibles, mais favorise l'apparition de surtension élevées [2].

II.4.1 Bases de choix du régime du neutre

Le choix du régime du neutre s'effectue en fonction des critères suivants :

- Niveau de tension, car le matériel doit avoir un niveau d'isolement
- Compatible avec les surtensions engendrées lors des défauts monophasés. que les foudroiements indirects par tension de pas et les claquages de matériel.
- Réglementation et législation concernant les élévations de tensions, des masses, la sensibilité de détection
- Continuité de service.
- Limitation du courant de défaut à la terre pour diminuer les contraintes électrodynamiques sur le matériel, et réduire les phénomènes d'induction sur les lignes de télécommunication et les surtensions sur le matériel BT.
- Recherche de l'auto extinction des défauts monophasés.

II.4.2 Les différents régimes de neutre

Les différents modes de raccordement du point neutre à la terre sont comme suivent [21]:

- Le neutre directement mis à la terre ;
- Le neutre isolé, ou fortement impudent ;
- Le neutre mis à la terre par l'intermédiaire d'une résistance ;
- Le neutre mis à la terre par l'intermédiaire d'une réactance ;
- Le neutre mis à la terre par l'intermédiaire d'une réactance accordée ;
- (Bobine de Petersen).

II.5 Conclusion

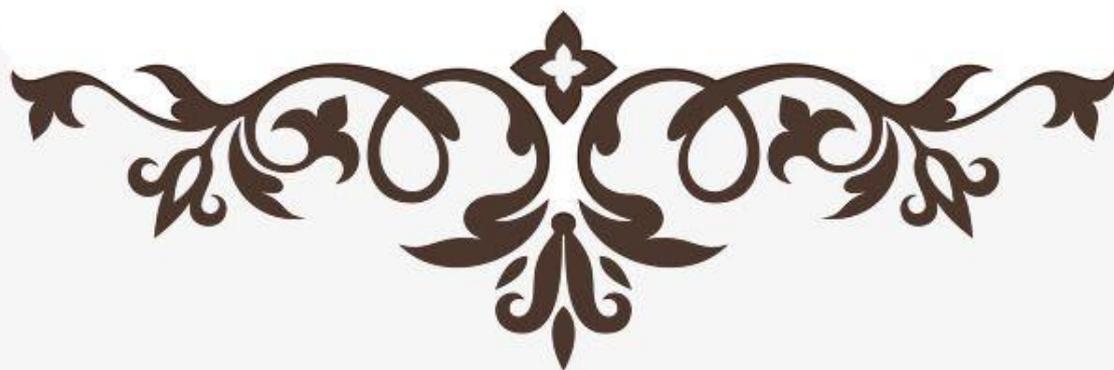
Nous avons présenté dans ce deuxième chapitre, les différents types de défauts, leurs causes et leurs conséquences Nous avons présenté également les formules concernant le calcul des courants de court-circuit des différents types de défauts.

Dans le chapitre suivant on va voir les ensembles des phénomènes liés aux efforts électrodynamiques et les solutions de protections des lignes.



Chapitre III

Protection du réseau électrique



III.1 Introduction

Le système de protection est un bras de protection du réseau électrique conçu et adapté de manière cohérente au réseau pour assurer la protection de ses composants et la continuité de la transmission.

Le système de protection se compose d'une chaîne constituée des éléments suivants [2]:

- Les capteurs de mesure (courant et tension) fournissant les informations de mesure nécessaires à la détection des défauts ;
- Les relais de protection, chargés de la surveillance permanente de l'état électrique du réseau, jusqu'à l'élaboration des ordres d'élimination des parties défectueuses, et leur commande par le circuit de déclenchement ;
- Les organes de coupure dans leur fonction d'élimination de défaut : disjoncteurs, interrupteurs, Fusible.

Dans ce chapitre ; nous allons présenter la philosophie des protections, les protections des lignes de transport ; les types des relais ; la zone et les réglages des dispositifs de protection ; les hypothèses et les conditions de conception, de construction d'un nouvel ouvrage.

III.2 Rôle de protection

Les buts visés par les dispositifs de protection sont multiples [26] :

- Participer à la protection des personnes contre les dangers électriques ;
- Éviter les détériorations de matériel (un court-circuit triphasé sur un jeu de barres moyenne tension peut faire fondre jusqu'à 50 kg de cuivre en 1 seconde, la température de l'arc peut dépasser en son centre 10000 °C) ;
- Limiter les contraintes thermiques, diélectriques et mécaniques auxquelles sont soumis ces matériels ;
- Préserver la stabilité et la continuité de service du réseau ;
- Protéger les installations voisines (par exemple, réduire les tensions induites dans les circuits proches).

III.3 Philosophie de réglage des protections des réseaux de SONELGAZ

Le plan de protection SONELGAZ est conçu de façon à prévoir tous les équipements basse tension nécessaires qui permettent de protéger de façon sûre et sélective les lignes et les transformateurs contre tous les types de défauts. Aussi, il est élaboré une philosophie qui précise les paramètres de réglage et les fonctions à adopter pour définir harmonieusement les différentes priorités d'action entre les protections pour assurer une bonne sélectivité et garantir la continuité d'alimentation. Le calcul des réglages dépend de plusieurs paramètres à savoir [27]:

1- Le type de réseau

- Réseau d'interconnexion.
- Réseau de transport.
- Réseau de répartition.
- Réseau de distribution.

2- La topologie du réseau

- Ligne ordinaire dans un réseau maillé de transport ou de répartition.
- Ligne longue reliant des postes disposant de lignes courtes.
- Ligne en antenne.
- Ligne en piquage.
- Transformateur d'interconnexion THT/HT.
- Transformateur HT/MT.

3- Le type de protection

- Protection de distance.
- Protection différentielle.
- Protection à maximum de courant.
- Protection de surcharge thermique.
- Protection à maximum ou à minimum de tension etc.....

4- La technologie des protections

- Électromécanique.
- Statique.
- Numérique.

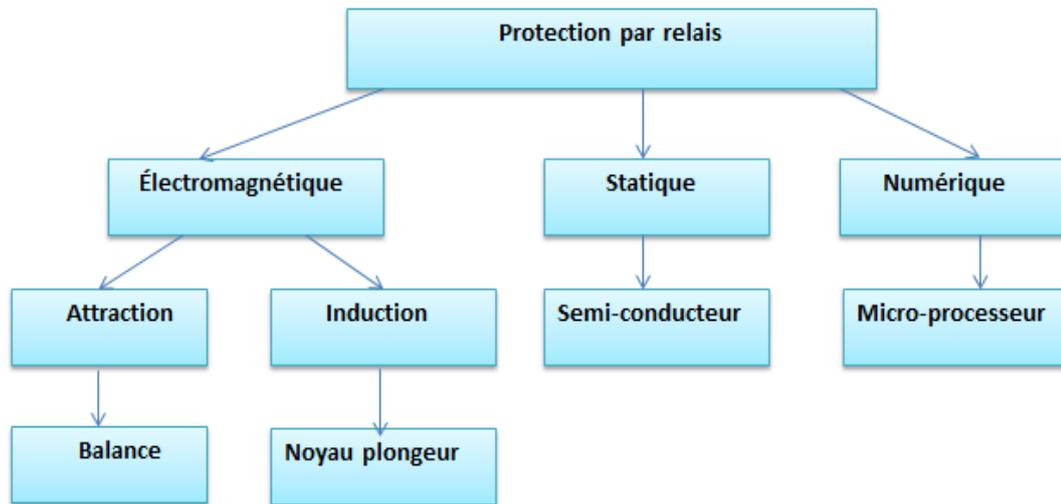


Figure.III.1 protections par relais [28].

5- Le plan de protection [1]

- Le premier plan de protection qui consiste à protéger les lignes 220kv avec seulement une protection principale ; une protection complémentaire et une protection de secours;
- Le deuxième plan de protection dans lequel il est introduit en plus une protection de réserve et une protection de défaillance disjoncteur en maintenant une seule batterie pour tout le poste;
- Le troisième plan de protection ou on trouve une protection principale ; une protection de réserve temporisée (en monophasé) par rapport à la principale ; deux batteries 127v ; deux enroulements protection sur les TC ; un réenclencheur de type série ;
- Le quatrième plan qui est actuellement en vigueur ne diffère du troisième que par la mise en fonctionnement parallèle des protections principale et de réserve avec un même réenclencheur de type parallèle.

III.4 Plan de protection

III.4.1 Définition d'un système de protection

C'est le choix des éléments de protection et de la structure globale de l'ensemble, de façon cohérente et adaptée au réseau [1].

III.4.2 Rôle d'une protection

Lorsqu'un défaut ou une perturbation se produit sur un réseau électrique, il est indispensable de mettre hors tension la partie en défaut à l'aide d'un système de

protection. Ce dernier aura pour rôle de limiter les dégâts qui peuvent être causés par le défaut [25].

III.4.3 Constitution d'un système de protection

Le système de protection se compose d'une chaîne constituée des éléments suivants:

- Capteurs de mesure de courant et de tension fournissant les informations de mesure nécessaire à la détection des défauts.
- Relais de protection, chargé de la surveillance permanente de l'état électrique du réseau, jusqu'à l'élaboration des ordres d'élimination des parties défectueuses et leur commande par le circuit de déclenchement.
- Organes de coupure dans leur fonction d'élimination de défaut : disjoncteurs, Interrupteurs, fusibles [1].

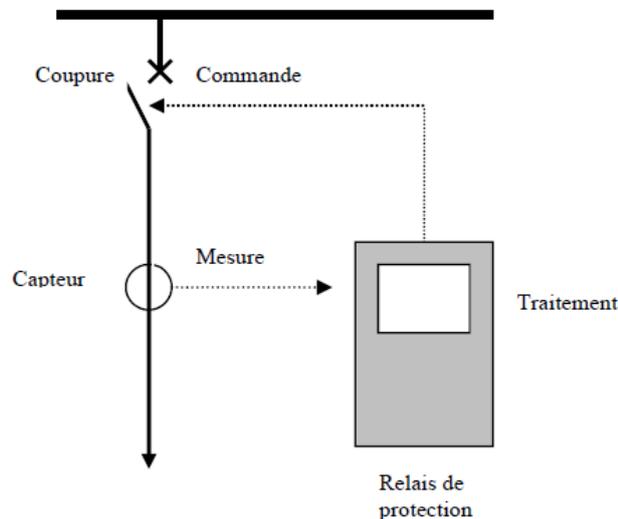


Figure.III.2 Chaîne de protection.

III.4.4 Constitution d'un système de protection

Pour qu'un système de protection accomplisse convenablement sa mission, Il doit présenter les qualités suivantes [13] :

- Rapidité : Les court-circuités sont donc des incidents qu'il faut éliminer le plus vite possible, c'est le rôle des protections dont la rapidité de fonctionnement et des performances prioritaires. Le temps d'élimination des court-circuits comprend deux composantes principales :
 - Le temps de fonctionnement des protections (quelques dizaines de millisecondes).

▪ Le temps d'ouverture des disjoncteurs, avec les disjoncteurs modernes (SF6 ou à vide), ces derniers sont compris entre 1 et 3 périodes.

• **Sélectivité**: La sélectivité est une capacité d'un ensemble de protections à faire la distinction entre les conditions pour lesquelles une protection doit fonctionner de celles où elle ne doit pas fonctionner. Les différents moyens qui peuvent être mis en œuvre pour assurer une bonne sélectivité dans la protection d'un réseau électrique, les plus importants sont les trois types suivants:

- Sélectivité ampère métrique par les courants.
- Sélectivité chronométrique par le temps.
- Sélectivité par échange d'informations, dite sélectivité logique.

• **Sensibilité**: La protection doit fonctionner dans un domaine très étendu de courants de court-circuit entre :

- Le courant maximal qui est fixé par le dimensionnement des installations et est donc 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.

• **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 dû 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 dû fonctionner.

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

III.5 Zone de Protection

En plus des performances que doivent avoir les relais, il faut savoir les placer correctement pour les rendre plus efficaces. Pour atteindre cet objectif, on découpe le réseau industriel en zones délimitées par les positions des organes de coupure. La figure III.3 montre une disposition caractéristique des zones de protection, correspondant respectivement à des sections de ligne, des jeux de barres, des transformateurs des machines. Ces zones se recouvrent pour ne laisser aucun point de l'installation sans protection [6].

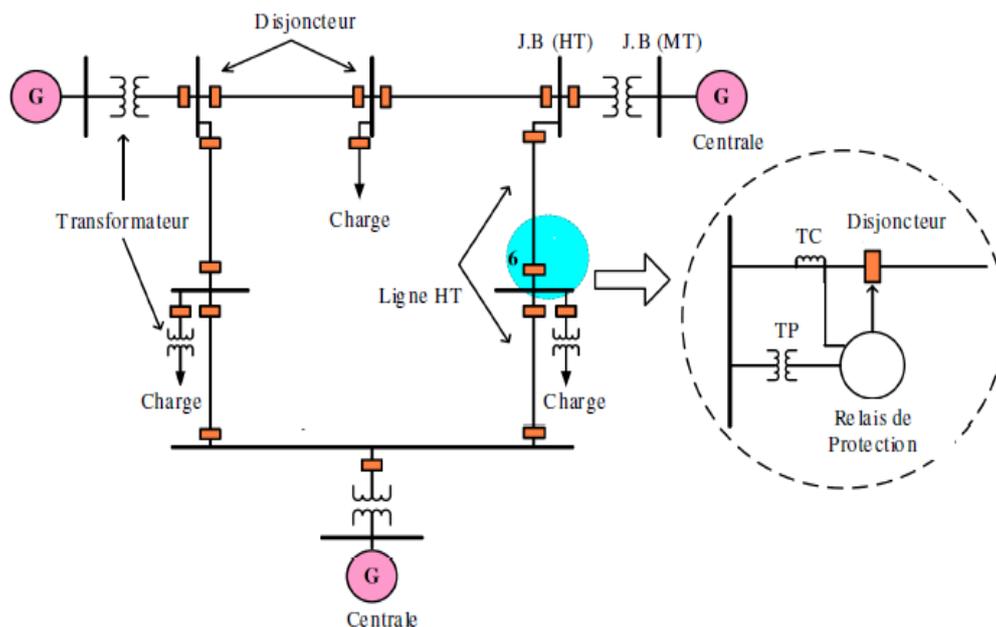


Figure.III.3 Les zones de protection d'un réseau électrique.

III.6 Protection d'un poste d'interconnexion

III.6.1 Caractéristiques générales des plans de protections

A. Principe de base

Chaque ouvrage du réseau possède son propre système protection indépendant de celui des autres. Dans la mesure du possible, le système de protection d'un ouvrage doit

agir en secours en cas de défaillance du système de protection d'un autre ouvrage (secours éloigné).

Le système de protection de chaque ouvrage est constitué de plusieurs protections dépendantes, choisies de telle sorte qu'en cas de défaillance de l'une ou de l'autre le secours local soit assuré. Cette règle est impérative lorsque le secours éloigné est incertain (cas des lignes et transformateurs).

Les différentes protections émettent leurs ordres en parallèles, lorsque pour des raisons de sélectivité la priorité doit être donnée à une protection, celle-ci est obtenue par un échelonnement dans le temps des ordres de déclenchement et non par un verrouillage inter protections.

Outre l'amélioration de la fiabilité, cette décomposition du système de protection en éléments autonomes a pour avantages de faciliter la maintenance, de permettre une évolution facile du système par remplacement ou adjonction d'un élément, et d'éviter les contraintes de réglage qui apparaissent lorsqu'une même protection assure deux fonctions différentes [28].

B. Alimentation à courant continu

L'alimentation des tranches à courant continu doit présenter une sécurité au moins égale à celle que l'on attend des équipements de protection.

Les dispositions adoptées sont les suivantes:

- Les protections et, automatismes d'une cellule sont alimentés sous 48V courant continu par deux sous tranches protégées par des disjoncteurs distinctes.
- Les protections sont réparties entre les deux sous-tranches, de telle sorte qu'en cas de perte de l'une d'elle, l'élimination du défaut soit assurée par les protections de l'autre sous-tranche (éventuellement avec une moins bonne sélectivité).
- Les polarités de commande et de signalisation du disjoncteur et des sectionneurs font l'objet d'une sous tranche indépendante des sous tranches protections. C'est-à-dire que les équipements de commande et de signalisation qui agissent sur le disjoncteur et les sectionneurs destinés à la tranche à protéger, sont alimentés indépendamment des équipements de protection.

Le nombre de batterie et la répartition dessous-tranches est fonction de la disposition géographique des équipements de protection:

- ❖ Postes équipés d'un bâtiment de relayage pour deux départs :

Une batterie 48V par bâtiment de relayage alimente les trois sous-tranches de chacun des deux départs.

❖ Postes à relayage centralisé : ces postes sont équipés de trois batteries, une batterie 48v pour les sous tranche protection n°01, une autre batterie 48V pour l'alimentation des sous tranche protection n°02 et enfin une batterie 125V pour l'alimentation dessous tranche disjoncteurs et sectionneurs (le 125V doit être utilisé pour des raisons de chutes de tension) [28].

C. Réducteurs de mesures

Les caractéristiques des réducteurs de mesure doivent être adaptées aux besoins des protections de manière à obtenir les performances souhaitées pour un coût minimal. Actuellement, les transformateurs de courant comportent en 400kV, 225kV ainsi que pour les postes H.T. blindés; un noyau supplémentaire destiné à la protection différentielle des barres. Ceci permet d'une part, de rendre la protection des barres totalement indépendante des autres protections et d'autre part, d'employer des protections du type à haute impédance qui nécessitent une alimentation propre à elle.

Notons que, sous certaines conditions (pas de protection de jeux de barres, puissance de court-circuit réduite) les T.C ne sont pas aussi complexes.

En ce qui concerne les réducteurs de tension on distingue deux types de transformateurs de tension, les diviseurs de tension capacitifs (TCT) et les transformateurs de tension magnétique, et ceux-ci respectivement destinés aux postes 225kV et HT [28].

D. Technologie des équipements

Les équipements de protection sont de construction électronique (analogique ou numérique). Par rapport à la technologique analogique, la technologie numérique permet une plus grande rapidité et un traitement plus complexe des grandeurs d'entrée.

Avant d'adopter définitivement ce type d'équipement, il y'aura lieu, bien entendu, de s'assurer de leur qualité par une expérimentation de durée suffisante sur le réseau.

Les équipements de protection numériques permettent une plus grande rapidité et un traitement plus complexe des grandeurs d'entrée, ils permettent en outre, de réduire la fréquence des maintenances [28].

E. Protection des câbles

Le système de protection d'un câble souterrain comprend :

- Une protection différentielle longitudinale instantanée à fils pilote.

- Une protection de secours temporisé, dont la temporisation est fonction du type de protection utilisée.

Il n'a pas été, jugé nécessaire de prévoir une protection complémentaire contre les défauts résistants vue la rareté de ce type de défaut.

En 225kV, la protection de secours est une protection de distance à verrouillage dont les temporisations du deuxième et du troisième stade sont réglées aux mêmes valeurs que celles des protections de lignes, mais, contrairement à ces dernières, le déclenchement du premier stade est temporisé d'un intervalle temps sélectif. Cette option résulte des considérations suivantes :

- Le risque de défaut sur un câble est beaucoup plus faible que sur une ligne, par conséquent le risque de déclenchement intempestif dû à l'absence de verrouillage en cas de défaut extérieur est, en valeur relative, plus grand que pour une ligne.
- Un déclenchement intempestif sur un câble est plus gênant que sur une ligne puisqu'il n'y a pas de réenclenchement automatique.

En HT, il est admis, comme pour les lignes, que le secours n'est pas sélectif, ce secours est assuré par une protection ampérométrique (3 relais de courant par phase et un relais homopolaire temporisé à la même valeur que le troisième stade des protections de distance des lignes) [28].

III.7. Protection des lignes T.H.T d'interconnexion

III.7.1. Lignes aériennes longues

Le système de protection des lignes T.H.T d'interconnexion est basé sur les principes suivants :

- Doublement des protections ;
- Séparation des circuits secondaires des transformateurs de courant ;
- Doublement des alimentations courant continu ;
- Bouclage des bobines de déclenchement des disjoncteurs.

A. Protection principale

Elle sera assurée par une protection de distance : cette protection sera :

- ✓ Un système de détection et de verrouillage par fusion fusible ;
- ✓ Un dispositif anti pompage.
- ✓ La protection sera dotée de boites d'essai devant De type statique ou numérique ;

- ✓ En montage en armoire sur porte pivotante ; donnant accès au câblage arrière de la protection ;
- ✓ Elle assure le déclenchement phase par phase du disjoncteur et élabore les différentes signalisations ;

A cette signalisation sont associés :

- ✓ Un réenclencheur mono-triphasé de type parallèle ;
- ✓ Un localisateur de défaut ;
- ✓ Un dispositif contre les refus de disjoncteur.

Cette protection comportera :

- ✓ Un dispositif accélération de stade ;
- ✓ Un système de déclenchement instantané lors de l'enclenchement de la ligne sur défaut ;

Permettre les différents contrôles et essais sans déranger l'exploitation normale de la travée. [2]

B. Protection de réserve

Elle sera assurée par une protection de distance, afin de pallier aux éventuels défauts de conception ; cette protection sera choisie de technologie différente de la protection principale.

Elle sera de type statique ou numérique ; en montage en armoire sur porte pivotante ; elle assure les déclenchements phase par phase du disjoncteur.

Elle est également associée :

- ✓ Au réenclencheur ;
- ✓ Au dispositif refus disjoncteur ;
- ✓ À la localisation de défaut ;
- ✓ A l'accélération des stades.

Cette protection comportera :

- ✓ Un système de détection et de verrouillage par fusion fusible ;
- ✓ Un système anti pompage ;
- ✓ Elle sera dotée de boîtes d'essai [2].

C. Protection complémentaire

- ✓ Elle est destinée à détecter les défauts résistants pour lesquels les protections de distance pourraient être insensibles ;
- ✓ Elle sera de type statique ou numérique ;
- ✓ Elle est directionnelle à temps inverse ;

- ✓ Elle comporte de plus un relais de temps additionnel.

