



الجمهورية الجزائرية
الديمقراطية
الشعبية



Republique Algerienne Democratique Et Populaire

وزارة التعليم العالي والبحث
العلمي

Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique

جامعة العربي
التبسي - تبسة

Université Larbi Tébessi- Tébessa –

Faculté des Sciences et de la Technologie

Département de génie électrique

MEMOIRE

Présenté pour l'obtention du diplôme de Master Académique

Spécialité : Électrotechnique industrielle

Étude et simulation de régime transitoire de manœuvre dans le réseau HT

Présenté et soutenu par : **BOUDIAR Rabie** et **YOUSFI Lakhmissi**

Devant le jury composé de :

M. Dib Djalel
M. Bendakir Abdelhakim
M. Nehal Ouassila

Pr
MCB
MAA

Président
Encadreur
Examineur 1

Promotion: 2021/2022

Promotion : 2021/2022

بِسْمِ اللَّهِ الرَّحْمَنِ الرَّحِيمِ

الإهداء

نتوجه بهذا العمل المتواضع، في نهاية المشوار الدراسي الوجيه:
لوجه الله الكريم خالصا، إنه خير معين، الموفق الرزاق ذي القوة المتين.
لرسول الله الرحمة المهداة، شفيعنا يوم الحسرة والأنين، وآله الطيبين
الطاهرين.

إلى من أمرني ربي أن أخفض لهما جناح الذل من الرحمة، وأقول ربي
ارحمهما كما ربياني صغيرا، وفارقا الدنيا وعنهم أستأنس الحزن والأنين.
إلى من بذلوا دمائهم حتى تنعم الأمة بالعزة، ويبيت الناس آمنين.
إلى من صبروا معي وأزروني دائما، وسأفر منهم يوم القيامة، الصاحبة
والبنين.

إلى الذين تفضلوا علي في دراستي بالنصح وأغدقوا ولم يقتروا، فلهم كل
التبجيل، وفقهم الله مع التمكين.
إلى الأخ الفاضل الدكتور المؤطر، جزاه الله عنا الخير، وأصلح له
زوجه وحفظ له البنين.

إلى زملاء الدراسة جميعا، متمنيا لهم النجاح آخر التكوين.
إلى الخيرين أينما تقفوا، ثبتهم الله، وأركس عنهم الحاسدين.

يوسفى لخميسي

Remerciement

*Avant tout nous remercions **Allah** qui nous a donné la patience et la force nécessaire pour terminer ce travail.*

Le travail présenté dans cette mémoire a été effectué au département

Génie électrique, Tébessa.

*Ainsi, on tient également à exprimer nos vifs remerciements à notre encadreur le docteur « **bendakir Abdelhakim** » pour avoir d'abord proposé ce thème, pour suivi continuel tout le long de la réalisation de cette thèse et qui n'a pas cessé de me donner ses conseils et remarques.*

Nos sincères remerciements aux messieurs les membres du jury pour l'honneur qu'ils me font en participant au jugement de ce travail.

On tient tenons à remercier vivement toutes personnes qui m'aidé a élaboré et réalisé cette mémoire, ainsi à tous ceux qui nous a aider de près ou de loin accomplir ce travail.

*Nous remercions tous les enseignants de département de **Génie électrique** Spécialement les enseignants qui ont contribué à ma formation.*

*Les meilleurs sentiments sont destinés pour la famille « **boudiar**», et la famille « **Yousfi** ». On remercie également tous les amis et tous les potes.*

On remercie également tous les amis et tous les potes.

Si on a oublié quelqu'un, on le prié de me pardonner.

RESUME

Ce travail représente une analyse de la propagation d'une onde électrique transitoire dans un poste aérien pour adapter un modèle exact produit des résultats similaires à celle de mesure afin d'aider à un choix approprié de la coordination des isolements aussi protégé le réseau et garantir une bonne qualité de l'énergie électrique. Le premier chapitre de ce mémoire est consacré à des généralités sur les réseaux électriques l'architectures et l'exploitation de ces différents types de réseaux. Dans Le deuxième chapitre Nous rappelons la définition d'une surtension, ses différents types et origines dans le réseau électrique et rappelons aussi quelques éléments d'informations sur la coordination des isolements. Dans le troisième chapitre nous exposons l'ensemble des modèles théoriques et mathématiques pour la mise en place d'un formalisme de simulation. Pour illustrer notre travail, nous proposons dans le quatrième et dernier chapitre quelques applications dont les résultats sont parfois confrontés à la mesure.