Pendant les cycles monophasés de réenclenchement cette protection sera verrouillée par le réenclencheur ; le déclenchement sera toujours triphasé sans réenclenchement ; dans le cas où elle est livrée séparément ; cette protection comportera des boîtes d'essai [2].

D. Réenclencheur

Il est de type statique ou numérique et à fonctionnement parallèle ; sa mise en route est réalisée par les deux protections de distance, celles-ci ordonnent le déclenchement au disjoncteur, il permettra un réenclenchement monophasé après un temps de pause réglable et un réenclenchement triphasé, asservi à un dispositif de contrôle de tension et après un temps de pause réglable.

Pour éviter les cycles de déclenchement –réenclenchement très rapprochés dans le temps ; le premier réenclenchement démarre un temps de verrouillage de réenclencheur ; tout défaut se situant alors dans ce temps entraîne un déclenchement triphasé (DRD) [2].

E. localisation de défaut

Les lignes longues sont généralement équipées à une extrémité par un dispositif de localisation de défaut. Cet automate permet de situer le lieu de défaut pour faciliter la tâche des agents de la maintenance chargés de la réparation de la ligne [25].

Le fonctionnement de cet appareil est provoqué par les déclenchements monophasés de la protection principale et consiste à mesurer l'impédance de court-circuit qui est directement proportionnelle à la longueur de la ligne.

Dans les protections de distance, numériques, cette fonction est intégrée dans la base pour certaine protection et en option sur d'autres.

$$D = \frac{X_{CC}}{X_{0L}} \quad (III.1)$$

Avec :

X_{CC} : La réactance de court-circuit.

X_{0L} : La réactance linéique de la ligne.

La mesure du localisateur de défaut est effectuée au moment du passage du courant par zéro. Cet artifice permet d'éliminer l'influence de la résistance de défaut et de la résistance de la ligne sur la mesure de distance.

$$U = (R_L + R_d) \times L_L \, di/dt \quad (III.2)$$

Avec :

R_L : Résistance de la ligne.

R_d : Résistance de défaut.

L_L : Inductance de la ligne.

$$\text{Pour } i = 0 \Rightarrow U = L_L \frac{di}{dt} \quad (\text{III.3})$$



Figure.III.4 Localisateur de défaut numérique (poste HAMAMET 220kv).

F. Défaillance disjoncteur

L'installation d'une protection de défaillance disjoncteur se justifie parce qu'elle permet de préserver le matériel électrique et d'assurer une meilleure qualité de service. Cette protection fonctionne en cas de refus d'ouverture du disjoncteur de la travée. Son démarrage est effectué par l'ordre de déclenchement des protections principales et/ou de réserve. A l'échéance d'une temporisation de 0.3 Sec, si un critère de courant confirme la position fermée du disjoncteur, un ordre de déclenchement est élaboré et entraîne les ouvertures du couplage et de tous les départs aiguillés sur la même barre que le départ en défaut [25].

III.8 Protection des transformateurs T.H.T/H.T

III.8.1 Protections internes

Chaque transformateur de puissance possède ses propres protections internes confectionnées par le constructeur. Ainsi on distingue [28] :

A. Protection masse cuve

Dans le cas de réseaux à neutre à la terre un défaut «terre» se traduit par la circulation d'un courant intense de la cuve vers la terre.

Il est possible d'isoler de la terre, le transformateur, ce qui permet la mise en place d'un transformateur de courant entre cuve et terre, alimentant un relais ampérométrique donnant l'ordre de déclenchement du disjoncteur de protection en cas de défaut.

B. Prise de terre

Tous les transformateurs sont équipés de prise de terre. Le raccordement au circuit de terre du poste se fait directement ou éventuellement avec interposition d'un T.I pour la protection masse-cuve.

C. Relais de protection (BUCHHOLZ)

Il est utilisé pour la mise hors tension du transformateur en cas de dégagement important gazeux sous l'effet de l'arc électrique.

Ainsi, en cas de défaut, deux contacts peuvent fonctionner. Alarme et déclenchement du disjoncteur amont [28].

D. Indicateurs du niveau d'huile

Ils indiquent la hauteur de l'huile dans le conservateur des transformateurs de puissance, on trouve aussi les indicateurs de circulation d'huile.

E. Image thermique

C'est un équipement d'indication de température d'enroulement qui permet la mesure de la température la plus élevée de l'enroulement.

F. Thermostats

Ils sont montés directement sur les transformateurs et sont utilisés pour :

- Alarme et la mise en marche de la ventilation des radiateurs ou des aéro-réfrigérants des transformateurs de puissance.
- La signalisation déclenchement.

III.8.2 Protection externe

Les autres protections, qui doivent éliminer les défauts sur la liaison secondaire et assurer le secours pour les défauts extérieurs sont alimentées soit par des Bushings (TC tore) placé sur les bornes secondaires du transformateur et autotransformateur, soit par les réducteurs de mesure associés au disjoncteur secondaire; on peut utiliser [28]:

- Une protection ampère métrique qui doit être réglée à une valeur suffisamment élevée pour être insensible aux surcharges et être largement temporisée.
- Une protection de distance alimentée par les réducteurs de mesure de la cellule secondaire; cette protection orientée vers le transformateur permet l'élimination rapide (1^{er} stade) des défauts sur la liaison, et l'élimination en secours des défauts

extérieurs; cette protection ne peut fonctionner que si le réseau coté secondaire présente une puissance de court-circuit suffisante; en particulier, elle ne fonctionne pas si le disjoncteur secondaire est ouvert.

- Une protection différentielle de la liaison secondaire qui élimine rapidement les défauts sur la liaison en toutes circonstances, mais ne permet pas l'élimination en secours des défauts extérieurs.

III.8.2.1 Protection de secours côté T.H.T

Il sera prévu une protection de secours à maximum de courant triphasé coté T.H.T celle-ci sera raccordée sur bushings du transformateur et installée dans l'armoire T.H.T [2].

III.8.2.2 Protection de secours côté H.T

Il sera prévu une protection de secours à maximum de courant triphasé coté T.H.T celle-ci sera raccordée sur les bushings du transformateur et est installée dans l'armoire T.H.T [2].

III.8.2.3 Protection de surcharge

Elle sera assurée par une protection surcharge thermique ; elle sera raccordée aux bushings du transformateur coté T.H.T et installée dans l'armoire T.H.T [2].



Figure III.5 Protection de surcharge et max de I (poste HAMAMET 220kv)

III.8.2.4 Défaillance disjoncteur coté T.H.T

La défaillance disjoncteur des transformateurs est élaborée si une des protections a fonctionné sans que le disjoncteur T.H.T ne s'ouvre après une temporisation réglable, le critère de position fermée du disjoncteur T.H.T sera utilisé pour confirmer le refus disjoncteur, son action sera identique à celle de la défaillance disjoncteur ligne [2].

III.8.3 Protection par parafoudre

Les parafoudres à résistance non linéaires ont destinés à être connectés entre conducteur de chaque phase du transformateur et la terre, et ceci pour protéger le transformateur contre les surtensions dues aux coupures et fermetures des circuits et contre les surtensions d'origine atmosphériques [28].

III.9 Résistance aux efforts électrodynamiques

Les jeux de barres devront être réalisés pour résister aux efforts électrodynamiques dues au courant de court-circuit triphasé pouvant apparaître dans l'installation pour la détermination des efforts, on retient la valeur « crête » de la première demi-onde asymétrique de courant de court-circuit ; soit 2.55 fois la valeur de courant de court-circuit triphasé ; symétrique [2].

III.10 Caractéristiques diélectriques

L'ensemble des circuits électriques doit pouvoir supporter pendant 1 minute une tension efficace de 2000 volts (50hertz) appliquée entre un conducteur et le neutre mis à la masse.

Dans le cas d'appareils équipés de condensateurs d'antiparasitage entre les conducteurs et la masse, on utilise une tension continue de 3000 volts pendant 1 minute.

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 à la terre est limité par l'impédance de mise à la terre des points neutre des réseaux ;
- Des contraintes thermiques dues au dégagement de chaleur par effet joule dans les conducteurs [29].

III.11 Disjoncteurs

Le disjoncteur, dont la fonction principale est la protection, assure également la fonction commande, et suivant son type d'installation le sectionnement (déblocable). Les disjoncteurs HTA sont presque toujours montés dans une cellule HTA, et selon la définition de la Commission Électrotechnique Internationale (C.E.I), un disjoncteur

HTA est destiné à établir, supporter et interrompre des courants sous sa tension assignée (la tension maximale du réseau électrique qu'il protège) à la fois [13] :

- Dans des conditions normales de service, par exemple pour connecter ou déconnecter une ligne dans un réseau électrique.

III.12 Les relais de protection

Les relais de protection sont des appareils qui reçoivent un ou plusieurs informations (signaux) à caractère analogique (courant, tension, puissance, fréquence, température,...etc.) et les transmettent à un ordre binaire (fermeture ou ouverture d'un circuit de commande) lorsque ces informations reçues atteignent les valeurs supérieures ou inférieures à certaines limites qui sont fixées à l'avance. Donc le rôle des relais de protection est de détecter tout phénomène anormal pouvant se produire sur un réseau électrique tel que le court-circuit, variation de tension. ...etc. Un relais de protection détecte l'existence de conditions anormales par la surveillance continue, et détermine quels disjoncteurs à ouvrir et alimente les circuits de déclenchement [13].

III.12.1 Les type de relais

Les relais de protection électrique sont classés en 4 types [13]:

- ◆ Les relais électromécaniques.
- ◆ Les relais statique.
- ◆ Les relais thermique.
- ◆ Les relais numériques.

III.13 Le signal de défauts

Quand il existe un défaut de fonctionnement, la valeur de tension et de courant change, tout signal utilisé dans la détection de défaut s'appelle signal de Relais.

Par exemple [23] :

- La fréquence (peut augmenter ou diminuer).
- La direction du courant électrique (peut inverser le sens du courant, en particulier dans le cas des générateurs).
- La valeur d'impédance Z (peut se changer au changement des zones de défaut, cela peut aider à détecter la position de ce dernier).
- La différence entre la valeur du courant entré et le courant sorti à un élément (la grande variation entre eux est à cause d'un défaut).

Un changement dans l'un de ces signaux (ou dans les valeurs de tension et du courant) supérieure des limites permises signifie que quelque chose d'anormal s'est produite dans le réseau et doit être découverte et étudiée, et en doit ensuite isoler le défaut du réseau.

III.14 Protection de distance

La protection de distance constitue la fonction principale de cet équipement de protection de départ, qui distingue par sa précision de mesure élevée et ses larges possibilités d'adaptation aux caractéristiques d'un réseau donné .cet unité de protection peut être complétée par toute une série de fonctions additionnelles [26].

III.14.1 Rôle d'une protection de distance

Alimentée localement par des réducteurs de mesure qui lui fournissent l'image du réseau, en cas de présence de défaut électrique dans sa zone de surveillance, le rôle d'une protection est de détecter celui-ci et de commander le disjoncteur qui éliminera le défaut.

Les défauts ont des causes diverses : Foudre ; Conditions climatiques ; Séismes ; Feux de brousse ; Mécanique (chute d'un pylône) ; Vieillessement du matériel et thermique [23].

III.14.2 Principe de mesure de l'impédance

La protection à distance utilise pour localiser un défaut une mesure de distance entre ce dernier et le point où elle est installée. Elle est déterminée grâce à une mesure de l'impédance directe, qui varie de $0,33\Omega$ à $0,42\Omega$ au kilomètre en fonction du type de ligne très haute tension. Cette mesure doit présenter un caractère dirigé. La prise en compte de la partie réactive de l'impédance directe (Z_d) permet d'affranchir la mesure de distance et de la résistance de défaut [23].

En absence de défaut (voir la Figure III.6), la protection de distance ne voit qu'une impédance apparente du réseau, dépendante du transit effectué sur la ligne, mais aucunement assimilable à l'impédance directe de la ligne.

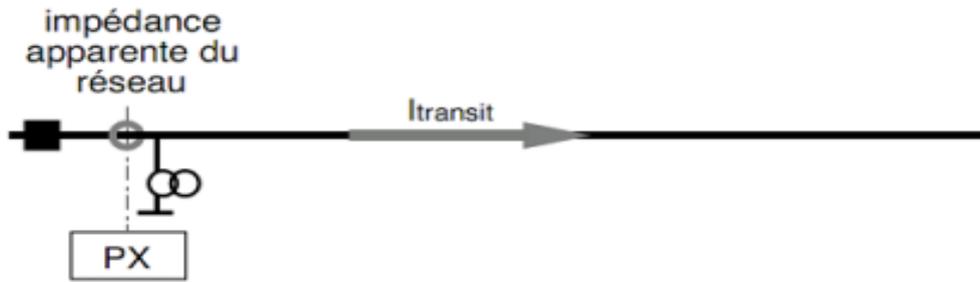


Figure III.6 Protection à distance en absence d'un défaut.

La protection à distance doit donc séparer la situation avec défaut de la situation normale sans défaut: c'est l'un des rôles de la mise en route. On entre alors dans le domaine de validité des formules ci-dessus, encore faut-il savoir laquelle utiliser.

En présence d'un défaut (voir la Figure III. 7), l'impédance directe entre le point de défaut et le point où est située la protection peut être déterminée à partir des tensions et des courants [23].

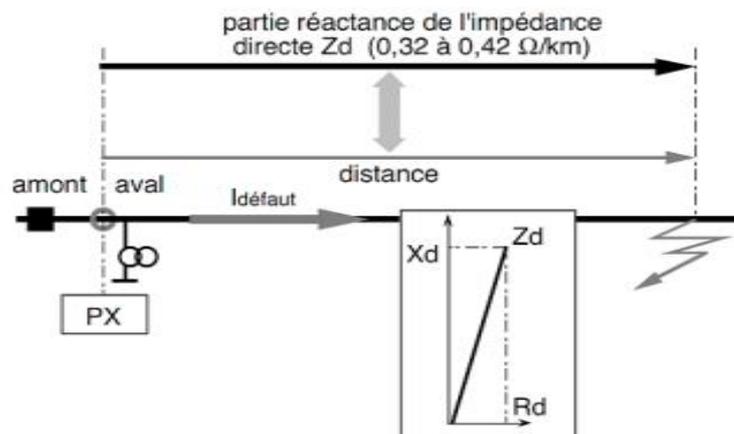


Figure III.7 Protection à distance en présence d'un défaut.

III.14. 3 Valeurs d'impédances ligne HT

Bien que la section du conducteur intervienne, ainsi que la configuration géométrique du pylône, pour les calculs d'ordre de grandeur, les valeurs ci-dessous pour les lignes aériennes pourront être retenues [30].

$$R = \rho \frac{L}{S} \quad (\text{III.4})$$

L: Longueur de la canalisation.

S : Section de la canalisation.

ρ: Résistivité de la ligne prise égale à :

ρ_{min} = la résistivité du conducteur à 20°C, (ρ_0) pour le calcul des courants de court-circuit maximaux.

ρ_{max} = 1.25 fois la résistivité du conducteur à 20°C, pour le calcul des courants de court-circuit minimaux.

La résistivité du conducteur à 20° est donnée par la norme :

Pour le cuivre :

$$\rho_0 = \frac{1}{54} \frac{\Omega mm^2}{m}$$

Pour l'aluminium :

$$\rho_0 = \frac{1}{54} \frac{\Omega mm^2}{m}$$

La réactance directe et inverse des conducteurs est égale à :

$$\mathbf{X} = \mathbf{xL} \quad \text{(III.5)}$$

Avec :

x: Réactance linéique du câble (Ω/km), étant égale conventionnellement à :

0.08 mohms/m pour les câbles multiconducteurs.

0.15 mohms/m pour les câbles mono conducteurs.

0.35 mohms/m pour les lignes aériennes

Donc l'impédance directe d'un câble est égale à :

$$\mathbf{Zd} = \sqrt{(\mathbf{R}^2 + \mathbf{X}^2)} \quad \text{(III.6)}$$

Remarque :

La réactance homopolaire est égale à 3 fois l'impédance directe

$$\mathbf{X}_{L0} = \mathbf{3} \times \mathbf{Z}_d \quad \text{(III.7)}$$

III.15 Modèle électrique d'une ligne

Le modèle électrique d'une ligne se compose de trois éléments.

- ◆ Élément résistif « R » ;
- ◆ Élément inductif « L » ;
- ◆ Élément capacitif « C » ;

Chacun de ces éléments affecte le comportement global de la ligne suite à une perturbation électrique subit par cette même ligne. Suite à un court-circuit, un régime

Chacun de ces éléments affecte le comportement global de la ligne suite à une

perturbation électrique subit par cette même ligne. Suite à un court-circuit, un régime transitoire apparaît.

Il est maintenu temporairement par l'effet résonnant de l'ensemble des inductances et des capacités du réseau. Lors de défaut de ligne, l'importance du courant de défaut sature divers équipements. La protection de ligne doit résister à tout cela. Sur le plan vectoriel, la phase du courant par rapport à la tension est aussi affectée par l'inductance de la ligne. La protection de ligne doit en tenir compte. Il est donc important de bien comprendre les différents éléments qui composent la ligne [31].

III.15.1 la résistance de la ligne

Les résistances à courant continu d'un conducteur homogène de longueur l en (m), de section uniforme s en (mm^2) et de résistivité ρ à 20°C ($\Omega \cdot \text{mm}^2 / \text{m}$) est donnée par la formule [5] :

$$R = \rho \frac{L}{s} \quad (\Omega/\text{km})$$

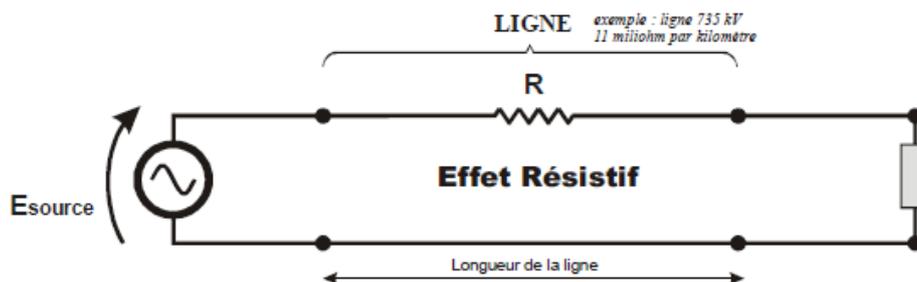


Figure III.8 Effets résistifs de la ligne [31].

La valeur de la résistance en courant continu peut être modifiée par l'effet de spirilage du conducteur et par l'effet température.

a. Effet de spirilage du conducteur

L'effet de spirilage du conducteur fait augmenter la résistance de 1% environ pour les conducteurs à trois brins et de 2% environ pour les conducteurs a nombre de brins supérieur.

b. Effet de température

La résistance du matériau croit avec la température selon la loi :

$$\frac{R_2}{R_1} = \frac{T+t_2}{T+t_1} \quad \text{(III.8)}$$

♦ t_2 et t_1 sont les températures en $^\circ\text{C}$ à l'état initial et à l'état final du conducteur.

- ◆ R_1 et R_2 sont les résistances du conducteur respectivement aux températures t_2 et t_1 ;
- ◆ T est une température paramétrique en °C lie à la nature du matériau du conducteur ;

c. Effet pelliculaire ou effet Kelvin

En courant alternatif, la densité de courant dans un conducteur n'est pas uniforme à travers la section du conducteur.

La densité de courant va en croissant vers la périphérie du conducteur ce phénomène s'appelle «effet pelliculaire» ou « effet kelvin».

Ou «effet de peau», modifie la valeur de la résistance et l'inductance du conducteur.

Le facteur de Kelvin est calculé à l'aide de l'expression suivante :

$$q = \pi \cdot d \sqrt{\frac{2 \cdot f \cdot 10^{-5}}{\rho}} \quad (\text{III.9})$$

d : diamètre de conducteur en cm.

f : fréquence du réseau en Hz.

ρ : résistivité du métal ($\Omega \cdot \text{mm}^2/\text{km}$).

III.15.2 Inductance de la ligne

L'inductance est la grandeur du circuit qui relie la tension induite à la vitesse de la variation du courant. La variation de l'intensité de courant dans les conducteurs fait changer le nombre de ligne du champ magnétique et l'intensité de celui-ci dans le circuit [5].

Toute variation du flux couple induit une tension proportionnel à la vitesse de variation du flux

$$e = \frac{d\phi}{dt} = L \frac{di}{dt} \quad (\text{III.10})$$

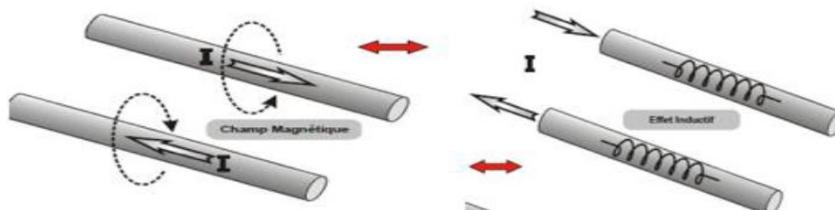


Figure III.9 effet inductif [31].

III.15.3 La capacité de la ligne

Lorsqu'une différence de potentiel est présente entre deux conducteurs, une force électromotrice est exercée sur toutes charges électriques situées dans ce champ de force. Ce champ de force est appelé champ électrique. Son intensité diffère en chaque point de l'espace séparant les deux conducteurs.

Il est très fort à la proximité des conducteurs, et faiblit au fur et à mesure qu'il s'éloigne du conducteur. Il se mesure en volt. Par La force exercée sur une charge peut être attractive ou répulsive selon la polarité de la charge.

Ce champ électrique arrive à refouler ou compresser des charges électriques. C'est-à-dire, accumuler des charges électriques là où ils n'arrivent pas à passer d'un côté à l'autre. La présence de ces charges arrive donc à maintenir d'elle-même le champ électrique, ce qui explique l'effet mémoire du condensateur.

Le déplacement de ces charges électriques est limité par la résistance électrique du milieu, d'où le temps de charge et de décharge. On représente donc l'effet capacitif entre les deux conducteurs du modèle électrique de la ligne. Ce phénomène est fonction de la configuration spatiale des deux conducteurs en causes. Plus les conducteurs sont distants l'un de l'autre, et plus l'effet capacitif est petit par l'affaiblissement du champ électrique.

Comme l'effet capacitif est parallèle dans le modèle électrique de la ligne, la conductance est utilisée comme mesure. L'unité est le micro Siemens par kilomètre.

L'unité Siemens est équivalente à l'unité MHO. Les conductances s'additionnent lorsque les charges sont en parallèles. Lorsqu'un court-circuit apparaît entre deux conducteurs, la différence de potentiel disparaît à l'endroit du court-circuit, éliminant tout champ électrique.

L'effet capacitif n'est plus ressenti. Le court-circuit se retrouve en parallèle avec l'effet capacitif de la ligne et l'annule. L'effet capacitif n'est donc plus considéré lors de défaut de ligne [31].

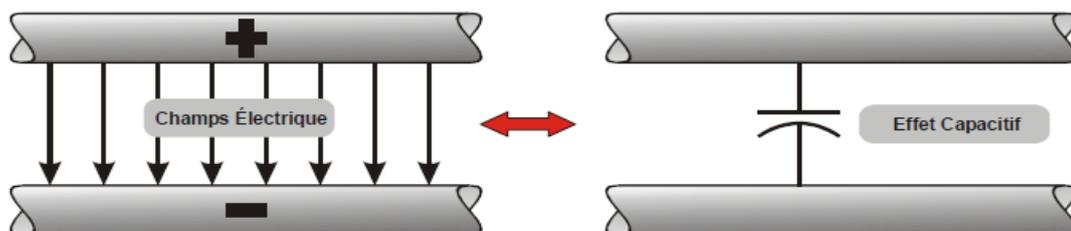


Figure III.10 Effets capacitifs [31].

III.16 Phénomène d'effort électrodynamique

Le passage du courant dans un conducteur entraîne l'**échauffement** de celui-ci ; ce conducteur est également soumis à d'autres phénomènes d'ordre climatique tels que le vent, l'ensoleillement et la température ambiante. Il est donc important de connaître cet échauffement afin d'assurer aux conducteurs une **température de fonctionnement** compatible, d'une part, avec les matériaux utilisés pour leur fabrication et, d'autre part, avec la flèche de ceux-ci au-dessus du sol et des constructions.

En cas de court-circuit dans une configuration de ligne ou de poste en conducteurs souples, on mesure alors des surtensions mécaniques (traction et flexion) appelées **efforts électrodynamiques** au niveau des supports et des isolateurs d'ancrage. On observe également des mouvements de conducteurs très importants.

Ces efforts pouvant être considérables, il est indispensable de les prendre en compte dès la conception d'un nouvel ouvrage. Ce sont ces deux phénomènes qui sont étudiés dans ce mémoire [32].

III.17 Pincement dans un faisceau de conducteurs

III.17.1 Description du phénomène

Pour augmenter la capacité de transit des ouvrages tout en limitant les pertes et le bruit produit par effet couronne, les conducteurs de phase sont souvent constitués de plusieurs sous-conducteurs réunis en faisceau (faisceau double jusqu'à 225 kV, triple ou quadruple en 400 kV). En cas de court-circuit s'ajoute alors aux efforts électrodynamiques précédemment cités un phénomène supplémentaire appelé **pincement**.

Celui-ci résulte de l'attraction des sous-conducteurs du faisceau parcourus par un même courant et séparés par une distance faible (généralement 600 mm pour les faisceaux doubles ou triples et 400 mm pour les faisceaux quadruples). Il induit des forces très importantes dans les entretoises assurant l'écartement du faisceau, un contact des conducteurs entre ces entretoises et des surtensions mécaniques très importantes qui sont transmises à toute la structure.

La bonne connaissance de ces phénomènes est nécessaire car ils sont souvent dimensionnés pour certains éléments (ancrage des conducteurs et entretoises en particulier). **La figure III.11** permet de comprendre les différentes phases du mouvement [32].

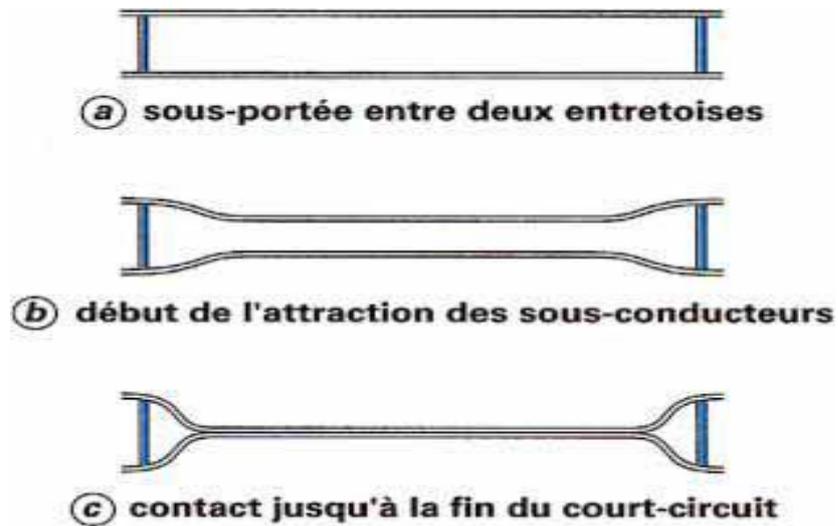


Figure III.11 Phénomène de pincement sur un faisceau double.

III.18 Conclusion

Dans ce chapitre, on a examiné de nombreux concepts essentiels sur le système de protection, car ces concepts sont représentés par des définitions, des objectifs, des équipements ... etc.

L'un des objectifs les plus importants du système de protection est de maintenir la continuité de l'alimentation électrique, d'assurer la continuité de l'alimentation électrique et d'assurer la stabilité des réseaux électriques, en tenant compte des efforts électrodynamiques d'une nouvelle conception.



Chapitre IV

Optimisation des efforts électrodynamiques



IV.1 Introduction

Dans les installations de production et de distribution de l'énergie électrique, peuvent apparaître en valeurs très grandes des courants de court-circuit. Ces courants de court-circuit déterminent des efforts électrodynamiques qui produisent des contraintes mécaniques sur les voies de courant, sur les contacts électriques et sur les autres composants des équipements électriques. Ces contraintes mécaniques peuvent déformer, déplacer ou détruire les voies de courant ainsi que les éléments de la construction. Le calcul des efforts électrodynamiques est nécessaire pour [33] :

- Pour le choix des appareils électrique qui doivent supporter sans dégâts mécaniques la valeur du courant de court-circuit calculée dans les points de montage;
- Pour la conception des appareils électriques qui doivent résister au courant de stabilité électrodynamique.

Dans ce chapitre, nous allons présenter les méthodes de calcul des efforts électrodynamiques.

IV.2 Efforts électrodynamiques

La circulation de courants dans des conducteurs parallèles induit dans ces conducteurs des forces électromagnétiques. Ces forces sont attractives ou répulsives (selon que les courants sont de même sens ou de sens opposé) et également réparties le long des conducteurs. Elles sont proportionnelles au produit des intensités circulant dans les deux conducteurs.

En cas de court-circuit, on observe alors des surtensions mécaniques appelées efforts électrodynamiques au niveau des supports et des isolateurs d'ancrage, ainsi que des mouvements importants des conducteurs [32].

IV.3 Origine des efforts électrodynamiques

La mise en évidence et la compréhension, il y a une centaine d'années, des influences mutuelles que ce soit entre deux éléments de courant ou entre champ magnétique et courant, électrique (travaux d'Oersted, d'Ampère...) ont permis de bâtir un cadre théorique qui intègre ces phénomènes dynamiques entre conducteurs parcourus par des courants électriques. Le sens des efforts électrodynamiques est connu (répulsion si les courants dans les conducteurs circulent dans des directions opposées, attraction dans le cas contraire) et leurs valeurs s'obtiennent par application des lois du magnétisme [34].

IV.4 Méthodes de calcul des efforts électrodynamiques

Il existe en fait quatre méthodes de calcul des efforts électrodynamiques :

IV.4.1 Loi de Biot et Savart

Les physiciens français Biot et Savart ont trouvé l'expression du champ magnétique obtenu lors de l'expérience d'Oersted. Un fil conducteur rectiligne de longueur infinie, parcouru par un courant I , crée, en un point M de l'espace situé à une distance r du fil, un champ magnétique dont :

- ❖ la direction est telle que les lignes de champ soient des cercles axés sur le fil.
- ❖ le sens est donné par la règle du "bonhomme d'Ampère": celui-ci, lorsqu'il est parcouru par I , des pieds vers la tête, voit en M le champ à sa gauche [35].

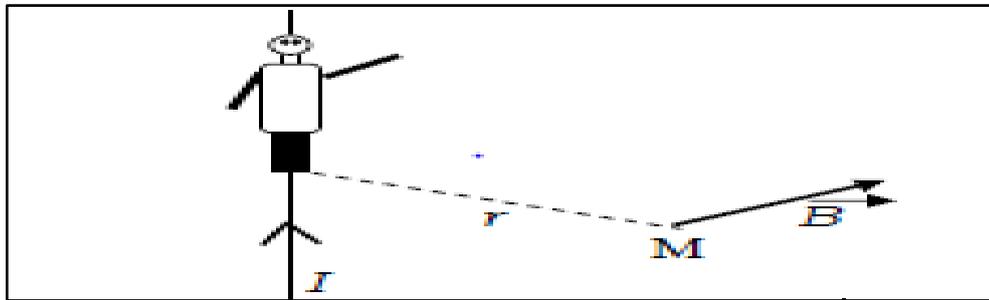


Figure. IV.1 la règle du "bonhomme d'Ampère".

- ❖ le module est:

$$B = \frac{\mu_0 I}{2\pi r} \quad (\text{IV.1})$$

Où μ_0 est la perméabilité magnétique du vide.

Dans le système MKSA

$$\mu_0 = 4\pi 10^{-7} \text{ Henry par mètre: H/m} \quad (\text{IV.2})$$

Dans le cas d'un circuit fermé de forme quelconque, chaque élément de courant $I d\vec{l}$, crée en M un champ élémentaire.

$$d\vec{B} = \frac{\mu_0}{4\pi} \frac{I d\vec{l} \wedge \vec{u}}{r^2} \quad (\text{IV.3})$$

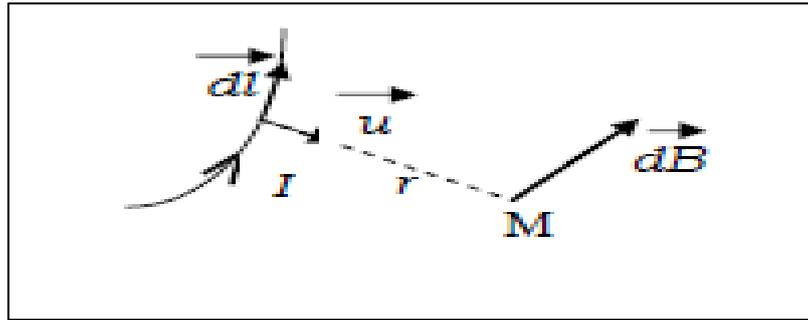


Figure. IV.2 la loi de Biot & Savart.

C'est l'expression de la loi de Biot & Savart dans le cas général.

Le vecteur u est orienté, comme le montre la figure, de la source vers le point M .

IV.4.2 Théorème d'Ampère

Déduit de la formule de Biot et Savart, il s'énonce de la façon suivante :

Soit I l'intensité qui parcourt un conducteur traversant une surface quelconque de contour C , la circulation du champ magnétique le long de C est donnée par l'équation [34] :

$$\oint_C \mathbf{B} \cdot d\vec{l} = \mu_0 \cdot I \quad (\text{IV.4})$$

IV.4.3 Méthode de la formule de Laplace [35]

Un conducteur linéaire droit de la longueur L avec le courant I dans un flux de champ magnétique externe, de densité \mathbf{B} , le calcul exige seulement que le champ magnétique \mathbf{B} soit déterminé de sorte que la force soit obtenue à partir :

$$\vec{F} = \int \vec{I} \times \vec{B} = L \cdot \vec{I} \times \vec{B} \quad \text{NEWTONS} \quad (\text{IV.5})$$

Pour un conducteur linéaire de la longueur L traversé par un courant I , le produit $I \times B$ est la force par unité de longueur [36].

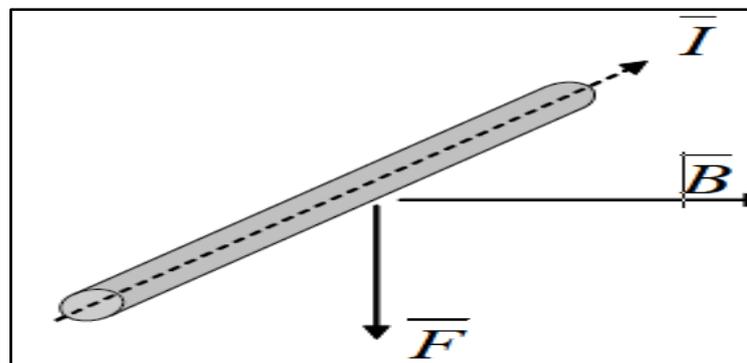


Figure IV.3 La force de Laplace [36].

a) Liaisons triphasées

Considérons le cas d'un arrangement plat de trois phases conducteurs [36]:

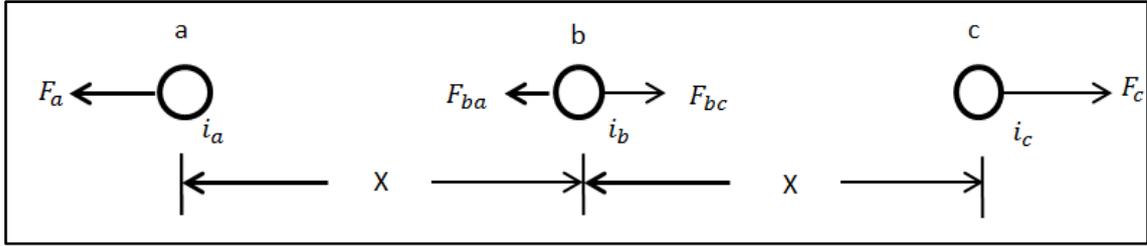


Figure IV.4 Cas d'une disposition plate de triphasés conducteurs [36].

Prenant les courants de phase i_a , i_b et i_c , et supposant qu'ils sont tous dirigés dans la page, les diverses forces F_a , F_b et F_c peuvent être calculé.

$$F_a = F_{ab} + F_{ac} = \frac{\mu_0}{2\pi} \left[\frac{i_a i_b}{x} + \frac{i_a i_c}{2x} \right] \quad \text{N/m} \quad (\text{IV.6})$$

$$F_c = F_{bc} + F_{ca} = \frac{\mu_0}{2\pi} \left[\frac{i_b i_c}{x} + \frac{i_c i_a}{2x} \right] \quad \text{N/m} \quad (\text{IV.7})$$

$$F_b = F_{ba} + F_{bc} = \frac{\mu_0}{2\pi} \left[\frac{i_b i_a}{x} + \frac{i_b i_c}{2x} \right] \quad \text{N/m} \quad (\text{IV.8})$$

Les courants et leurs phasors sont :

$$i_a = I_a \sin \omega t = I_a < 0 \quad (\text{IV.9})$$

$$i_b = I_b \sin (\omega t - 120) = I_b < -120 \quad (\text{IV.10})$$

$$i_c = I_c \sin (\omega t + 120) = I_c < 120 \quad (\text{IV.11})$$

Les forces de crête qui se produisent sur chaque conducteur sous les conditions équilibrées symétriques ($I_a = I_b = I_c = I$) peuvent être écrite comme :

$$f_{a(\text{crete})} = 0.808 \frac{\mu_0 I^2}{2\pi x} \quad (f_{c(\text{crete})}) \quad \text{N/m} \quad (\text{IV.12})$$

$$f_{b(\text{crete})} = 0.866 \frac{\mu_0 I^2}{2\pi x} \quad \text{N/m} \quad (\text{IV.13})$$

IV.4.4 Théorème de Maxwell

Le travail des forces électromagnétiques exercé au cours du déplacement d'un conducteur indéformable parcouru par un courant invariable et placé dans un champ magnétique à pour expression :

$$w = i \cdot \phi \quad (\text{IV.14})$$

Où ϕ est le flux du champ magnétique balayé pendant le déplacement Exploitée sous la forme du travail élémentaire, elle permet d'obtenir facilement les composantes F_x , F_y et F_z de la résultante F des forces électromagnétiques [34] :

$$\begin{aligned} dw &= i. d\phi \\ &= \int d\bar{f}. d\bar{l} \\ &= \bar{F}. d\bar{l} \\ F_x &= i. \frac{\delta\phi}{\delta x} \end{aligned} \quad (IV.15)$$

Et de même pour F_y et F_z

$$F_y = i. \frac{\delta\phi}{\delta y} \quad (IV.16)$$

$$F_z = i. \frac{\delta\phi}{\delta z} \quad (IV.17)$$

IV.4.5 Méthode énergétique

On considère un électroaimant dont l'armature se déplace sur la direction de la coordonnée généralisée (Figure IV.5) [33].

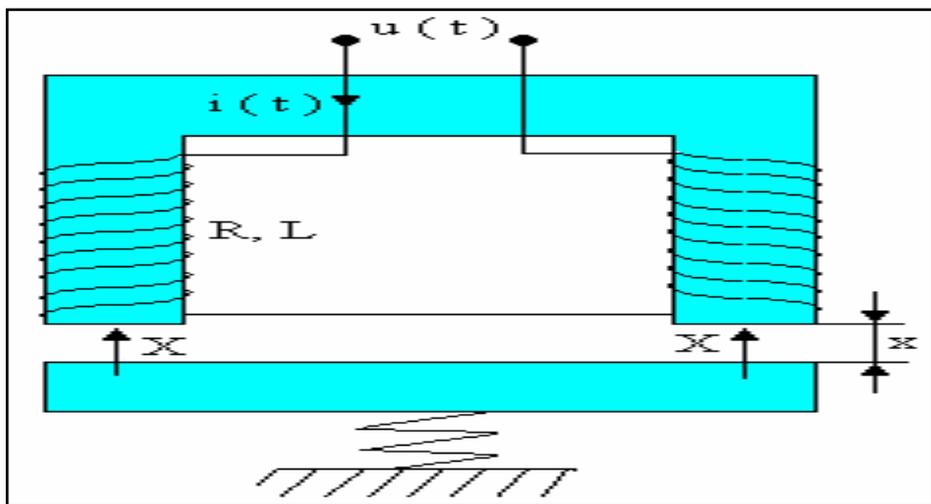


Figure IV.5 Relatif à la méthode énergétique.

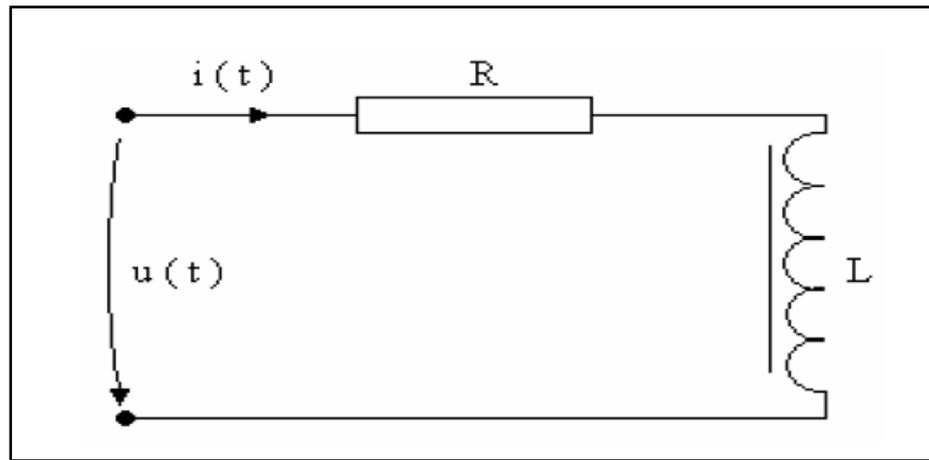


Figure IV.6 Schéma électrique équivalent de l'électroaimant.

L'équation de bilan énergétique, dans l'intervalle de temps , pour l'électroaimant présenté à la figure **IV.6** est :

$$uidt = Ri^2 dt + dW_m + Xdx \quad (\text{IV.18})$$

Ou : $uidt$: l'énergie reçu aux bornes ;

$Ri^2 dt$: les pertes par effet Joule dans l'enroulement de la bobine ;

dW_m : les pertes par effet Joule dans l'enroulement de la bobine ;

Xdx : le travail mécanique pour déplacer l'armature mobile.