الملخص

يمثل هذا العمل تحليلا لانتشار موجة كهربائية عابرة في محطات التحويل الكهربائية من أجل ضبط نموج تحليلي دقيق يحاكي ما تعطيه النتائج التجريبية و هذا يساعد كثيرا في الاختيار تنسيق العوازل المناسب ، وحماية الشبكة وضمان جودة جيدة للطاقة الكهربائية، تم تخصيص الفصل الأول للعموميات حول الشبكات الكهربائية والبنى واستغلال هذه الأنواع المختلفة من الشبكات. في الفصل الثاني ذكرنا تعريف الجهد الزائد وأنواعه المختلفة وأصولها في الشبكة الكهربائية وذكرنا أيضا بعض المعلومات حول تنسيق العزل. في الفصل الثالث قدمنا جميع النماذج النظرية والرياضية لتنفيذ صيغة المحاكاة. ولتوضيح عملنا، في الفصل الرابع والأخير اقترحنا بعض التطبيقات لتسليط الضوء على التغير العشوائي لبعض اعدادات المحطة.

Abstract

This work represents an analysis of the propagation of a transient electric wave in an overhead substation to adapt an exact model produces results similar to that of measurement in order to help in an appropriate choice of the coordination of the insulations also protect the network and guarantee a good quality of the electrical energy. In the second chapter, we recall the definition of a surge voltage, its different types and origins in the electrical network and recall some elements of information on the coordination of insulation. In the third chapter, we present all the theoretical and mathematical models for the implementation of a simulation formalism. To illustrate our work, we propose in the fourth and last chapter some applications whose results are sometimes compared to the measurement.

NOTATIONS

<i>BT</i>	Basse Tension
<i>MT</i>	Moyenne tension
<i>BTA</i>	Basse Tension A
<i>HTB</i>	haute Tension b
<i>HTA</i>	haute Tension A
<i>HT</i>	haute Tension
<i>S</i>	Sectionneur
<i>Disjoncteur</i>	Disjoncteur
<i>Jdb</i>	Jeux de barres

LISTE DES FIGURES

<i>N°Fig</i>	<i>Titre de figure</i>	<i>N°Page</i>
CHAPITRE 1		
<i>Figure 1.1</i>	Les types de réseau électriques	04
<i>Figure 1.2</i>	Câble HTA souterrain	05
<i>Figure 1.3</i>	de chaîne d'isolateurs simples et doubles	06
<i>Figure 1.4</i>	Types usuels des pylônes pour des lignes triphasées	07
<i>Figure 1.5</i>	Poste électrique haute tension	08
<i>Figure 1.6</i>	jeux de barres	09
<i>Figure 1.7</i>	Architecture de poste	11
<i>Figure 1.8</i>	Les deux principales architectures des postes	14
CHAPITRE 2		
<i>Figure 2.1</i>	Exemple de surtensions	19
<i>Figure 2.2</i>	Forme normalisée d'un choc de manœuvre	22
<i>Figure 2.3</i>	Disjoncteur en réseau THT	25
<i>Figure 2.4</i>	fonctionnement de la chambre de coupure d'un disjoncteur	26
<i>Figure 2.5</i>	Production de transitoires à haute fréquence ; schéma simplifié	27
<i>Figure 2.6</i>	Mise sous tension d'un tronçon de barre	28
<i>Figure 2.7</i>	Tension transitoire lors d'une fermeture	28
<i>Figure 2.8</i>	Fermeture d'un disjoncteur dans le cas du couplage de deux barres	30
CHAPITRE 3		
<i>Figure 3.1</i>	Désignation des principales travées des postes	34
<i>Figure 3.2</i>	Configuration géométrique pour la méthode du plan fictif	37
<i>Figure 3.3</i>	Couplage entre deux conducteurs parallèles	38
<i>Figure 3.4</i>	couplage entre deux conducteurs parallèles de longueurs différentes	40
<i>Figure 3.5</i>	Calcul de potentiel du point P d'une ligne chargée	42
<i>Figure 3.6</i>	La source et son image représentant dans le milieu (1)	47

LISTE DES FIGURES

<i>Figure 3.7</i>	Configuration pour le calcul du champ Dans le milieu 1(air)	48
<i>Figure 3.8</i>	L'organigramme pour le calcul le courant Dans le milieu 1(air)	48
<i>Figure 3.9</i>	Discretisation de l'onde de courant	49
CHAPITRE 4		
<i>Figure 4.1</i>	schéma électrique monophasée d'un jeu de barres	54
<i>Figure 4.2</i>	Courant injecté trapézoïdal à l'entrée de la phase	54
<i>Figure 4.3</i>	Schéma électrique pour le calcul des courants transitoire sous SIMULINK	55
<i>Figure 4.4</i>	Variation du courant injecté à l'entrée du jeu de barre	56
<i>Figure 4.5</i>	Variation du courant injecté dans le jeu de barre (résultat publié en pour un poste aérien THT lors de la fermeture à vide d'un disjoncteur	56
<i>Figure 4.6</i>	Variation de la tension à l'extrémité libre du jeu de barre	57
<i>Figure 4.7</i>	Schéma descriptif du poste aérien	59
<i>Figure 4.8</i>	Schéma électrique triphasé (jeu de barre) pour le calcul des courants transitoire sous SIMULINK	60
<i>Figure 4.9</i>	L'injection d'un courant trapézoïdal	61
<i>Figure 4.10</i>	L'injection d'une tension trapézoïdale	61
<i>Figure 4.11</i>	Variation L'injection d'une tension trapézoïdal	62
<i>Figure 4.12</i>	Schéma électrique triphasé (une seule ligne) pour le calcul des courants transitoire sous SIMULINK	63
<i>Figure 4.13</i>	Courant injecté trapézoïdal	64
<i>Figure 4.14</i>	Tension injecté trapézoïdal	64
<i>Figure 4.15</i>	Variation tension injecté trapézoïdal	65