L'équation du circuit électrique (IV.9) est la suivante :

$$u = Ri + \frac{d\psi}{dt} \quad (\text{IV.19})$$

En remplaçant l'expression de la tension (relation IV.19) dans l'équation de bilan (IV.18) on obtient après simplifications:

$$dW_m = id\psi - Xdx \quad (\text{IV.20})$$

Si on suppose que l'armature mobile ne se déplace pas (constant=x) alors $dx=0$ et la relation (IV.20) devient $dW_m = id\psi$ et l'énergie magnétique est donnée par la relation suivante :

$$W_m = \int_0^\psi id\psi \quad (\text{IV.21})$$

W_m^* est l'énergie magnétique complémentaire (où la coénergie magnétique). On constate que pour les circuits magnétiques non linéaires $W_m \neq W_m^*$ tandis que pour les circuits magnétiques linéaires $W_m = W_m^*$

Si on suppose que le déplacement de l'armature mobile se fait à flux magnétique constant à partir de la relation (IV.20) on obtient la première formule des forces généralisées :

$$X = - \left. \frac{dW_m}{dx} \right|_{\psi=ct} \tag{IV.22}$$

Si on tient compte que

$$W_m + W_m^* = \psi i \tag{IV.23}$$

En appliquant la différentielle pour l'équation (VI.22) on obtient :

$$dW_m + dW_m^* = i d\psi + \psi di \tag{IV.24}$$

Et en remplaçant l'expression de $i d\psi$ par celle obtenue de la relation (IV.20), on obtient après simplifications :

$$dW_m^* = \psi di + X dx \tag{IV.25}$$

Si on suppose que le déplacement de l'armature mobile se fait au courant constante à partir de la relation (IV.25) on obtient la deuxième formule des forces généralisées :

$$X = \left. \frac{dW_m^*}{dx} \right|_{i=ct} \tag{IV.26}$$

a) Quelques formules pour le calcul de l'énergie magnétique

L'énergie magnétique du système, pour des milieux non linéaires, peut être calculée à l'aide de la formule suivante :

$$W_m = \int_V \left(\int_0^{B_0} H(B) dB \right) dV \tag{IV.27}$$

Pour les milieux linéaires, l'énergie magnétique peut être calculée à l'aide d'une des formules suivantes :

$$W_m = \frac{1}{2} \sum_{k=1}^n \Psi_k i_k = \frac{1}{2} \sum_{k=1}^n \sum_{j=1}^n L_{kj} i_j i_k \tag{IV.28}$$

$$W_m = \frac{1}{2} \sum_{k=1}^n L_k i_k + \sum_{k=1}^n \sum_{j=1}^n M_{kj} i_k i_j \tag{IV.29}$$

$$W_m = \int_V \frac{\vec{B} \cdot \vec{H}}{2} dV \tag{IV.30}$$

où L_K , M_{kj} sont les inductances propres et les inductances mutuelles des circuits, Ψ_k - le flux magnétique total du circuit k , \vec{B} et \vec{H} sont l'induction magnétique et l'intensité du champ magnétique.

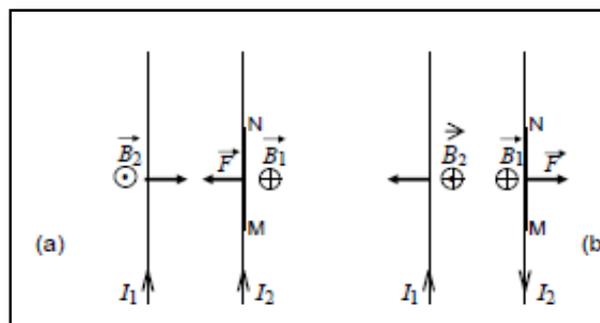


Figure IV.7 Interaction entre deux courants [35].

L'énergie magnétique a, conformément à la relation (IV.28), l'expression explicite suivante :

$$W_m = \frac{L_1 i_1^2}{2} + \frac{L_2 i_2^2}{2} + M i_1 i_2 \quad (\text{IV.31})$$

où :

$W_{m1} = \frac{L_1 i_1^2}{2}$ représente l'énergie magnétique propre de la bobine 1 ;

$W_{m2} = \frac{L_2 i_2^2}{2}$ représente l'énergie magnétique propre de la bobine 2 ;

$W_{m12} = M i_1 i_2$ représente l'énergie magnétique d'interaction entre les bobines 1 et 2;

Si on considère la coordonnée généralisée x , l'effort électrodynamique d'interaction entre les deux bobines sur la direction de cette coordonnée est donnée par la relation suivante :

$$F = \frac{dW_{m1}}{dx} + \frac{dW_{m2}}{dx} + \frac{dW_{m12}}{dx} \quad (\text{IV.32})$$

ou

$$F = \frac{1}{2} i_1^2 \frac{dL_1}{dx} \Big|_{i_1=cste} + \frac{1}{2} i_2^2 \frac{dL_2}{dx} \Big|_{i_2=cste} + \frac{dM}{dx} i_1 i_2 \Big|_{i_1; i_2=cste} \quad (\text{IV.33})$$

où :

$F_1 = \frac{1}{2} i_1^2 \frac{dL_1}{dx}$ représente la force électrodynamique intérieure de la bobine 1 ;

$F_2 = \frac{1}{2} i_2^2 \frac{dL_2}{dx}$ représente la force électrodynamique intérieure de la bobine 2 ;

$F_{12} = \frac{1}{2} i_1 i_2 \frac{dM}{dx}$ représente la force électrodynamique d'interaction entre les bobines 1 et 2 .

$$F = \frac{1}{2} i_1^2 \frac{dL_1}{dx} + \frac{1}{2} i_2^2 \frac{dL_2}{dx} + \frac{dM}{dx} i_1 i_2$$

$$\frac{dL_1}{dx} = 0 \quad \text{et} \quad \frac{dL_2}{dx} = 0$$

$$F = \frac{dM}{dx} i_1 i_2 \quad (\text{IV.34})$$

$$M = \frac{\mu_0 l}{2\pi} \left[\ln \left(\frac{2l}{x} \right) - 1 \right] \quad (\text{IV.35})$$

$$F = -i_1 i_2 \times l \times \frac{x}{2l} \times \frac{2l}{x^2} \quad (\text{IV.36})$$

$$F = -\frac{\mu_0}{2\pi x} \times i_1 i_2 l \quad (\text{IV.37})$$

IV.5 Stabilité électrodynamique des équipements électriques

La stabilité électrodynamique est définie comme étant la capacité de l'équipement électrique de faire face aux effets mécaniques provoqués par le courant de court-circuit. La stabilité électrodynamique est mesurée par le courant limite dynamique qui est la plus grande valeur de crête qui peut être supportée par l'équipement à l'état fermé sans souffrir des déformations permanentes ou des dégâts mécaniques et sans se souder les contacts[2].

IV.6 Application et résultats

Pour notre étude du phénomène d'effort électrodynamique nous avons choisis notre application sur une ligne THT dont les spécifications se résument dans le tableau suivant :

Ouvrage	Appareillage/commande		Charge/Type	Défaut appliqué
Ligne THT 220 kV d'une longueur 69.7km	Disjoncteur triphasé	Commande mono - Externe	10kV/résistive ou inductive	Variation de la distance entre les phases. Simulation du vent. Court-circuit : A. Phase/terre ; B. Biphasé/terre ; C. Triphasé/terre ; D. Biphasé ; E. Triphasé.

Tableau IV.1 détail de l'application variation de distance et de court-circuit.

Pour la méthode de calcul, et vu le manque de temps nous avons choisis la méthode de variation de l'énergie du champ magnétique déjà expliqué plus haut.

IV.7 Modélisation du phénomène physique

Pour ce faire nous avons utilisé le Simulink de MATLAB pour modéliser soit la ligne, soit la méthode de variation de l'énergie du champ magnétique, les bobines dans cette méthode seront considérées celles des lignes, vu ce champ électromagnétique entourent le câble de ligne. la figure IV-8 illustre le modèle créé, où nous avons simulé une source de tension de 220 kV, aboutissant sur un disjoncteur triphasé puis l'énergie électrique est transportée sur 69.7km vers la charge qui au choix soit résistive ou inductive.

Sur la longueur de la ligne nous avons créé des défauts différents afin de pouvoir mesurer l'effort électrodynamique (déjà cités sur le tableau précédent).

IV.8 Résultats et discussion

IV.8.1 Résultats et interprétation

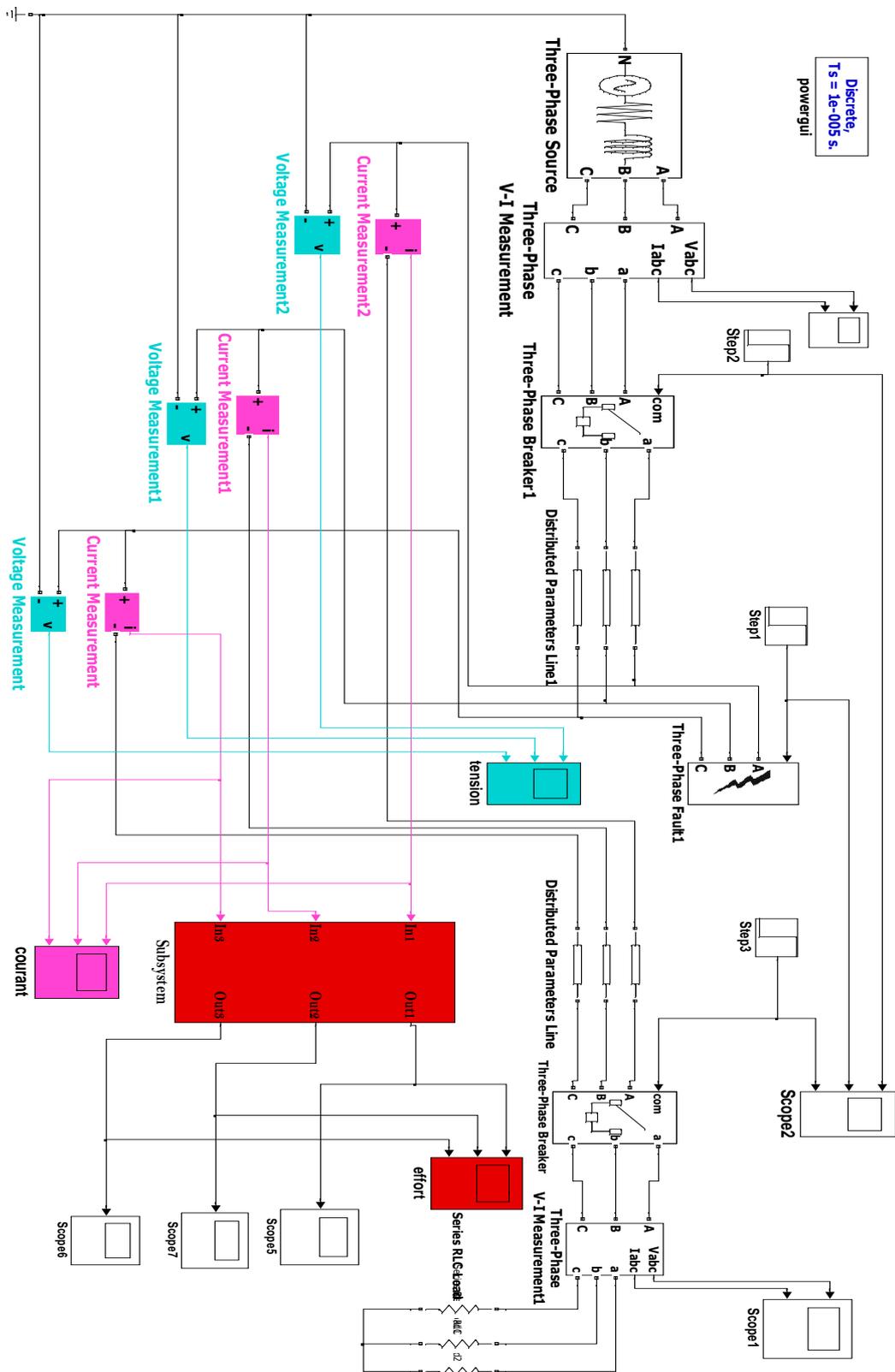
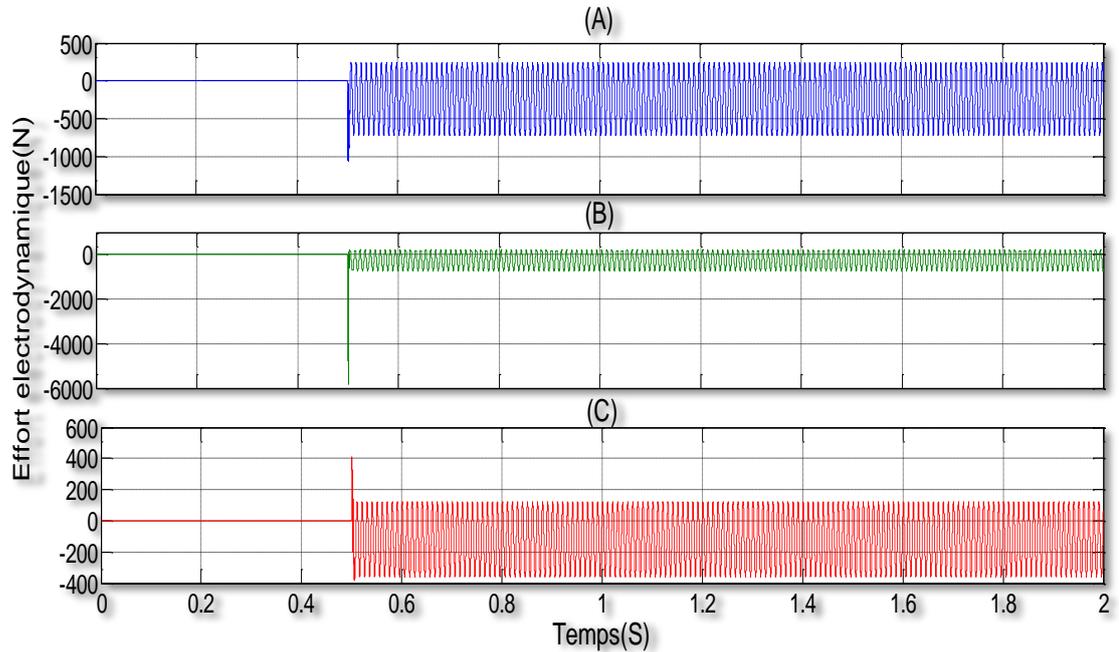


Figure IV.8 Schema bloc d'un système (1)

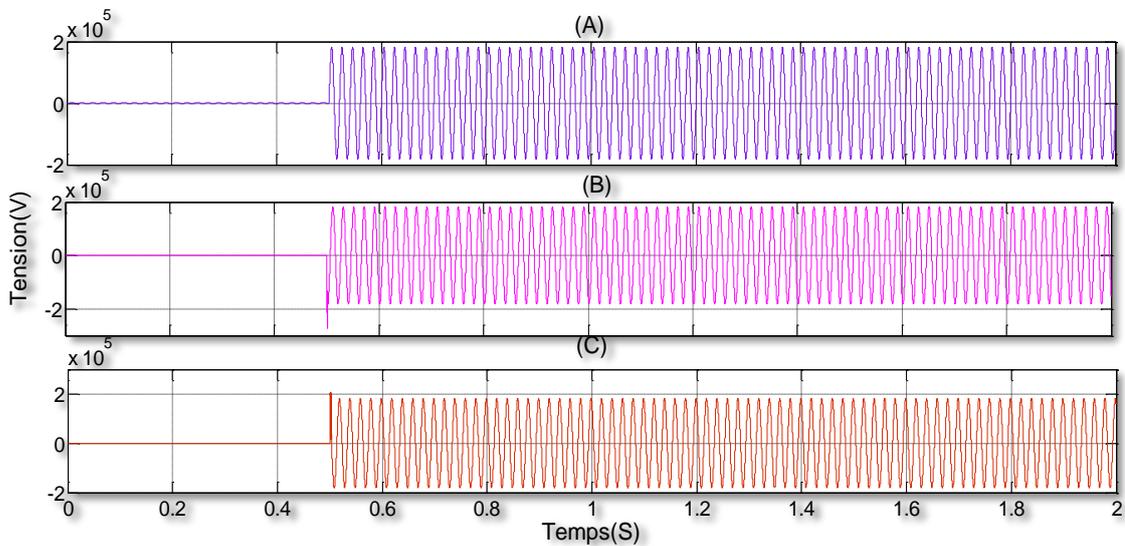
A. Mesure de l'effort électrodynamique sans défaut :

Les figures suivantes démontrent la valeur de l'effort électrodynamique sans défaut :



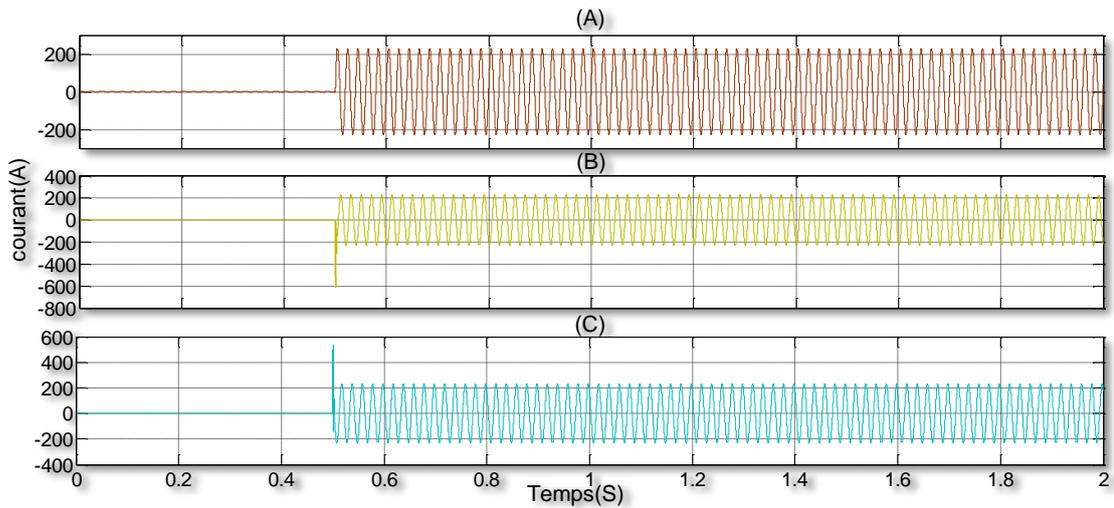
(A) ;(B) ;(C) l'effort électrodynamique mesuré sur les phases **A** ; **B** ; **C**.

Figure IV.9 Mesure de l'effort électrodynamique sans défaut .



(A) ;(B) ;(C) La tension mesuré sur les phases **A** ; **B** ; **C** ;

Figure IV.10 Mesure la tension sans défaut .



(A) ;(B) ;(C) L'intensité mesuré sur les phases A ; B ; C .

Figure IV.11 Mesure L'intensité sans défaut.

B.Mesure de l'effort électrodynamique en court-circuit sans variation de la distance

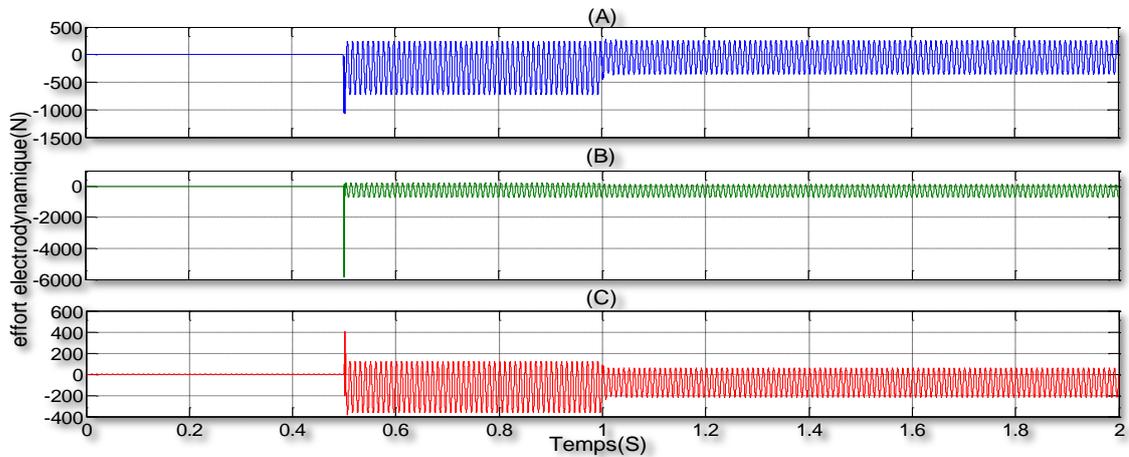
Dans cette simulation on a étudié les différents types de défauts sur les phases et qui se résume dans le tableau suivant :

	Phase A	Phase B	Phase C
Défaut monophasé	Court-circuit à la terre		
		Court-circuit à la terre	
			Court-circuit à la terre
Défaut biphasé	Court-circuit à la terre et sans terre		
		Court-circuit à la terre et sans terre	
	Court-circuit à la terre et sans terre		Court-circuit à la terre et sans terre
Défaut triphasé	Court-circuit à la terre et sans terre		

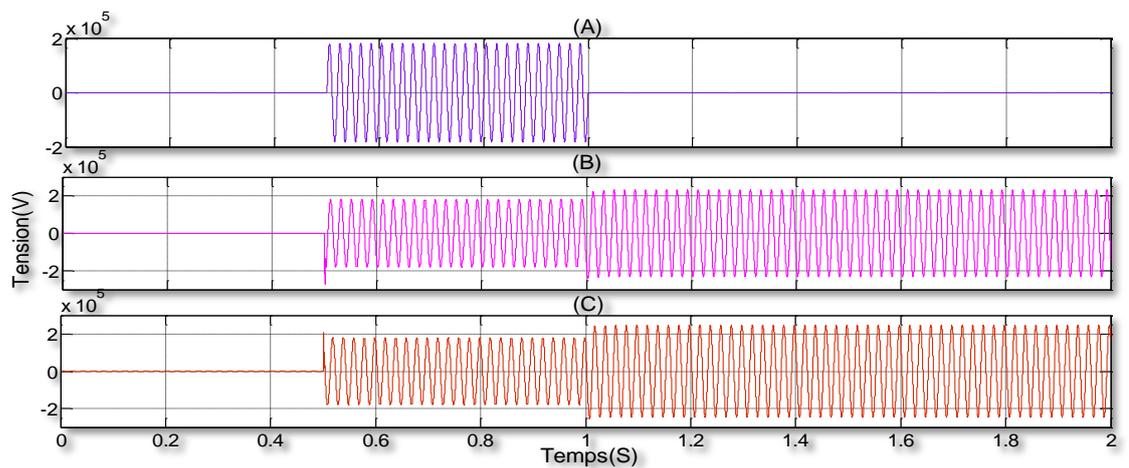
Tableau IV.2 Détails sur l'application de court-circuit.