LISTE DES TABLEAUX

<i>N°Tab</i>	<i>Titre de tableau</i>	<i>N°Page</i>
<i>CHAPITRE 1</i>		
<i>Tableau 1.1</i>	Gamme de tension utilisée par SONELGAZ	<i>12</i>
<i>CHAPITRE 2</i>		
<i>Tableau2.1</i>	Caractéristiques des formes des surtensions	<i>22</i>

SOMMAIRE

Dédicace.....		
Remerciements.....		
Abréviations.....		
Liste des figures.....		
Liste des tableaux.....		
Introduction générale.....		01
Chapitre I : Généralités		
1.	Introduction.....	03
2.	Présentation du réseau électrique.....	03
	2.1 Réseaux de transport et d'interconnexion.....	03
	2.2 Réseaux de répartition.....	04
	2.3 Réseaux de distribution.....	04
3.	Les Lignes électriques.....	04
	3.1 Types des lignes	05
	3.1.1 Les Lignes aériens.....	05
	3.1.2 Ligne souterrains (câbles).....	05
4.	Description générale des matériels constituant la ligne.....	05
	4.1 Conducteurs.....	05
	4.2 Isolateurs.....	06
	4.3 Pylône électrique	06
	4.4 Câbles de garde.....	07
5.	Postes électriques.....	08
	5.1 Le Poste	08
	5.2 Appareils haute tension	09
	5.2.1 Matériels d'installation.....	10
	5.3 Équipements basse tension	10
6.	Poste THT / HT Sa spécificité.....	10
	6.1 Organisation fonctionnelle.....	11
7.	Type de poste/Architecture.....	12
	7.1 Niveau de tension.....	12
	7.2 Technologie.....	13
	7.2.1 Poste ouvert	13
	7.2.2 Poste blindé.....	13
	7.2.3 Cellule préfabriquée	13
	7.3 Architecture.....	13
8.	Mode d'exploitation des postes et téléconduite du réseau	14
	8.1 Mode d'exploitation des postes.....	15

8.2	La téléconduite des réseaux.....	15
Chapitre II : Comportement du réseau électrique en régime transitoire		
1.	Introduction	17
2.	Ligne en charge symétrique	17
3.	Ligne en régime sinusoïdal non symétrique.....	18
4.	Surtension de manœuvres	18
4.1	Définition.....	18
4.2	Origine des surtensions	19
4.3	Durée des surtensions.....	19
5.	Définition de facteur de surtension entre phase et terre.....	21
5.1	Paramètres influençant le facteur de surtension.....	21
5.2	Paramètres influençant la forme des surtensions.....	22
6.	Surtensions de manœuvre.....	22
6.1	Surtensions de manœuvre dues à l'enclenchement ou au ré-enclenchement (fermeture).....	23
6.1.1	Phénomène de base.....	23
7.	Manœuvres dans les postes aériens THT et HT.....	24
7.1	Appareillage de coupure à haute tension.....	24
7.2	Régimes transitoires dus aux manœuvres.....	26
7.2.1	Cas général	26
7.2.2	manœuvre de sectionneur.....	27
7.2.3	Manœuvre de disjoncteur	29
8.	Surtensions et coordination de l'isolement.....	30
8.1	Propagation des surtensions.....	30
8.2	Définition de la coordination de l'isolement.....	31
8.3	Importance de la coordination de l'isolement.....	31
9.	Conclusion.....	32
Chapitre III : Modélisation des régimes transitoires de manœuvres dans un poste électrique		
1.	Introduction	33
2.	Configuration d'un poste électrique aérien.....	33
3.	Calcul des paramètres linéiques du jeu de barres.....	35
3.1	Les paramètres linéiques longitudinaux.....	35
3.1.1	Lignes infinies parallèles au sol.....	35
3.1.1.1	Théorie du plan complexe fictif (Carry).....	36
3.1.2	Lignes de longueurs finies et parallèles au sol.....	38

		3.1.3	Lignes parallèles et de même longueur.....	39
		3.1.4	Deux lignes parallèles de longueur différentes.....	39
	3.2	Paramètres linéiques transversaux.....		40
		3.2.1	Lignes infinies parallèles au sol.....	41
		3.2.2	Lignes de longueurs finies et parallèles au sol.....	41
4.	Calcul du courant transitoire.....			43
	4.1	Transitoires de la ligne de transport électrique.....		43
	4.2	Modèle de calcul des courants transitoire le long d'une structure filaires.....		44
		4.2.1	Lignes sans pertes ou transitoires très rapides.....	45
		4.2.2	Lignes avec pertes.....	45
5.	Calcul du courant dans un milieu dissipatif et semi infini.....			46
	5.1	Milieu semi infini.....		47
	5.2	Source et point d'observation dans l'air.....		47
6.	Méthode des rampes de courant.....			48
	6.1	Formulation du calcul une rampe de courant.....		49
7.	Méthode analytique exacte.....			50
8.	Limites et le domaine de validation des trois méthodes.....			50
	8.1	Amélioration de la méthode analytique.....		51
Conclusion.....				52
Chapitre IV : Application				
1.	Introduction.....			53
2.	Validations.....			53
3.	Application.....			58
	3.1	Application sur d'un poste 410kV.....		59
		3.1.1	Cas de l'injection d'un courant trapézoïdal.....	61
4.	Cas propagation sur une ligne 220kV.....			63
	4.1	Cas de l'injection d'un courant trapézoïdal.....		64
Conclusion.....				66
Conclusion générale.....				67
Références bibliographiques.....				
ANNEXE.....				

INTRODUCTION GENERALE

INTRODUCTION GENERALE

De nos jours le contrôle des réseaux électrique est plus en plus confié à des systèmes informatiques d'aide à la prise de décision. L'information nécessaire à ce contrôle est fournie par des dispositifs électroniques principalement installés dans les bâtiments de relayage (situés à proximité de la HT) et dans les postes aériens THT et HT.

Les défauts sur les réseaux provoquent des perturbations affectant leur fonctionnement et la qualité d'alimentation de la clientèle. Par exemple, un défaut mal éliminé sur le réseau THT de transport et d'interconnexion peut conduire à un incident de grande ampleur privant d'alimentation une partie importante du territoire alors que les défauts sur les réseaux de répartition HT entraînent des creux de tension ou des coupures brèves, voire des coupures longues, chez les clients. La qualité de leur élimination est directement fonction des performances des systèmes et des équipements de coupure qui implique des interventions en temps réel.

Un réseau électrique en fonctionnement peut subir à un régime transitoire causé par les manœuvres, et d'autres défauts externe comme les foudres. Ces perturbations provoquent des phénomènes physiques très variés au sein du réseau tel que la propagation des ondes de surtension et de surintensités.

Donc, les gestionnaires des réseaux doit tenir compte non seulement des conditions de régime permanent mais aussi des régimes transitoires dont l'importance peut dans certaines cas être prépondérante pour garantir la coordination de l'isolement.

La coordination de l'isolement est une discipline qui permet de réaliser le meilleur compromis technico-économique dans la protection des personnes et des matériels contre les surtensions pouvant apparaître sur les installations électriques, que ces surtensions aient pour origine le réseau ou la foudre. Elle participe à l'obtention d'une grande disponibilité de l'énergie électrique

Le caractère varié et aléatoire des surtensions les rend difficiles à caractériser et n'autorise qu'une approche statistique en ce qui concerne leur durée, leurs amplitudes et leurs effets.

On conçoit donc facilement l'intérêt des méthodes d'études des régimes non sinusoïdaux, applicables à la prédétermination de la nature et de la forme des ondes de tensions et de courant qui peuvent se propager sur ces réseaux.

Par le passé, la prédétermination est réalisée de deux façons complémentaires : d'une part l'étude analogique à l'aide d'analyseurs transitoires, qui sont de véritables calculateurs analogiques particuliers, d'autre part à l'aide de méthodes numériques implantées sur des

INTRODUCTION GENERALE

ordinateurs. Au début, les exploitants de réseaux et les constructeurs donnaient la préférence à l'analyseur transitoire, qui permet une meilleure visualisation des phénomènes physiques.

Néanmoins, le développement des modèles numériques, par leur souplesse, leur fiabilité et leur rapidité d'exécution ont pris le pas sur les études analogiques.

Notre projet de fin d'études est consacré à une caractérisation analytique des transitoires de manœuvre. Pour assurer le bon fonctionnement des réseaux électriques, il est indispensable d'enclencher ou de ré-enclencher les lignes de transport d'énergie à partir des postes électriques. Cette opération de manœuvre, fermeture d'un disjoncteur, est à l'origine d'une surtension en mesure de provoquer un défaut d'isolement.