❖ Défaut monophasé phase A à la terre

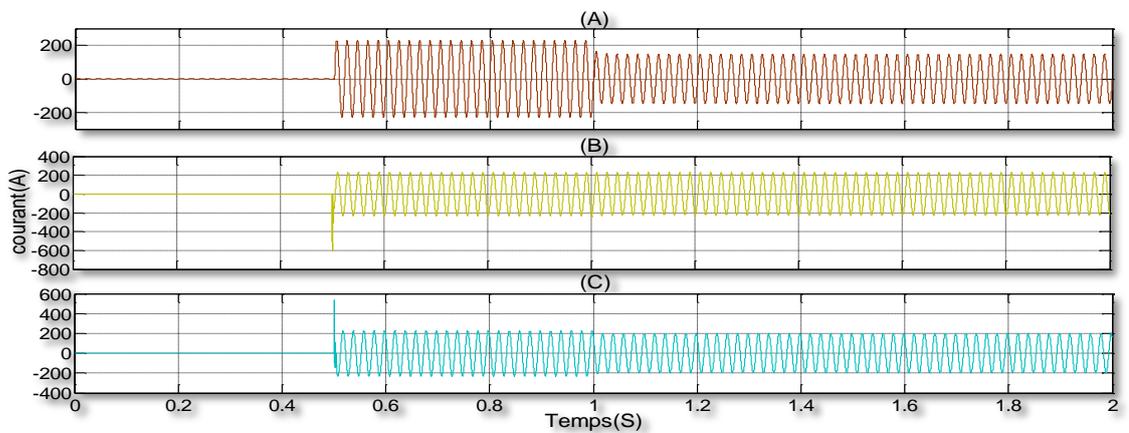
Les figures suivantes démontrent la valeur de l'effort électrodynamique lors d'un défaut phase-terre :



(A) ;(B) ;(C) l'effort électrodynamique mesuré sur les phases A ; B ; C ;



(A) ;(B) ;(C) La tension mesuré sur les phases A ; B ; C ;

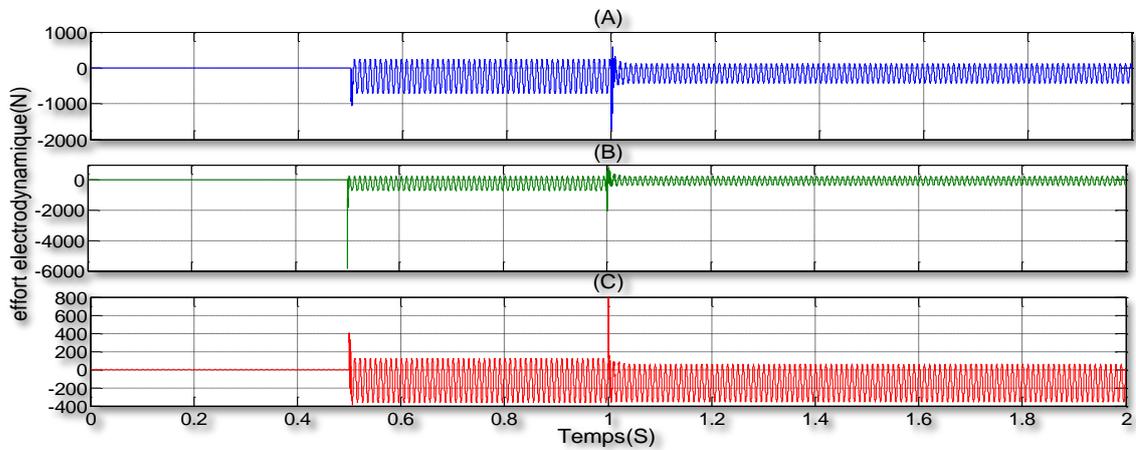


(A) ;(B) ;(C) L'intensité mesuré sur les phases A ; B ; C ;

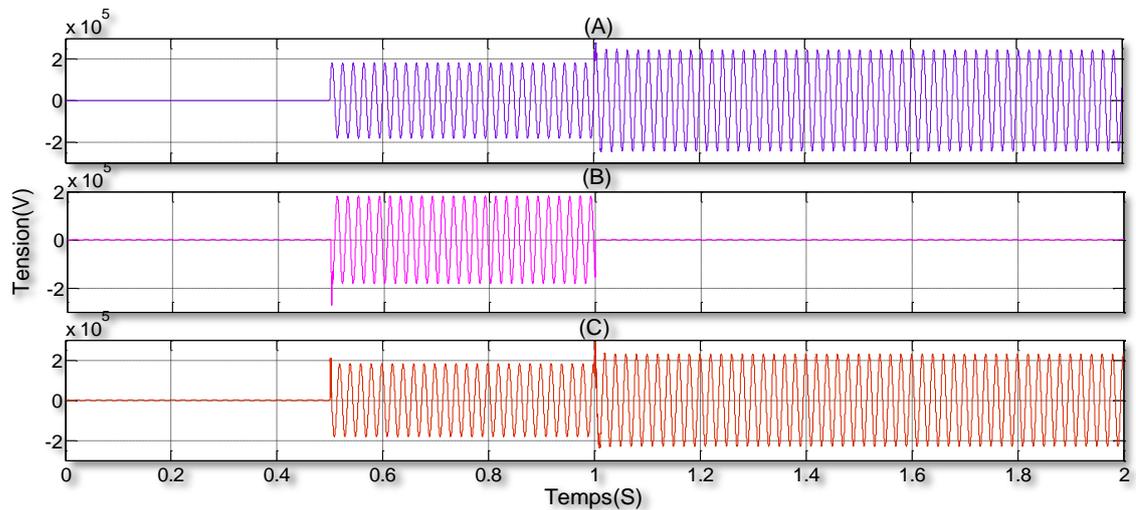
Figure IV.12 Défaut monophasé à la terre phase A.

❖ Défaut monophasé phase B à la terre

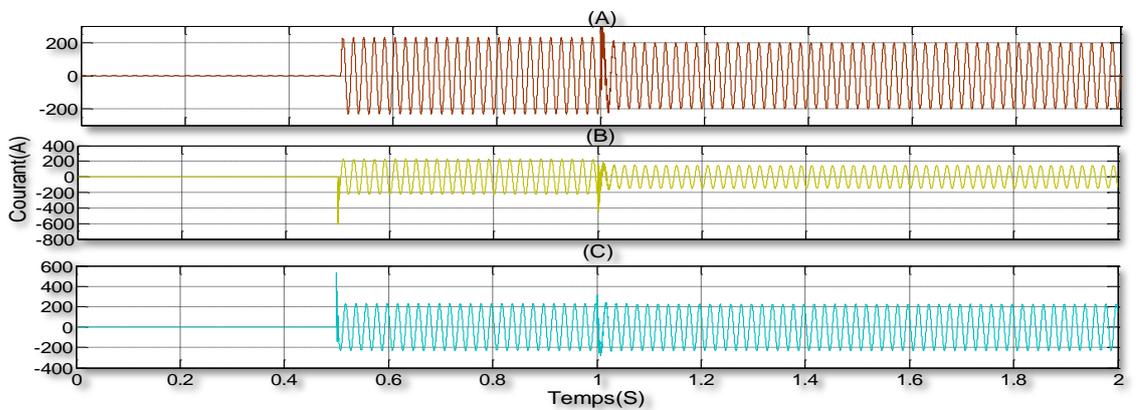
Les figures suivantes démontrent la valeur de l'effort électrodynamique lors d'un défaut phase-terre :



(A) ;(B) ;(C) l'effort électrodynamique mesuré sur les phases A ; B ; C ;



(A) ;(B) ;(C) La tension mesuré sur les phases A ; B ; C ;

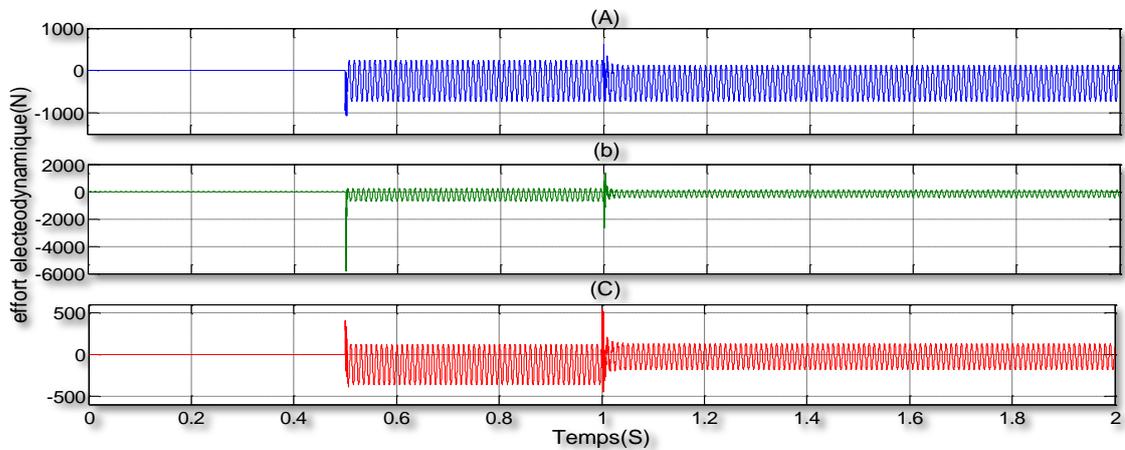


(A) ; (B) ;(C) L'intensité mesuré sur les phases A ; B ; C.

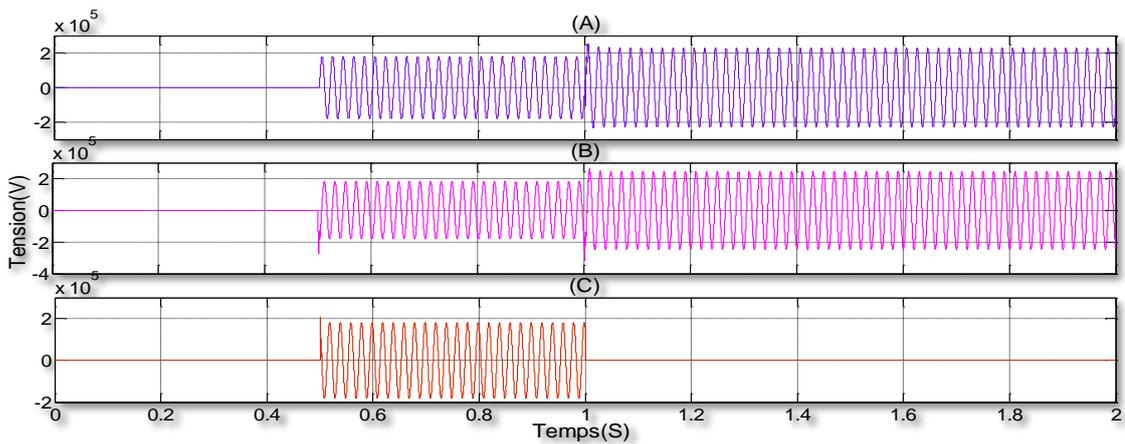
Figure IV.13 Défaut monophasé à la terre phase B .

❖ Défaut monophasé phase C à la terre

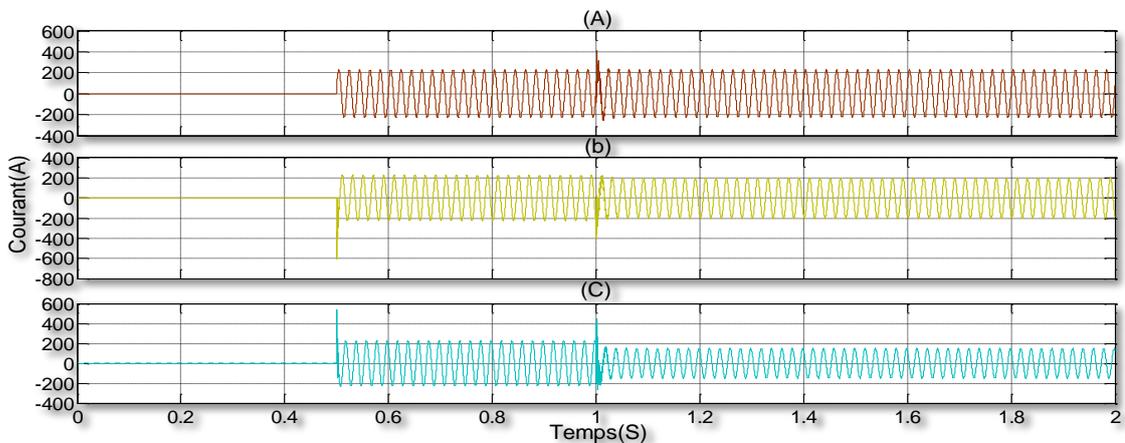
Les figures suivantes démontrent la valeur de l'effort électrodynamique lors d'un défaut phase-terre :



A) ;(B) ;(C) l'effort électrodynamique mesuré sur les phases A ; B ; C ;



(A) ;(B) ;(C) La tension mesuré sur les phases A ; B ; C ;

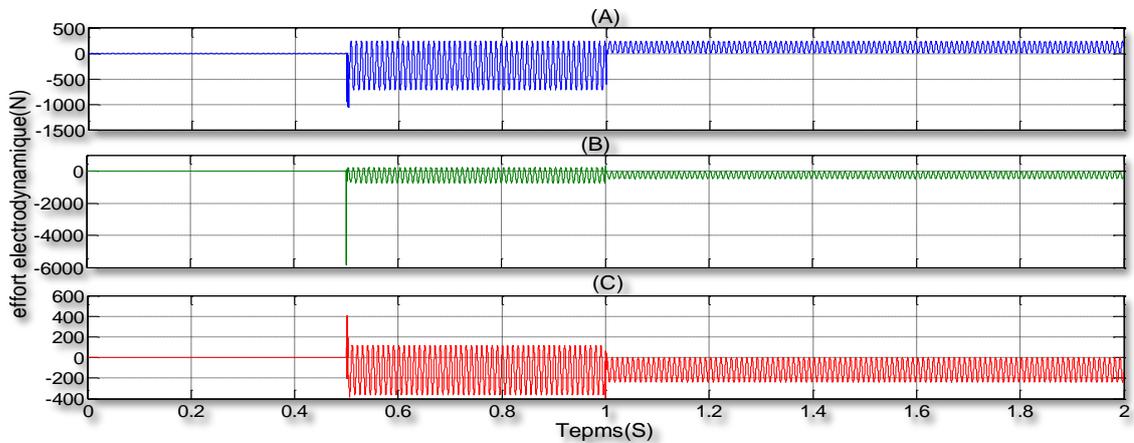


(A) ; (B) ;(C) L'intensité mesuré sur les phases A ; B ; C.

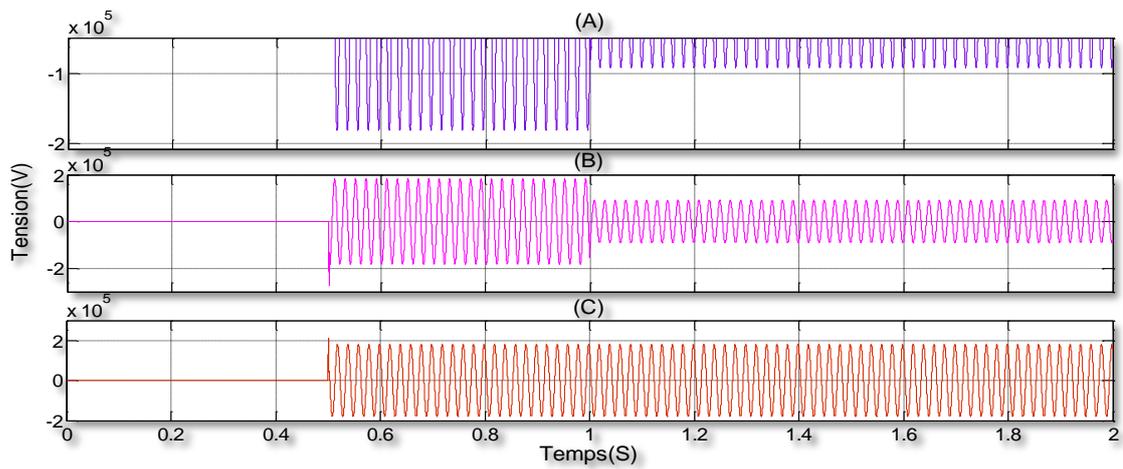
Figure IV.14 Défaut monophasé à la terre phase C .

❖ Défaut biphase phase A, B

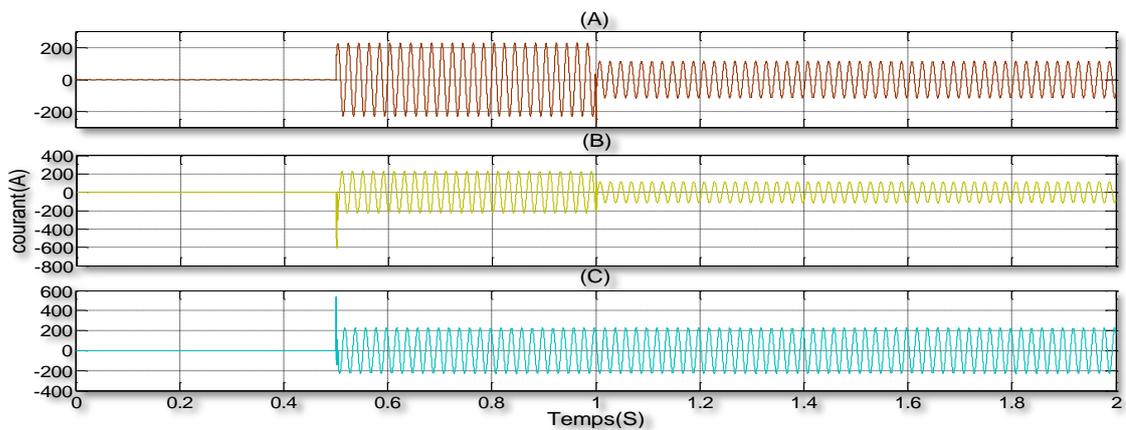
Les figures suivantes démontrent la valeur de l'effort électrodynamique lors d'un défaut biphase phase sans la terre :



(A) ;(B) ;(C) l'effort électrodynamique mesuré sur les phases A ; B ; C.



(A) ;(B) ;(C) la tension mesuré sur les phases A ; B ; C.

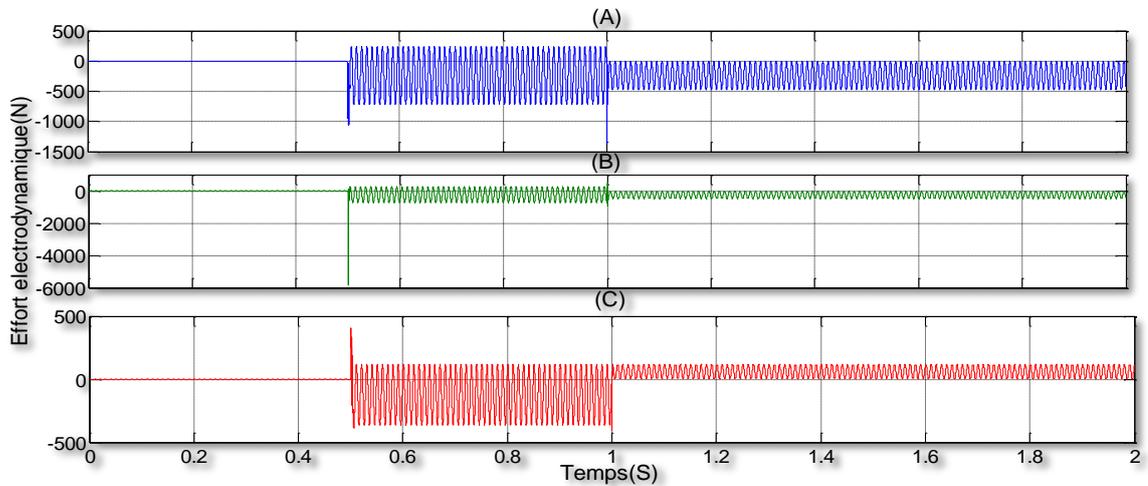


(A) ;(B) ;(C) L'intensité mesuré sur les phases A ; B ; C.

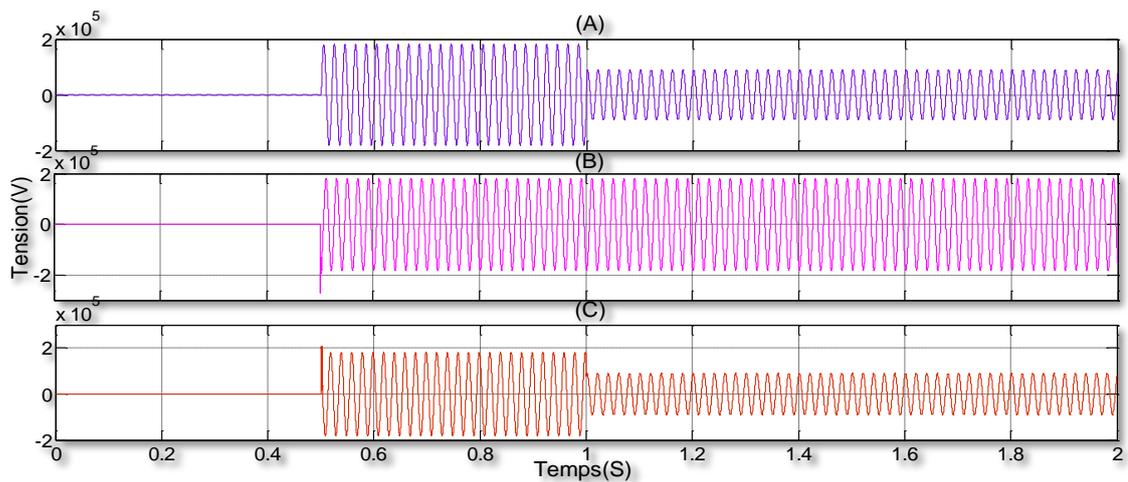
Figure IV.15 Défaut biphase phases A, B.