Pour présenter notre travail, nous avons organisé notre mémoire en quatre chapitres. Le premier chapitre est consacré aux généralités, quelques notions en relation, sur le réseau électrique qui portent sur son fonctionnement et sa gestion en temps réel.

Le deuxième chapitre est consacré à quelques notions directement en relation avec notre travail, les surtensions, les manœuvres dans les postes

Dans le troisième chapitre nous exposons l'ensemble des modèles théoriques et mathématiques pour la mise en place d'un formalisme de simulation. Nous proposons donc de modéliser les jeux de barres en régime transitoire comme des lignes courtes, d'où les expressions analytiques pour le calcul des paramètres linéiques. Aussi, pour analyser la propagation de la surtension, dans un poste électrique, lors d'une opération de manœuvre nous résolvons un système d'équations différentielles ordinaires ; nous donnons un bref exposé mathématique sur l'algorithme général utilisé.

Dans le quatrième chapitre nous proposons quelques résultats de simulations que nous avons obtenus pour analyser les transitoires de manœuvres dans un réseau électrique (ligne aérienne, poste électrique).

Nous terminons ce mémoire par une conclusion générale.

CHAPITRE I

Généralités

1. Introduction

Les réseaux électriques sont constitués par l'ensemble des appareils destinés à produire, transporter, à distribuer l'électricité depuis les centrales de génération jusqu'aux clients (centrales, lignes, postes de transformation, conducteurs, isolateurs, pylônes, parafoudres, transformateurs, équipements de protection,...).

Les réseaux électriques ont pour fonction d'interconnecter les centres de production tels que les centrales hydrauliques, thermiques... avec les centres de consommation (villes, usines,...).

L'énergie électrique est transportée en haute tension, afin de limiter les pertes joules puis progressivement abaissée au niveau de la tension de l'utilisateur final.

Dans ce chapitre consacré aux généralités, nous commençons par introduire quelques notions sur le réseau électrique qui portent sur son fonctionnement et sa gestion en temps réel.

2. Présentation du réseau électrique

2.1 Réseaux de transport et d'interconnexion

Le premier de ces segments est le réseau de transport, qui peut transférer l'énergie électrique des centres de production éloignés vers les centres de consommation. C'est sur le réseau THT que sont branchées les centrales de grandes puissances (> 300 MW). Les réseaux de transport constituent une vaste grille couvrant le territoire, à laquelle sont raccordées les sources et les utilisations (groupes, transformateurs). [1]

Les réseaux de transport et d'interconnexion ont principalement pour mission :

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

2.2 Réseaux de répartition

Les réseaux de répartition ou réseaux Haute Tension ont pour rôle de répartir, au niveau régional, l'énergie issue du réseau de transport. Leur tension est supérieure à 63 kV selon les régions. Ces réseaux sont, en grande part, constitués de lignes aériennes, dont chacune peut transiter plus de 60 MVA sur des distances de quelques dizaines de kilomètres. Leur structure est, soit en boucle fermée, soit le plus souvent en boucle ouverte, mais peut aussi se terminer en antenne au niveau de certains postes de transformation. [2]

2.3 Réseaux de distribution

Les réseaux de distribution commencent à partir des tensions inférieures à 63 kV et des postes de transformation HTB/HTA avec l'aide des lignes ou des câbles moyenne tension jusqu'aux postes de répartition HTA/HTA. Le poste de transformation HTA/BTA constitue le dernier maillon de la chaîne de distribution et concerne tous les usages du courant électrique. [3]

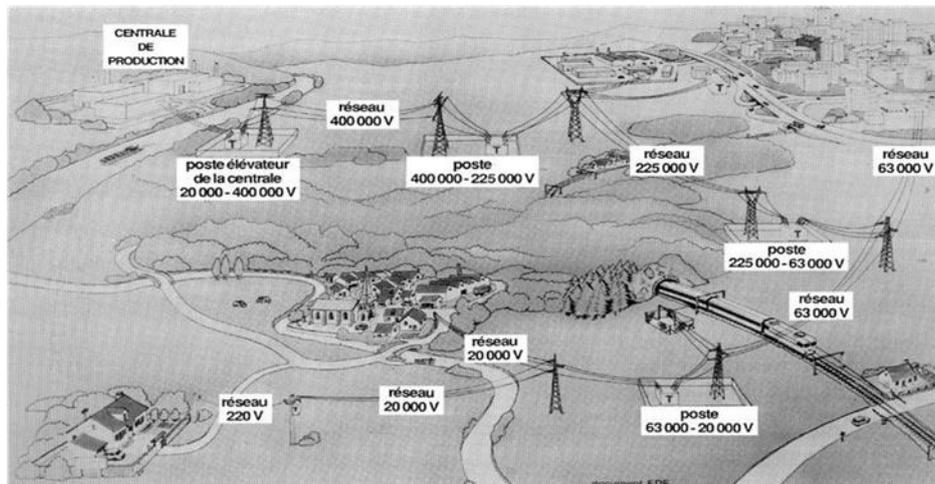


Figure.1.1. Type des réseaux électriques.