❖ Défaut biphasé phase A, C

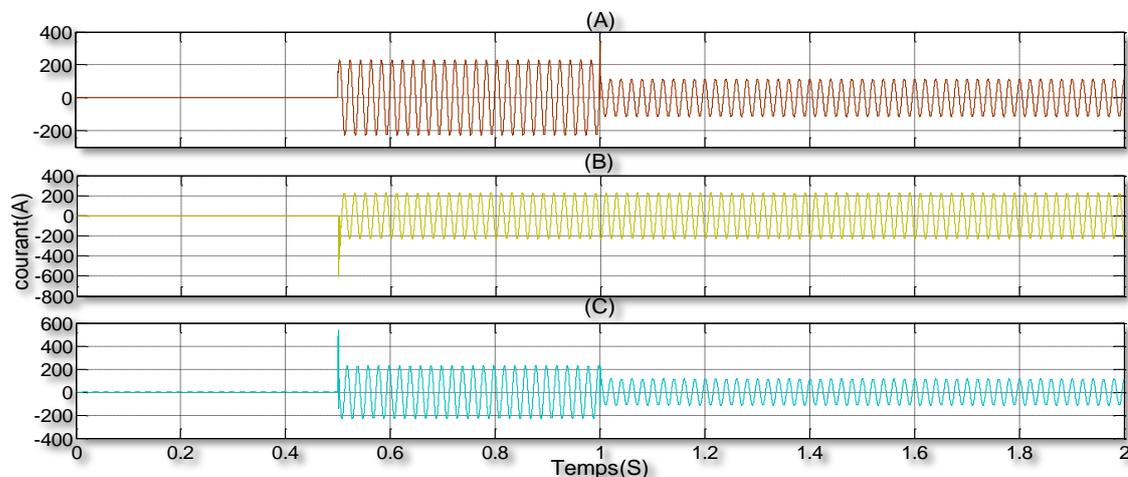
Les figures suivantes démontrent la valeur de l'effort électrodynamique lors d'un défaut biphasé phase sans la terre :



(A) ;(B) ;(C) l'effort électrodynamique mesuré sur les phases A ; B ; C.



(A) ;(B) ;(C) La tension mesuré sur les phases A ; B ; C.

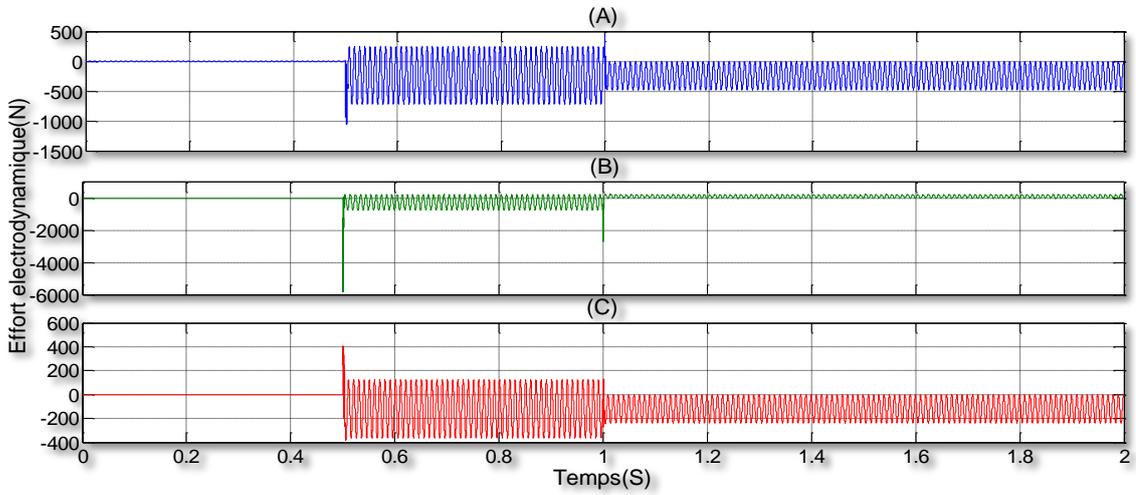


(A) ;(B) ;(C) L'intensité mesuré sur les phases A ; B ; C.

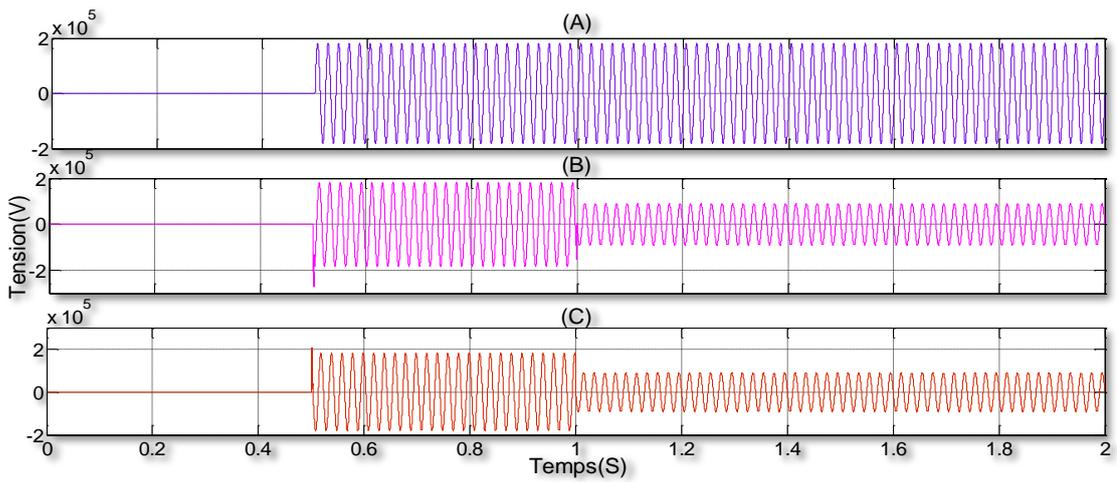
Figure IV.16 Défaut biphasé phases A, C.

❖ Défaut biphasé phase B, C

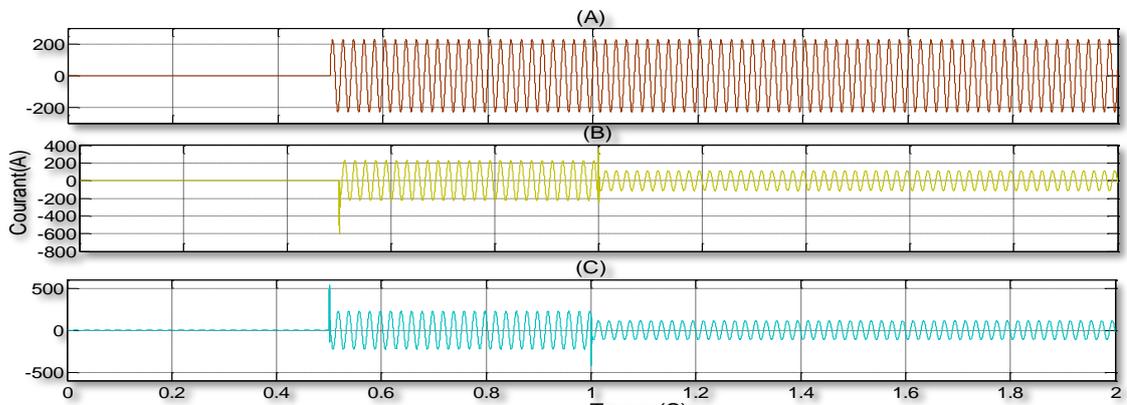
Les figures suivantes démontrent la valeur de l'effort électrodynamique lors d'un défaut biphasé phase sans la terre :



(A) ;(B) ;(C) l'effort électrodynamique mesuré sur les phases A ; B ; C ;



(A) ;(B) ;(C) La tension mesuré sur les phases A ; B ; C ;

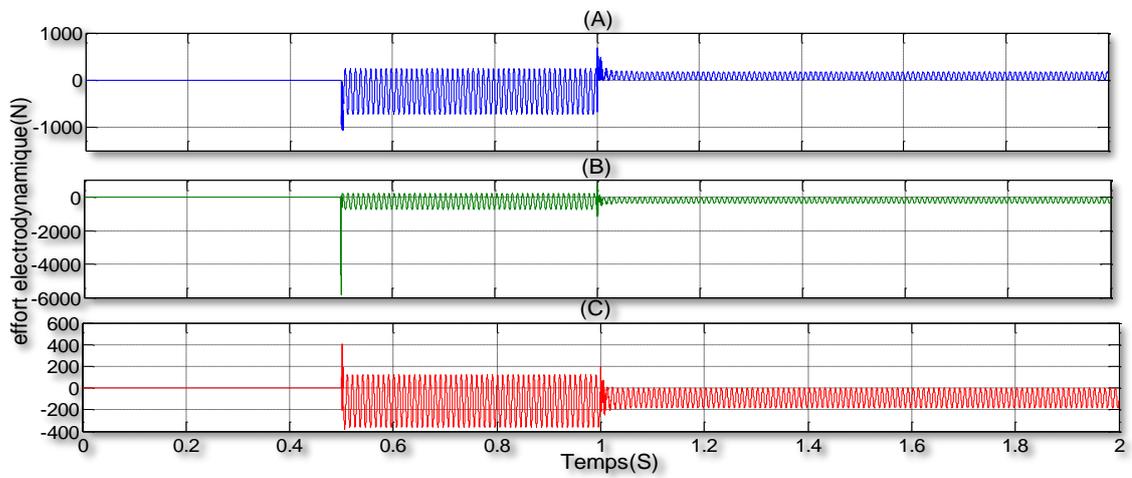


(A) ; (B) ;(C) L'intensité mesuré sur les phases A ; B ; C.

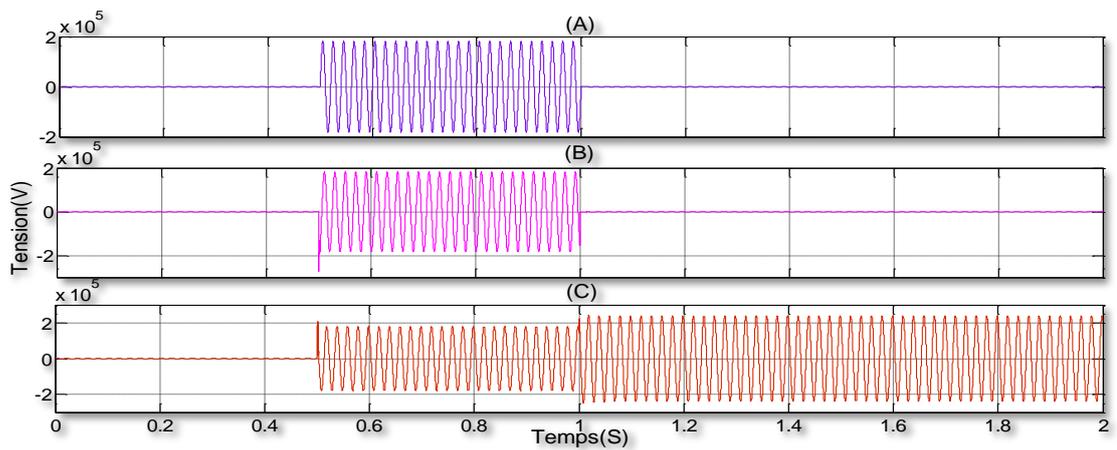
Figure IV.17 Défaut biphasé phases B, C.

❖ Défaut biphasé phase A, B à la terre

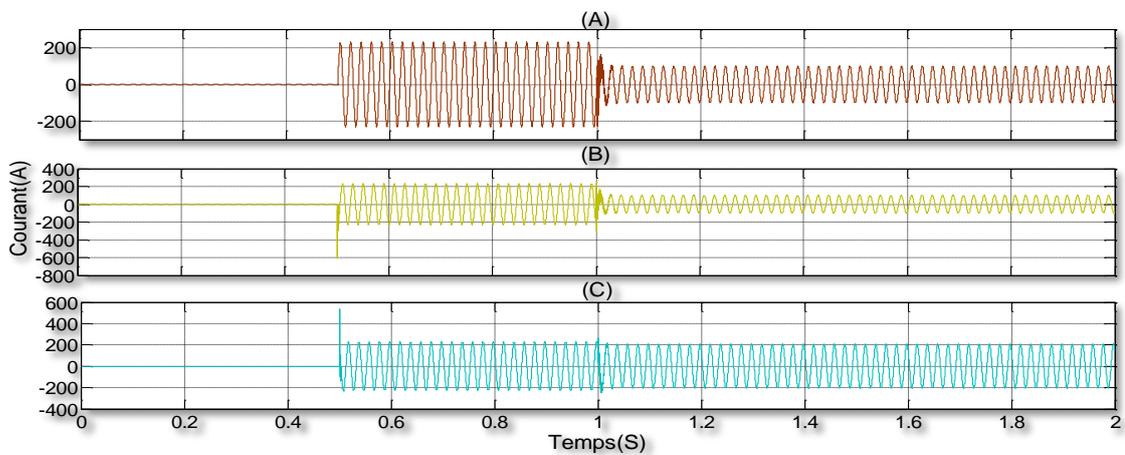
Les figures suivantes démontrent la valeur de l'effort électrodynamique lors d'un défaut biphasé phase à la terre :



(A) ;(B) ;(C) l'effort électrodynamique mesuré sur les phases A ; B ; C.



(A) ;(B) ;(C) La tension mesurée sur les phases A ; B ; C.

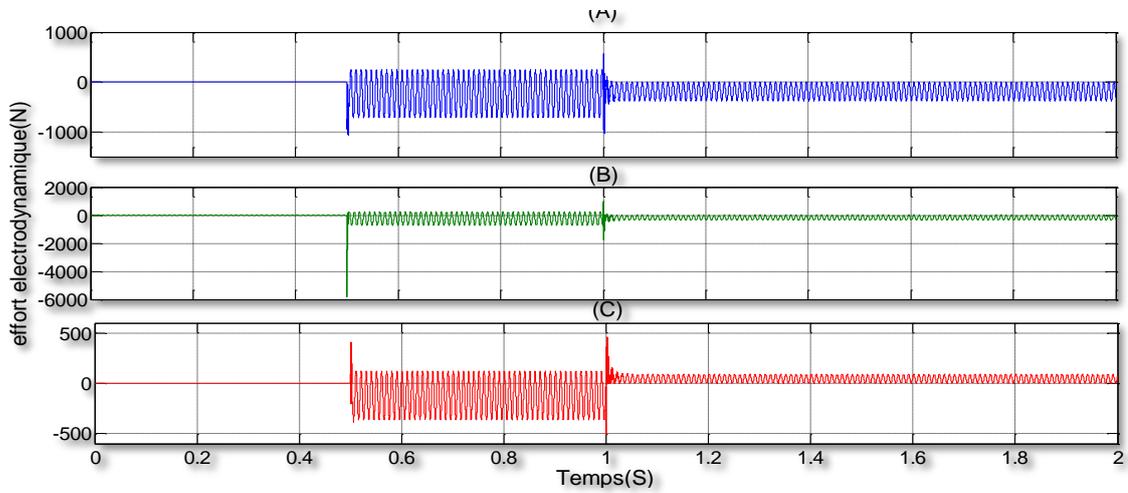


(A) ;(B) ;(C) L'intensité mesurée sur les phases A ; B ; C.

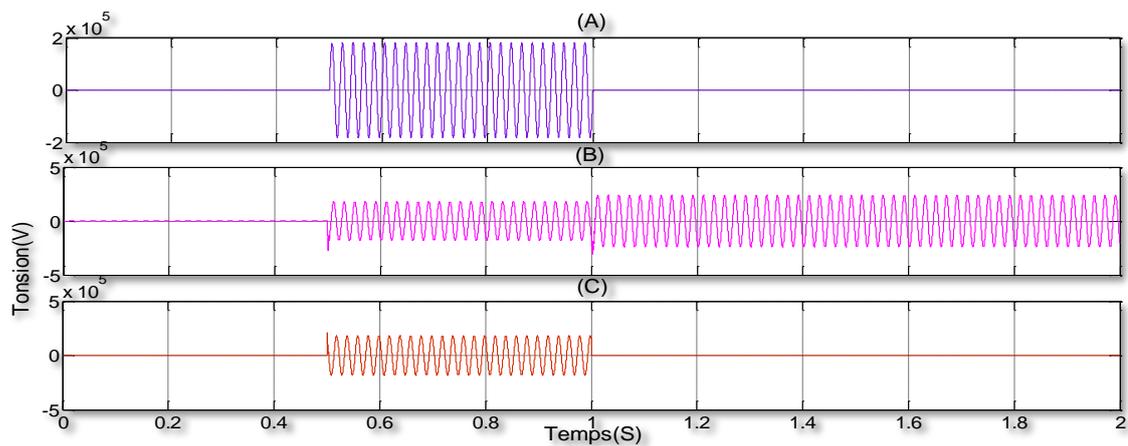
Figure IV.18 Défaut biphasé phases A, B à la terre.

❖ Défaut biphasé phase A, C à la terre

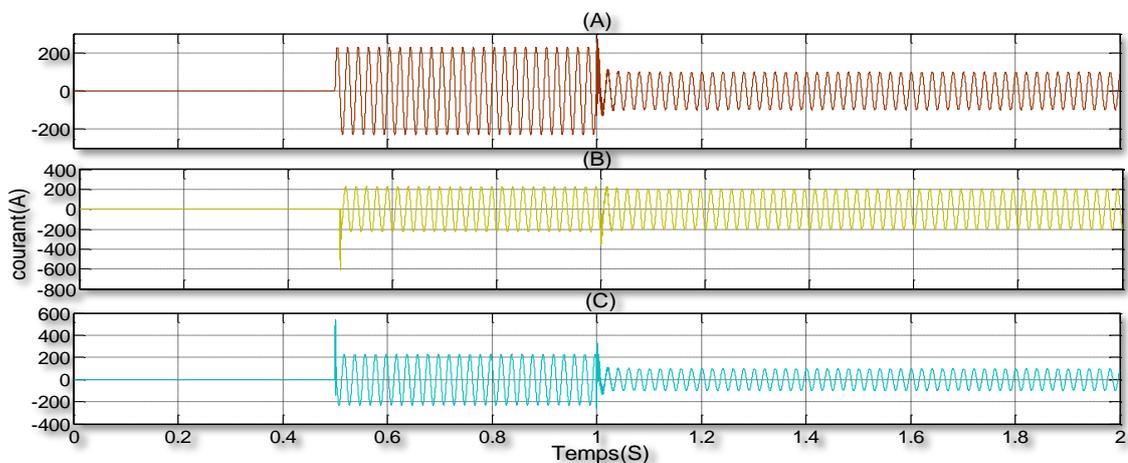
Les figures suivantes démontrent la valeur de l'effort électrodynamique lors d'un défaut biphasé phase à la terre :



(A) ;(B) ;(C) l'effort électrodynamique mesuré sur les phases A ; B ; C ;



(A) ;(B) ;(C) La tension mesuré sur les phases A ; B ; C ;

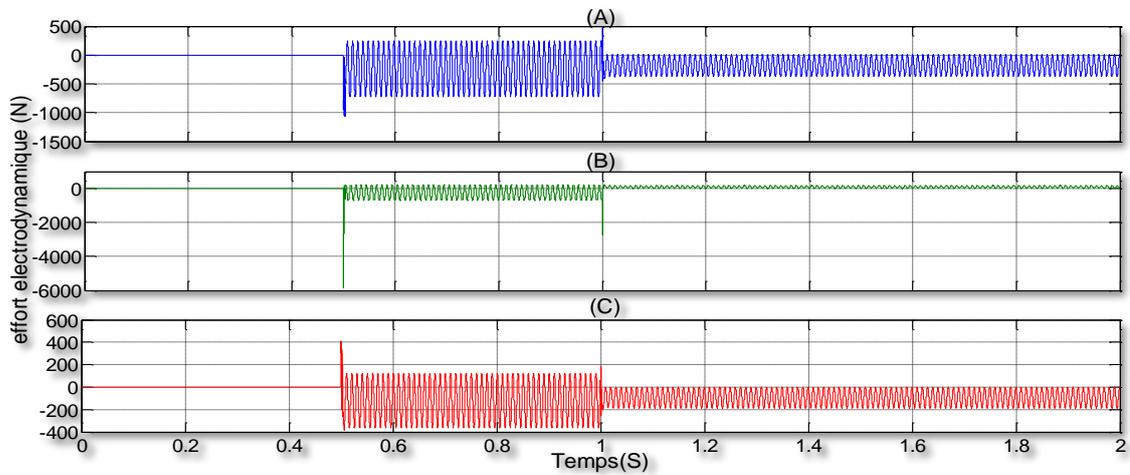


(A) ;(B) ;(C) L'intensité La tension mesuré sur les phases A ; B ; C ;

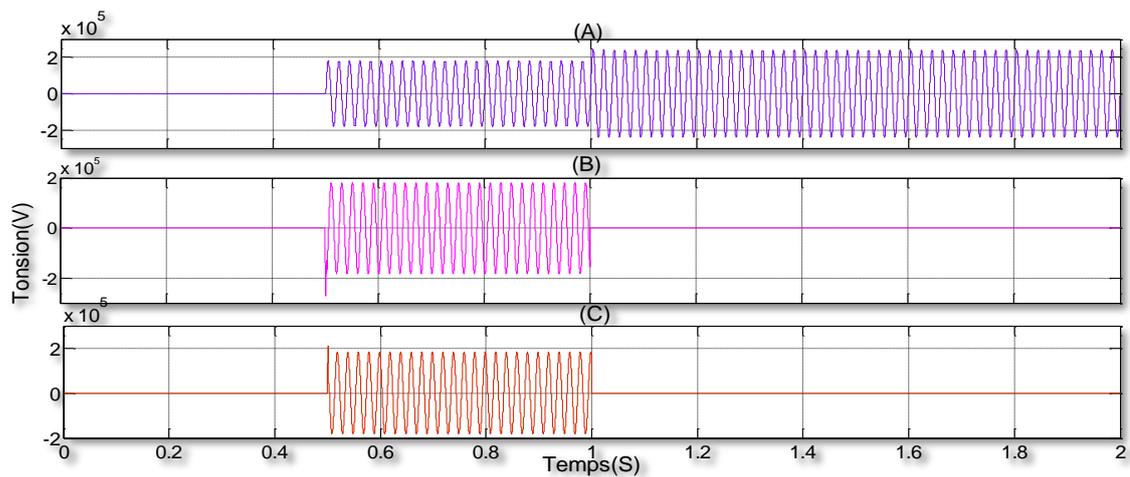
Figure IV.19 Défaut biphasé phases A, C à la terre.