3. Les Lignes électriques

Assurent la fonction « transport de l'énergie » sur les longues distances. Elles sont constituées de 3 phases, et chaque phase peut être constituée d'un faisceau de plusieurs conducteurs (de 1 à 4) espacés de quelques centimètres afin de limiter l'effet couronne qui entraîne des pertes en lignes, différentes des pertes Joule. L'ensemble de ces 3 phases électriques constitue un terme.

3.1 Types des lignes

3.1.1 Les Lignes aériens

Elle est composée de conducteur nus, généralement en alliage d'aluminium, d'isolateurs, de pylônes et d'un câble de garde pour les lignes de haute tension. Son rôle principale est de transporter l'énergie électrique de la source de production jusqu'à la zone de consommation.

Elle possède les caractéristiques suivantes :

- La tension reste constante sur toute la longueur de la ligne et pour toutes les charges comprises entre zéro est la charge nominale.
- Un bon rendement.
- Les pertes joules ne doivent pas surchauffer les conducteurs.

3.1.2 Ligne souterrains (câbles)

Les câbles souterrains sont principalement employés pour le transport et la distribution de l'énergie électrique dans les zones fortement urbanisées (grandes villes), parfois pour résoudre des problèmes locaux particuliers, techniques ou d'environnement, pour lesquels la mise en œuvre de lignes aériennes est difficile ou impossible. [4]



Figure.1.2. Câble HTA souterrain.

4. Description générale des matériels constituant la ligne

4.1 Conducteurs

Les conducteurs ont pour rôle de véhiculer l'énergie électrique ; ils peuvent être aériens ou souterrains (et parfois sous-marins). Les conducteurs aériens sont soumis à l'action

des facteurs atmosphériques : température, vent, pluie, verglas... et doivent par conséquent être choisis de façon à résister à toutes ces intempéries. De nos jours les matériaux les plus utilisés dans la production des câbles sont : l'aluminium, le cuivre, l'acier.

4.2 Isolateurs

La fixation et l'isolation entre les conducteurs et les pylônes sont assurées par des isolateurs, ils ont un rôle à la fois mécanique et électrique. Ceux-ci sont réalisés en verre, en céramique, ou en matériau synthétique. Les isolateurs en verre ou céramique ont en général la forme d'un empilement d'assiettes. Plus la tension de la ligne est élevée, plus le nombre d'assiettes est important. Les chaînes peuvent être simples (câbles légers en suspension), doubles droites (horizontales pour les câbles en amarrage et verticales pour les câbles lourds en suspension), doubles en V (câbles en suspension anti-balancement) voire triples (supportant plusieurs câbles).

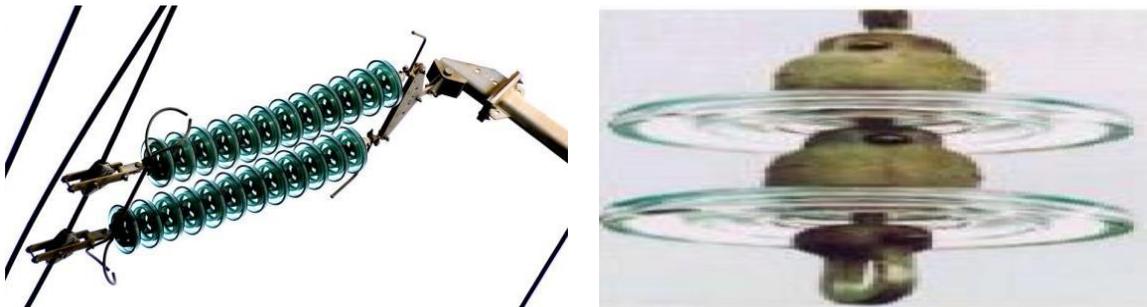


Figure.1.3. de chaîne d'isolateurs simples et doubles.

4.3 Pylône électrique

Les pylônes ont pour fonction 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. Leur forme, leur hauteur et leur robustesse, ou résistance mécanique, dépendent de leur environnement (conditions climatiques) et des contraintes mécaniques (terrain) auxquelles ils sont soumis. Leur silhouette est caractérisée par la disposition des câbles conducteurs.