❖ Défaut biphasé phase B, C à la terre

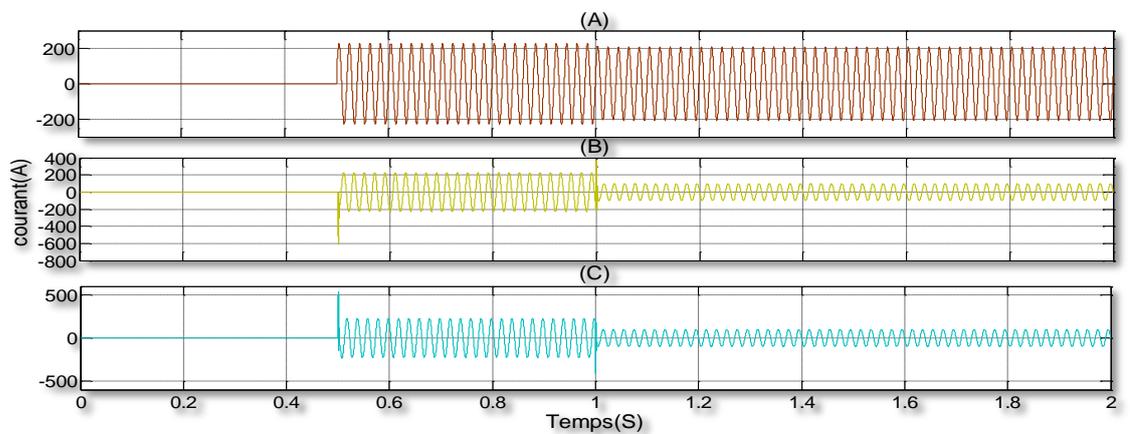
Les figures suivantes démontrent la valeur de l'effort électrodynamique lors d'un défaut biphasé phase à la terre :



(A) ;(B) ;(C) l'effort électrodynamique mesuré sur les phases A ; B ; C ;



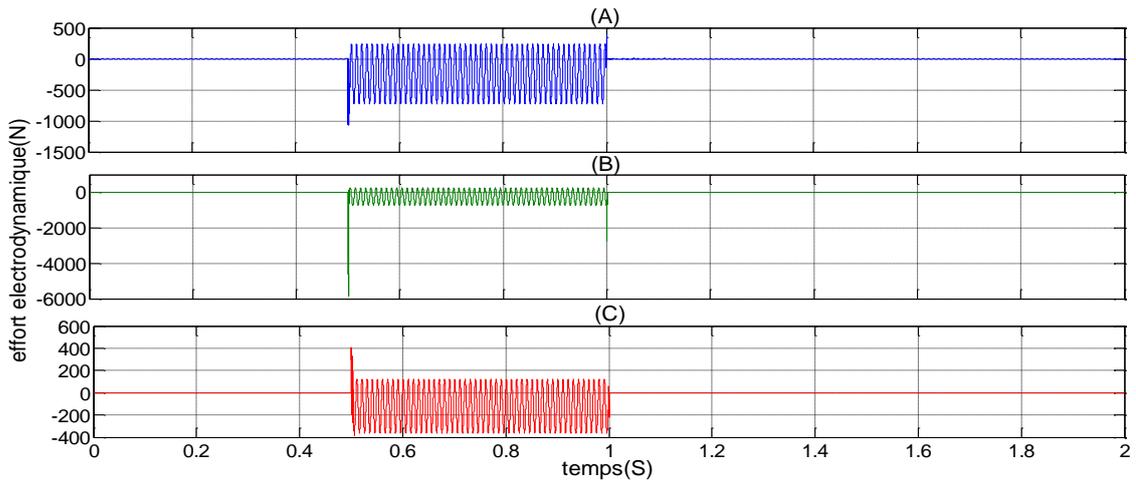
(A) ;(B) ;(C) La tension mesuré sur les phases A ; B ; C ;



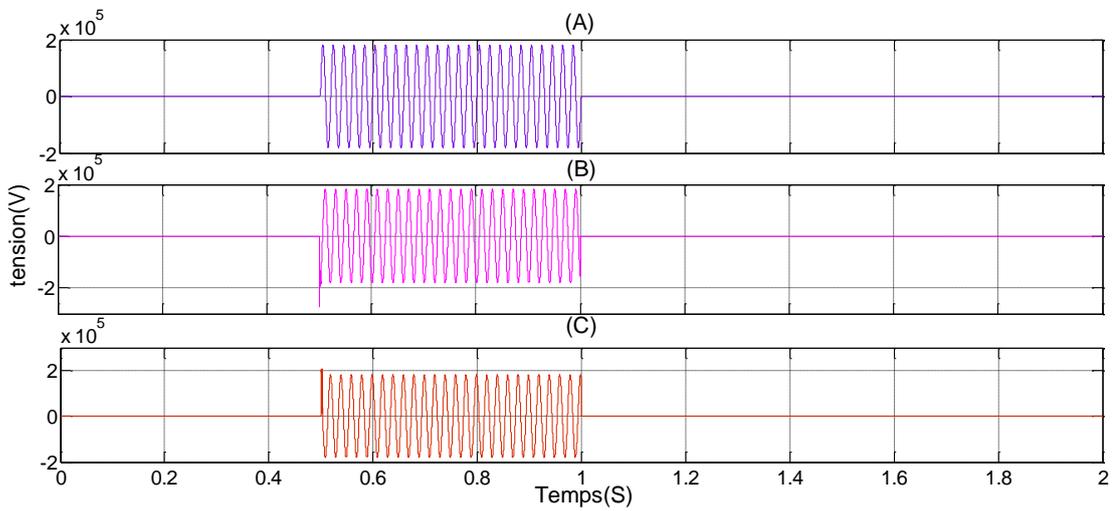
(A) ; (B) ;(C) L'intensité mesuré sur les phases A ; B ; C.

Figure IV.20 Défaut biphasé phases B, C à la terre.

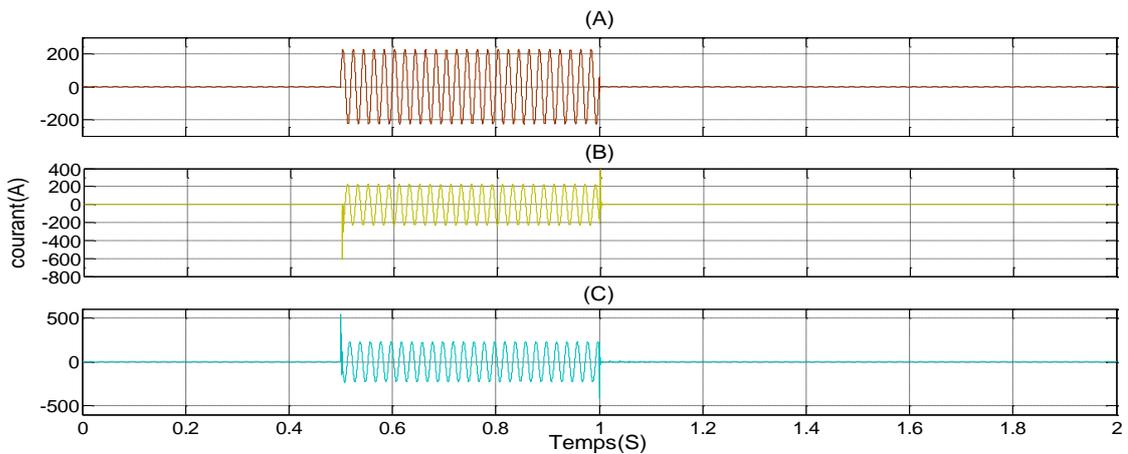
❖ Défaut triphasé A, B, C sans la terre



(A) ;(B) ;(C) l'effort électrodynamique mesuré sur les phases A ; B ; C.



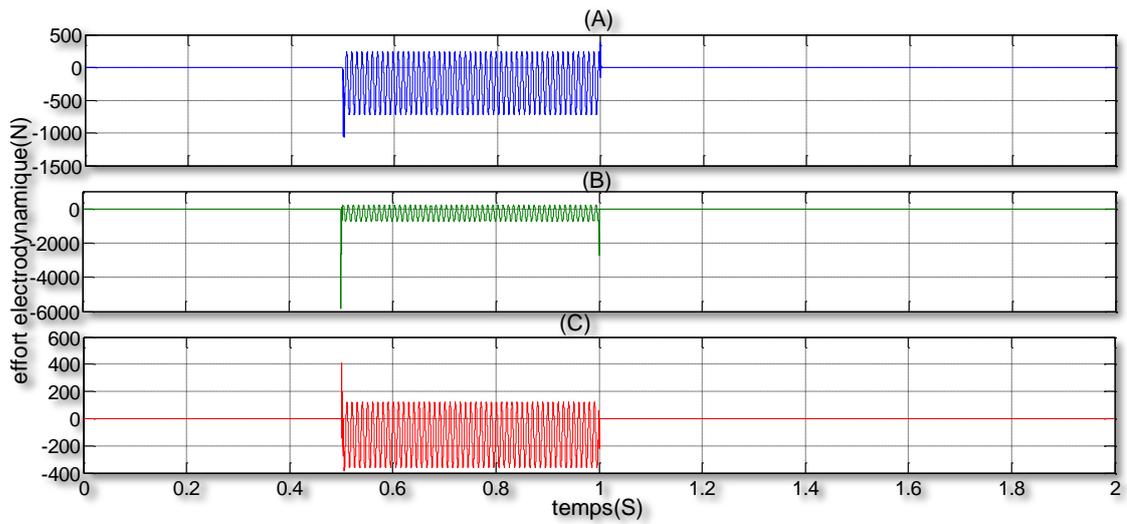
(A) ;(B) ;(C) La tension mesuré sur les phases A ; B ; C.



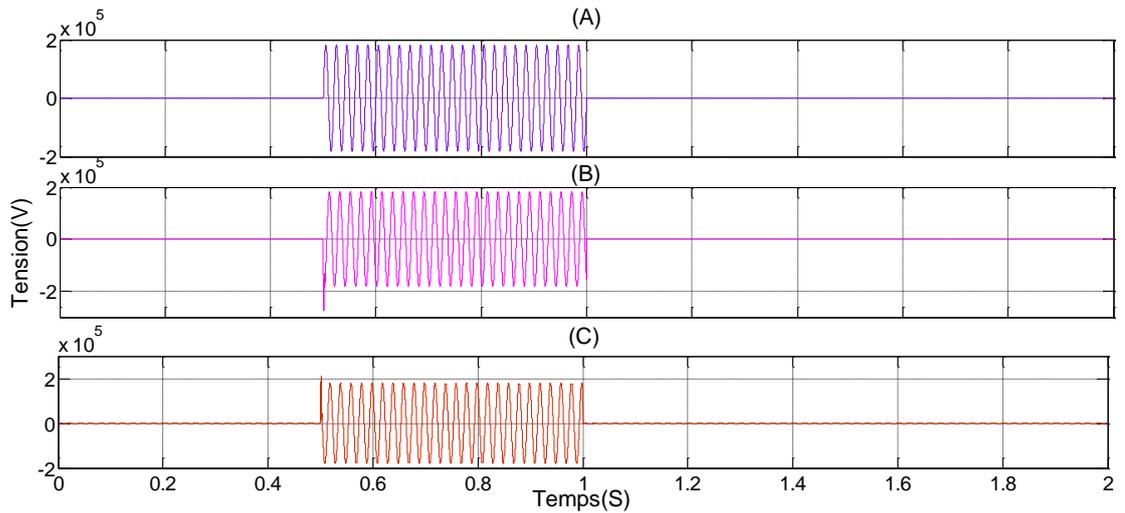
(A) ;(B) ;(C) L'intensité mesuré sur les phases A ; B ; C.

Figure IV.21 Défaut triphasé A, B, C sans la terre.

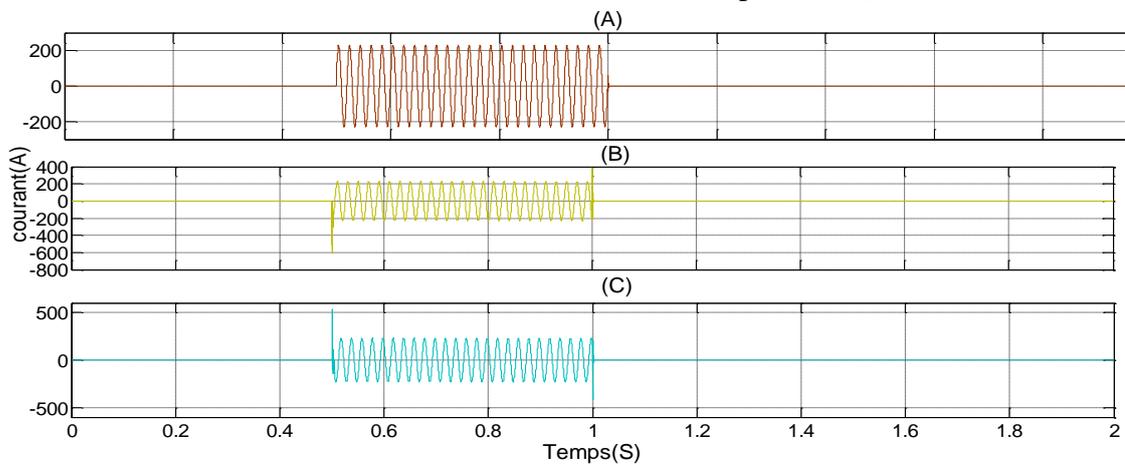
❖ Défaut triphasé A, B, C à la terre



(A) ;(B) ;(C) l'effort électrodynamique mesuré sur les phases A ; B ; C.



(A) ;(B) ;(C) La tension mesuré sur les phases A ; B ; C.



(A) ; (B) ;(C) L'intensité La tension mesuré sur les phases A ; B ; C.

Figure IV.22 Défaut triphasé A, B, C à la terre.

Interprétation des résultats du défaut court-circuit

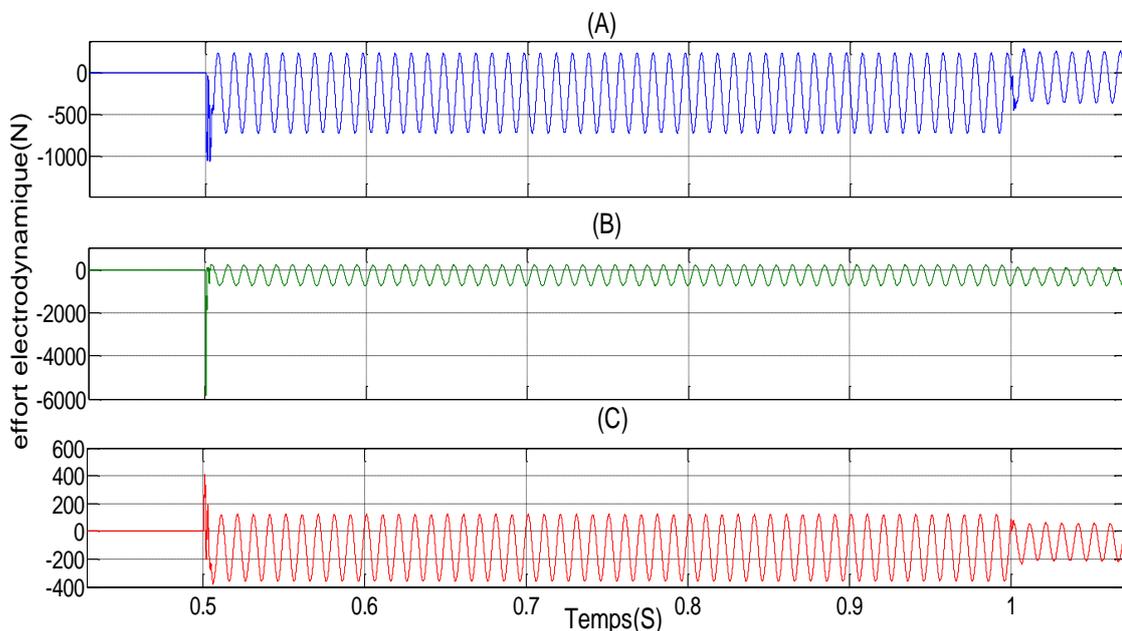
Le défaut court-circuit est parmi les défauts les plus inquiétants dans les réseaux électriques de toutes gammes, vu son impact sur le matériels électriques, dégâts et danger. Ce dernier est considéré comme un générateur d'énergie d'effort électrodynamique et une raison de son gonflement. Nous avons prouvé la validité de cette affirmation à travers les cas présentés sur les figures ci-haut dans ce qui suit :

Premier cas : Défaut monophasé phase à la terre

Les résultats obtenus de la simulation illustrée sur les figures (**voir les figure IV.12.13.14**) nous remarquons après renfermement du disjoncteur ($t=0.5s$) la valeur d'effort électrodynamique passe à -1000 N elle augmente. Ensuite, elle reste constante jusqu'au moment de défaut ($1s$) ici la valeur d'effort augmente à -500 N. Compte tenu de la valeur du courant et la tension dans la phase de défaut : grande valeur de courant et la tension nulle.

Si le défaut est en phase B ; alors la valeur de l'effort électrodynamique dans les phases A et C est égale mais en différent signe (réseau équilibré)

Notons que dans tous les cas restants nous avons une augmentation de la force électrodynamique est produite



(A) ;(B) ;(C) l'effort électrodynamique mesuré sur les phases **A ; B ; C**.

Figure IV.23 Défaut monophasé à la terre phase A (avec zoom).

Interprétation des résultats du défaut triphasé A, B, C sans la terre

Les résultats obtenus de la simulation illustrée sur les figures (**Figure IV.24**) nous remarquons après application du défaut triphasé A, B, C sans la terre , l'effort électrodynamique est égale à zéro, ainsi que la valeur de chacune du courant et de la tension, puisque le réseau est équilibré, les phases sont déphasés, ainsi que les courants, cela nous a mené l'élimination de l'effort electrodynamique dans ce cas.

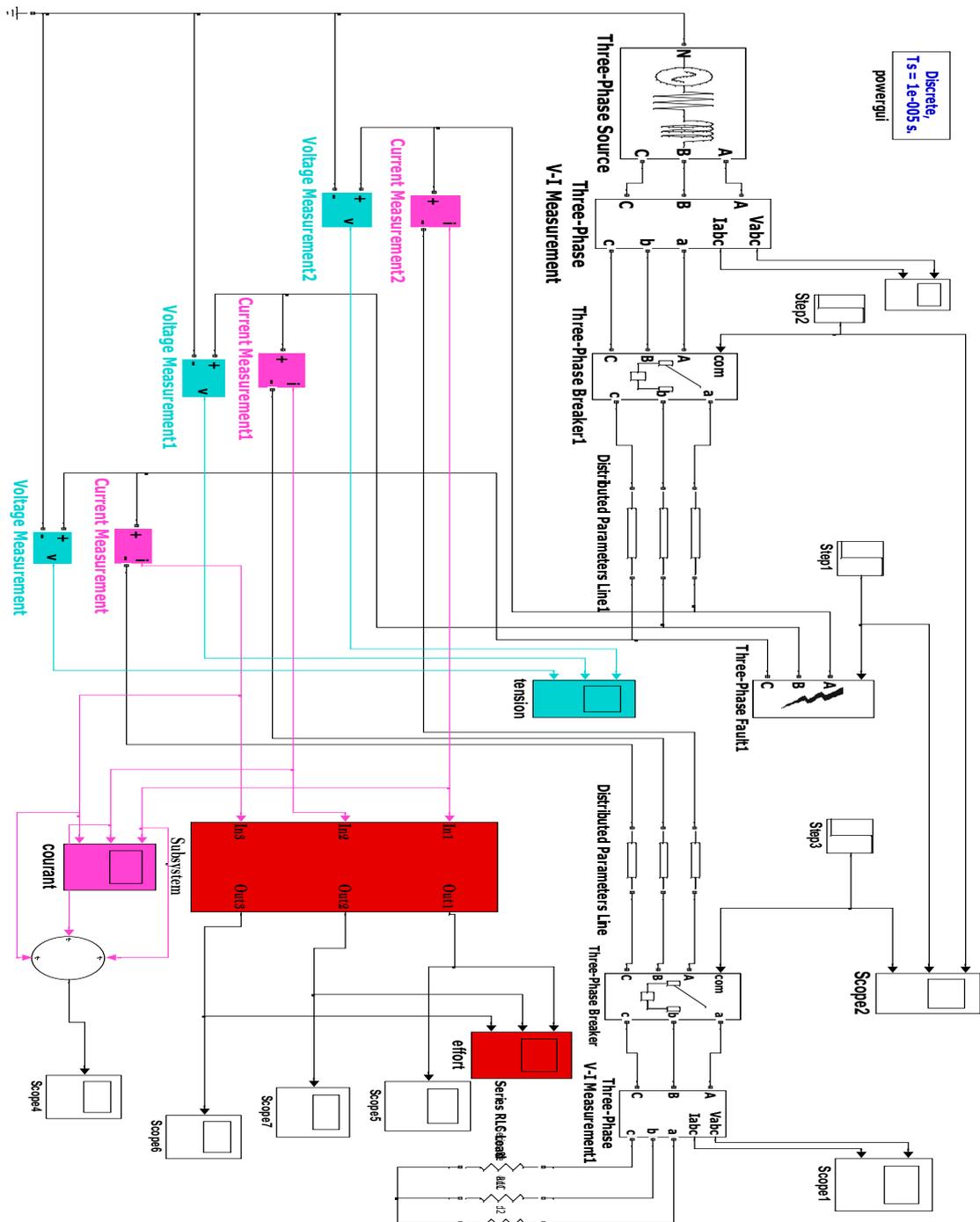


Figure IV.24 Schéma bloc d'un système(2)

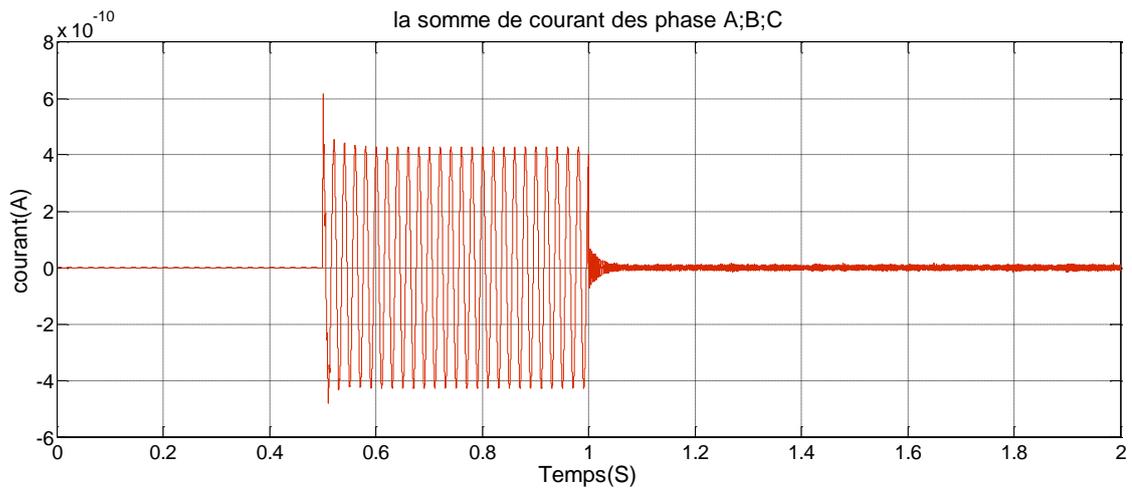


Figure IV.25 la somme de courant du défaut triphasé A, B, C sans la terre.