➤ Types de pylônes électriques

On distingue plusieurs types de pylônes et parmi eux on trouve : le pylône métallique en treillis qui est constitué par un assemblage de membrures formant un treillis et destiné à la plupart des lignes de transport de l'électricité, il comporte un fût quadrangulaire et des consoles ou des traverses. Le pylône haubané à chaînette supporte des conducteurs à 735 KV, ce type de pylône nécessite moins d'acier galvanisé que le pylône haubané en V ; il est donc comparativement moins lourd et moins cher. Le pylône en béton est fréquent en HTA, mais on le rencontre aussi en HTB utilisé pour des tensions allant jusqu'en 380 kV, ce pylône est préfabriqué en usine. Le pylône en bois est essentiellement utilisé en HTA, quoiqu'on le trouve dans certains pays jusqu'en 161 kV. Des prototypes existent aussi pour des tensions supérieures.

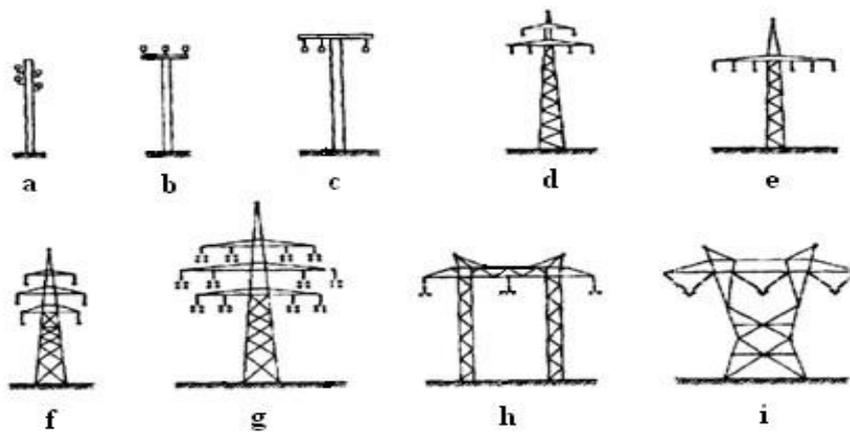


Figure.1.4. Types usuels des pylônes pour des lignes triphasées.

- a) Poteau de bois.
- b) Ligne avec isolateurs rigides (moyennes tensions).
- c) Poteau en béton (moyennes tensions).
- d), e), f) Pylônes en treillis pour lignes à deux ternes (hautes tensions).
- g) Ligne à plusieurs ternes (hautes tensions).
- h), i) Ligne simple à un terne (hautes tensions).

4.4 Câbles de garde

Les câbles de garde ne conduisent pas le courant. Ils sont situés au-dessus des conducteurs. Ils jouent un rôle de paratonnerre au-dessus de la ligne, en attirant les coups de

foudre, et en évitant le foudroiement des conducteurs. Ils sont en général réalisés en acier. Au centre du câble d'acier on place par fois un câble fibre optique qui sert à la communication de l'exploitant. [5]

5. Postes électriques

5.1 Le Poste

Tous les réseaux sont reliés entre eux par des postes électriques qui constituent une pièce majeure dans le transport et la distribution d'électricité ou c'est le lieu (le nœud) d'où le réseau est :

- Organisé (configuration de la topologie).
- Surveillé (fonction de monitoring).
- Protégé (action des protections).

Le poste comprenant principalement les extrémités des lignes de transport ou de distribution, des appareillages électriques, des bâtiments, et éventuellement des transformateurs situés en un même lieu. [6]

Les postes électriques ont les fonctions principales suivantes :

- Le raccordement des portions des réseaux de tension différentes.
- L'interconnexion entre les différentes lignes électriques.
- La transformation de l'énergie en différents niveaux de tension.



Figure.1.5. Poste électrique haute tension.

5.2 Appareils haute tension

Les principaux composants d'un poste électrique consistent en :

- Appareillage de liaison : jeu de barres où aboutissent les raccordements aux centres consommateurs et producteurs ;
- Appareillage de manœuvre : disjoncteurs qui ouvrent ou ferment un circuit, suite à une manœuvre d'exploitation ou à un défaut imprévu dans le réseau, sectionneur dont la principale fonction est d'assurer l'isolement du circuit qu'il protège.
- Appareillage de régulation : transformateur à réglage en charge, batterie de condensateurs ;
- Appareillage de conversion : redresseurs ;
- Appareillage de mesure et protection : transformateurs de tension et de courant ; appareils de mesure proprement dits et relais branchés au secondaire des réducteurs de mesure ;
- Appareillage d'automatisme, de télécommande, de télésignalisation, de télémessure ;
- Services auxiliaires : la signalisation, les verrouillages, le chauffage, l'éclairage, etc.



Figure.1.6. jeux de barres.

En outre, les jeux de barres sont susceptibles de constituer plusieurs nœuds électriques par l'ouverture de disjoncteurs ; on appelle alors sommet le jeu de barres ou le tronçon de jeu de barres ainsi constitué. Le nombre des sommets d'un poste caractérise ainsi son aptitude à former des nœuds électriques. [7]

5.2.1 Matériels d'installation

- charpentes, supports métalliques des appareils HT, isolateurs posés ;
- câbles nus aériens et câbles isolés multiconducteurs ;
- raccords HT/MT, armements (isolateurs de lignes) ;
- circuit de terre.