Sur la Figure IV.28 nous remarquons qu'après la somme des trois phases en courant la valeur est égale à 4×10^{-10} A c-à-d nulle.

IV.8.2 Simulation de variation de la distance entre les Tébessa et clients imaginaires

Défaut monophasé phase A à la terre							
Distance longitudinale entre ABE et tébessa (km)	Distance entre tbessa et clients imaginaires (km)	Un Effort moyen 1 dans les phase (A,B,C)(N)			Un Effort moyen 2(N) dans les phase (A,B,C)(N)		
		69.7	150	-789.6	376.1	-526.8	6.42×10^{-31}
69.7	300	-166	67.31	-124.6	3.663×10^{-28}	3.663×10^{-28}	1.832×10^{-28}
69.7	400	-67.07	23.57	-58.06	2.098×10^{-28}	2.098×10^{-28}	1.049×10^{-28}

Tableau IV.3 Détail de l'application variation de distance.

Explication du tableau

Ce qu'on a fait est d'étudier l'influence de la distance inter tébessa et clients imaginaires sur l'augmentation ou la diminution de l'impact de l'effort électrodynamique, nous avons changé la distance entre tbessa et clients imaginaires.ou nous obtenons les valeurs des efforts electrodynamique à chaque fois que nous modifions la distance comme indiqué dans le tableau.

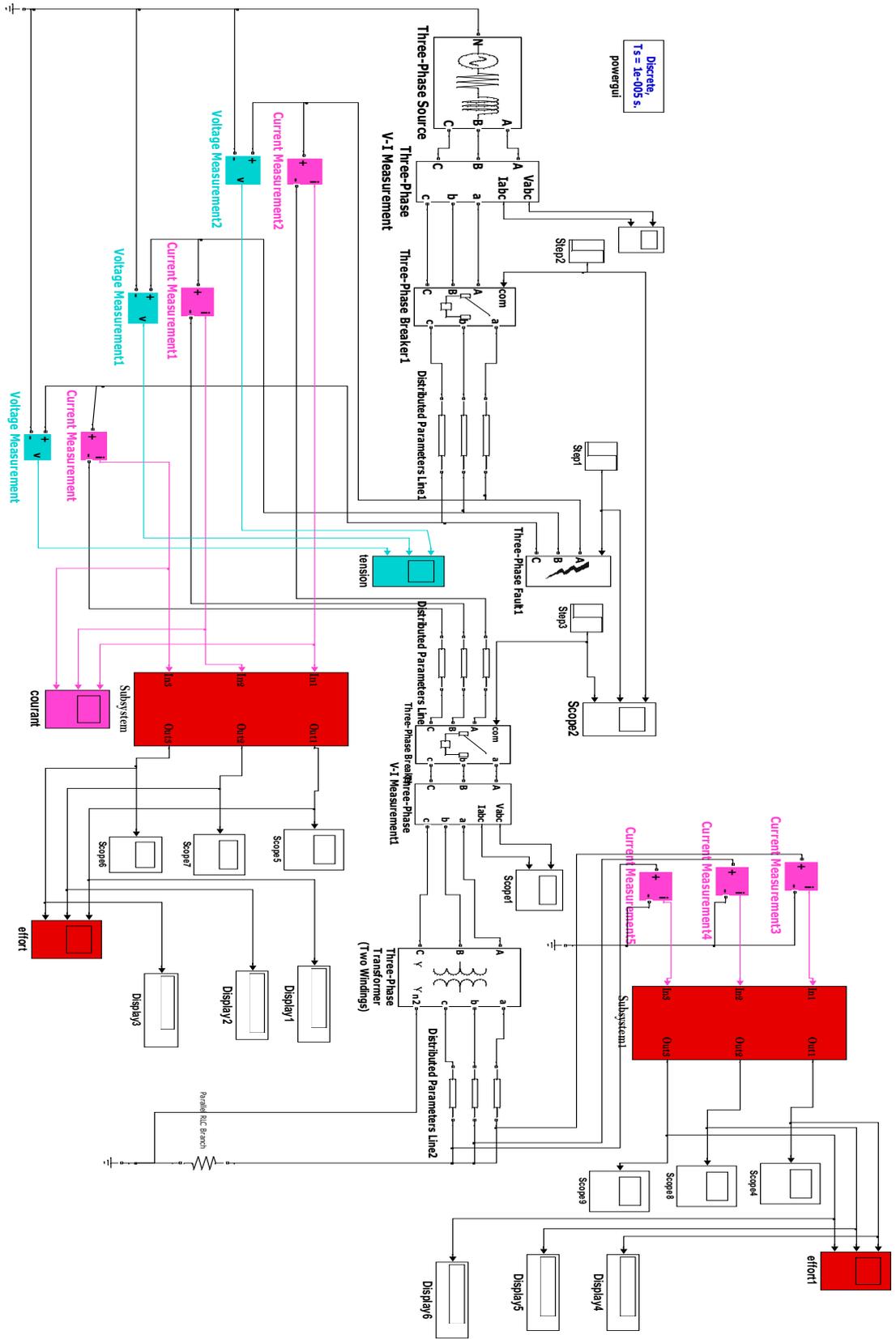
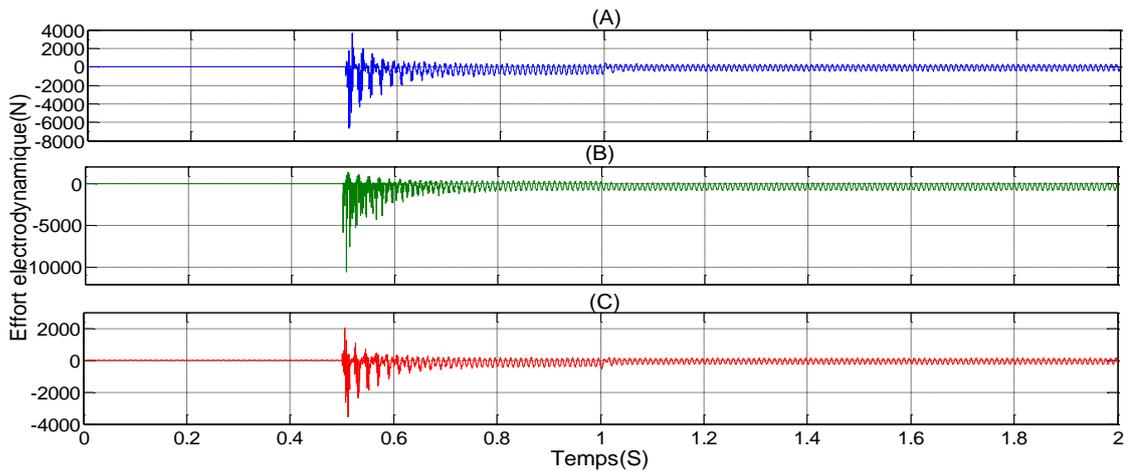
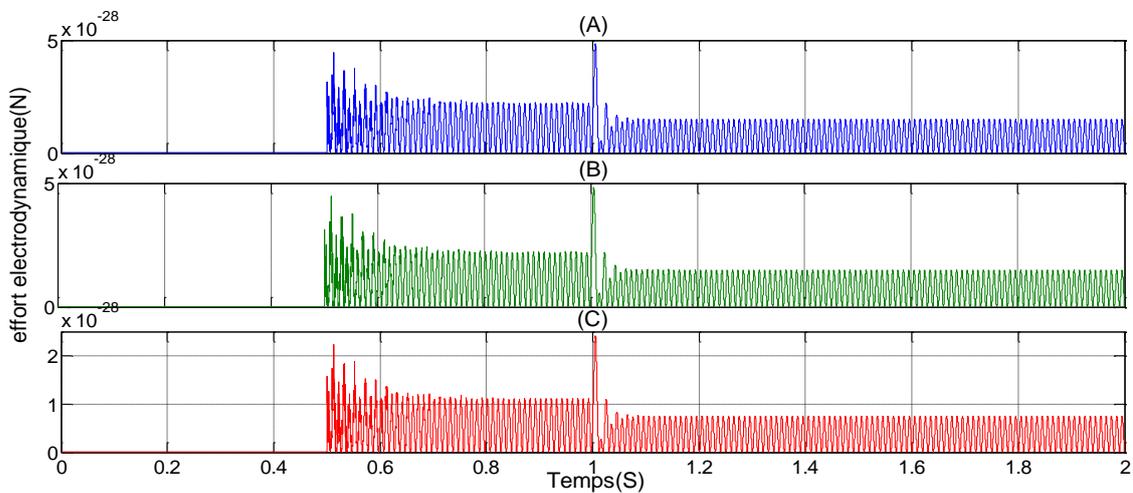


Figure IV.26 Schema bloc d'un système(3)



(A);(B) ;(C) l'effort électrodynamique (1) mesuré sur les phases A ; B ; C



(A) ;(B) ;(C) l'effort électrodynamique (2) mesuré sur les phases A ; B ; C.

Figure IV.27 l'effort électrodynamique (1) ;(2) mesuré sur les phases A ;B ;C .

Interprétation

On constate qu'à travers cette étude la valeur de la force électrodynamique n'affecte pas seulement les équipements du réseau, l'effet des efforts electrodynamique se propage dans le reseau comme dans l'exemple il est arrivé jusqu'au client. la valeur est faible avec l'augmentation de la longueur de la distance et vice versa.

En résumé, la valeur de l'effort electrodynamique est affecté proportionnelement par la variation de la distance longitudinale représenté par la l'approche ou l'éloignement du défaut sula ligne, ainsi que la distance transversale représenté par l'espacement entre les phases.

IV.9 Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons étudié les types des méthode de calcul de l'efforts electrodynamique sur les lignes THT ou nous avons choisi une ligne d'une longueur de 69.7km et de tension 220kV pour étudier les phénomènes physiques qui l'afectent tels que les court –circuits et le vent après application de la méthode énergétique nous avons pu calculer la valeur des efforts electrodynamique très satisfaisants, .après nous avons étudié l'effet de la distance entre les clients et l'emplacement de défaut sur la valeur de la force électrodynamique .



Conclusion générale



Conclusion générale

Lors du transport de l'énergie électrique, nous utilisons des lignes électriques à très haute tension réparties sur de longues distances, il est donc nécessaire de les protéger de toutes sortes de défauts, en particulier les court-circuités, afin de ne pas perdre la continuité du service, les défauts affectent non seulement les lignes mais aussi les équipements de la station, le court-circuit est la principale cause des efforts électrodynamiques.

L'objectif principal de ce travail est d'étudier de calculer et prouver les efforts électrodynamique, il existe plusieurs méthodes pour calculer les efforts électrodynamiques notamment Laplace, le champ magnétique et les forces Maxwelliennes.

Tout d'abord ; la méthode de la place a été étudiée par notre collègue AMMARI ASSIL en 2019, et grâce à son étude elle a obtenu des résultats acceptables qui ont permis de calculer les efforts électrodynamique et comment les réduire.

Dans ce travail et pour compléter son travail on a étudié la seconde méthode, qui est la variation de l'énergie du champ magnétique dans le but de comparer les résultats des deux méthodes mais faute de temps nous n'avons pas pu faire cette comparaison.

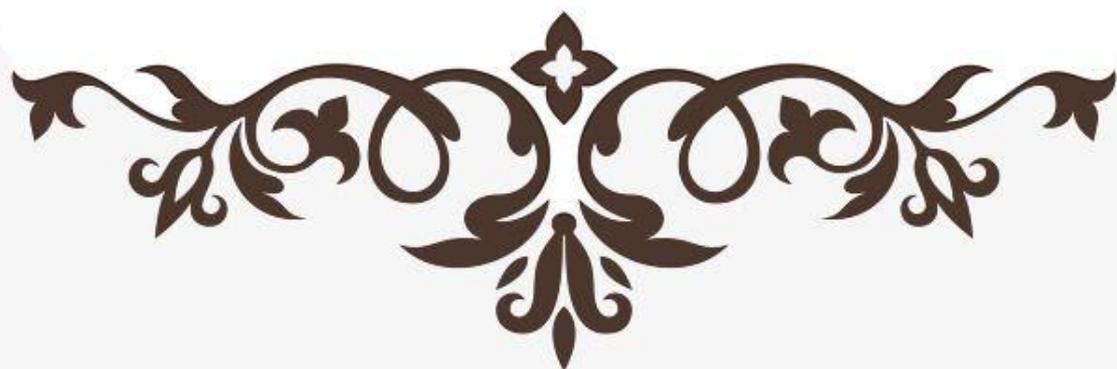
Au cours des chapitres précédents, on a développé un modèle mathématique de la méthode du champ magnétique puis on la programmé sous MATLAB qui permet d'étudier le comportement des câbles de la ligne de transport d'électricité 220kV d'une longueur de 69.7 Km lors d'une exposition au vent faible ou forts.

A travers la simulation, la méthode des champs magnétique a donné un résultat très satisfaisant qui on permet le calcul des forces électrodynamiques et nous a permis d'estimer la valeur de la tension, pendant la simulation, aussi nous avons calculé l'effort électrodynamique par rapport un client HT ou nous avons varié la distance de ce dernier par rapport au défaut, ce qui nous a mené à conclure que l'effort diminue à chaque fois qu'on s'éloigne du défaut.

Finalement nous espérons que ce travail sera terminé par la modélisation des autres méthodes et faire la comparaison pour vérifier la fiabilité de chacune.



Bibliographie



Bibliographie

- [1] F. AMRANI -R, Mémoire fin d'étude en Electrotechnique, le thème « ETUDE DES PROTECTIONS DES DEPARTS MOYENNE TENSION APPLICATION POSTE 60 / 30 kV DE TIZI MEDEN» UNIVERSITE MOULOUD MAMMERI-TIZI OUZOU Promotion 2009.
- [2] AMMARI KHADIDJA ASSIL, Mémoire fin d'étude en Génie électrique le thème : «Minimisation des efforts électrodynamiques dans les réseaux électriques H.T» Université Larbi Tébessa – Tébessa Promotion 2018-2019.
- [3] BELLAREDJ Amina et GAOUAR Youcef, diplôme de MASTER En Electrotechnique, le thème : « Conception et simulation d'une ligne aérienne de transport électrique 220kv » Université Aboubakr Belkaïd– Tlemcen le 5/06/2016.
- [4] SAKOUNI KHAMISE - OKBAOUI TAYEB, diplôme master en électrotechnique le thème: « localisation des défauts dans les réseaux d'énergie électrique a base de relais de distance» Université Ahmed Draïa- Adrar Promotion 2017/2018.
- [5] HADDAD LYAZID-HAMI KHODIR, Master II en Génie électrique, le thème «Calcul des paramètres et caractéristiques des lignes électriques triphasées» Université Abderrahmane mira – BEJAÏA, Promotion 2014/2015.
- [6] ZELLAGUI Mohamed diplôme MAGISTÈRE En électrotechnique, le thème : «ÉTUDE DES PROTECTIONS DES RÉSEAUX ÉLECTRIQUES MT (30 & 10 kV)»UNIVERSITE MENTOURI –CONSTANTINE Promotion 2010.
- [7] BRAHME MOUNIR, rapport de détachement 2015
- [8] BOUANANI Amine -SOLTANI TARIQ Master en Électrotechnique, le thème: « Modélisation et analyse des interconnexions dans les systèmes électriques par schémas électriques équivalents (PEEC) » Université Mohamed Seddiki Ben Yahia - Jijel, Promotion 2018 /2019.
- [9] ZOUZOU Abderrahmane, KANOUNE Mohammed Yakhlef, Mémoire MASTER ACADEMIQUE, le thème : « Analyse par simulation des courants de court-circuit survenant dans les réseaux électriques » UNIVERSITE KASDI MERBAH OUARGLA, le 01/06/2017.
- [10] GOOGLE
- [11] FONCTION ALIMENTER : RESEAU NATIONAL 2012
- [12] Les postes HTA/BT

-
- [13] LAMINE Miloud ; DIPLOME Master II en EN GENIE ELECTRIQUE, le thème: «Etude et modélisation des courants de court-circuit dans les réseaux MT/BT » Université DE M'SILA, Promotion 2015/2016.
- [14] LEMDANI SOUFIANE, diplôme MAGISTÈRE En électrotechnique, le thème : «importance et nécessité de l'étude de la compensation et de sa contribution a la gestion de l'exploitation des longues lignes de transport a extra haut tension» UNIVERSITE MOHAMED BOUDHIAF- Oran, juin 2010
- [15] MERAGHNI Tahar GUIA Issam, diplôme de Master II en Electrotechnique; le thème : «L'effet de la pollution désertique sur l'isolateur de haute tension» UNIVERSITE d'El Oued;
- [16] Guide technique Traversées de transformateur de type GOM. 2001-05-30
- [17] MILOUDI Abdelkader ZITOUNA Hamed Ahmed , Diplôme de Master RESEAUX ELECTRIQUE, le thème « Etude et évaluation du réseau électrique du bloc administratif de pôle de technologie Ain-Beida», UNIVERSITE MOHAMED LARBI BEN M'HIDI, OUM EL BOUAGHI Promotion : 2017/2018
- [18] Chapitre VIII
- [19] Djaouti Saad Allah et Serradj Mohamed Mémoire de Master Machines Electriques « Etude de la protection d'un transformateur principal 533MVA », Université SAAD DAHLAB de BLIDA, 2016-2017
- [20] MENACEUR Nouréddine ZERAOULIA Mohamed, diplôme de MASTER Electrotechnique « Etudie et protéger les réseaux électriques de transport » UNIVERSITE BADJI MOKHTAR-ANNABA
- [21] rapport de stage sonal gaz l Hammamet Tébessa
- [22] cours Installations électriques, phénomènes et appareillages
- [23] NOUIOUA MABROUK ADOUI MERWAN, diplôme de master gène électrique « Protection des réseaux électriques HTB en utilisant de relais de distance », UNIVERSITE MOHAMED BOUDIAF - M'SILA, 2016 /2017
- [24] LABED Djamel thèse doctorat d'état en électrotechnique « PRODUCTION DECENTRALISEE ET COUPLAGE AU RESEAU », UNIVERSITE MENTOURI CONSTANTINE, Année 2008
- [25] RECHRACH ELHACHMI -MOHAMED ETHMANE MASTER EN Electrotechnique « THEME Détection des Défauts Directionnels Sur Les Lignes Electriques Haute Tension », UNIVERSITE LARBI TEBESSI – TEBESSA 2016 / 2017

- [26] M. AOUN Mohamed M. BOULAKEUR Faiz Master En L'ingénierie de l'Energie Electrique et Transport « Etude pratique du système de protection installé au niveau de réseau Sonelgaz » UNIVERSITE Akli Mohand Oulhadj —Bouira (ALGERIE)
- [27] Mr BOUCHAHDANE Mohamed MAGISTER En Electrotechnique **thème** « ETUDE DES EQUIPEMENTS DE PROTECTION DE LA NOUVELLE LIGNE 400 kV EN ALGERIE », UNIVERSITE MENTOURI CONSTANTINE ,2009.
- [28] Marzouk HABI Toufik BELDI MASTER D'ELECTROTECHNIQUE « Thème Protection d'un poste d'interconnexion THT/HT », UNIVERSITE MOULOUD MAMMERI DE TIZI-OUZOU.
- [29] DAAOU Yassine « Classification et localisation des défauts dans les lignes de transport à THT en temps réel », Université MOHAMED BOUDIAF d'Oran, promotion 2011.
- [30] HAL Id: dumas-01677485 <https://dumas.ccsd.cnrs.fr/dumas-01677485> Submitted on 8 Jan 2018
- [31] Principes ; applications des protections de lignes « philosophie » -Trans énergie –serge Tremblay –conception 2000 révision 2004
- [32] Michèle GAUDRY- Jean-Luc BOUSQUET « Lignes aériennes : échauffements et efforts électrodynamiques » Techniques de l'Ingénieur- D 4 439
- [33] Chapitre 2 : efforts électrodynamiques
- [34] Jean-Pierre Thierry Christophe Kilindjian, n° 162 les efforts électrodynamiques sur les jeux de barres en BT, CT 162 édition février 1993
- [35] Chapitre IV « MAGNÉTOSTATIQUE »
- [36] ELEC 9712 High voltage systèmes.