5.3 Équipements basse tension

Le poste d'interconnexion présente aussi une partie basse tension comprenant :

- Les services auxiliaires à courant alternatif.
- Les services auxiliaires à courant continu.
- Les ensembles de protections permettant d'éliminer les défauts en préservant au maximum les possibilités d'exploitation du réseau sain.
- Les tableaux synoptiques nécessaires pour contrôler la manœuvre à distance dans une salle de commande située dans l'enceinte du poste.
- Les équipements de télé-informations destinées au dispatching. [8]

6. Poste THT / HT Sa spécificité

Ces postes sont dédiés au transport de l'énergie et à l'interconnexion. Ils interconnectent les centrales et les postes dits de distribution HT/MT ;

Ces postes possèdent par rapport aux postes HT/MT et à fortiori MT/BT quelques caractéristiques spécifiques :

- Leur architecture est organisée pour assurer une bonne disponibilité (poste à couplage de disjoncteur ou à couplage de barres avec 2 ou 3 jeux de barres).
- Ces postes participent pour une part importante au contrôle de la tension. Les transformateurs de sorties de centrale coté production et les transformateurs des postes HT/MT, côté distribution, sont munis de régleur en charge. C'est également dans les postes THT/HT que l'on trouve les réactances shunts chargées de compenser l'énergie réactive produite par les lignes THT/HT (aériennes et souterraines).
- Le neutre des transformateurs THT de sorties de centrales ou auto transfo d'interconnexion (en 400/220 Kv par exemple) sont mis rigidement à la terre pour contrôler de façon certaine le potentiel des neutres. Cette mise à la terre participe par ailleurs à la réduction des surtensions de manœuvres. A l'inverse cette mise à la terre

directe favorise des hauts niveaux de courants de défauts. Pour des raisons de stabilité, il faut éliminer très rapidement ces défauts.

- Ces postes de transport sont munis d'un filet de garde relié lui-même aux lignes protégées par les câbles de gardes. L'importance de ces postes, garant pour une part de la stabilité du réseau tout entier, sont munis de parafoudres aux sorties de lignes et aux bornes des transformateurs.

6.1 Organisation fonctionnelle

Les fonctions d'un poste peuvent être classées et étudiées de différentes manières, selon que l'on est un homme d'exploitation, de maintenance, de conception. On retiendra cependant les deux grandes familles (ou systèmes) :

- le système de conduite et de surveillance
- le système de protection

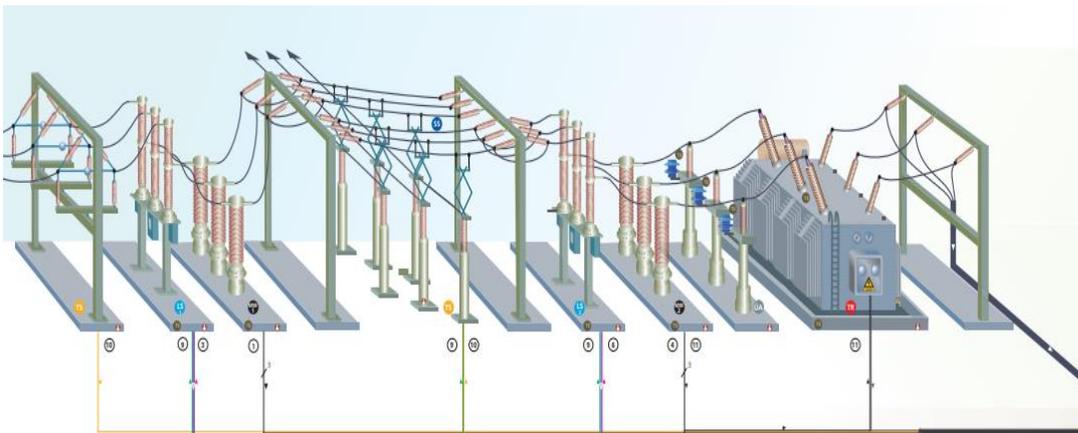


Figure.1.7. Architecture de poste.

1. Série de transducteurs 1 transformant des grandeurs primaires (U et I) en grandeurs secondaires pour la technique de guidage et les appareils de protection du champ.
2. En cas de défaillance, le disjoncteur (LS) reçoit de la protection la commande ARRET, le centre de commande reçoit le message correspondant.
3. Au signal de protection, le LS 1 éteint le champ d'alimentation et en informe le centre de commande.
4. Le transducteur 2 fournit du courant secondaire côté haute tension pour la protection du transformateur.

5. En cas de défaillance, le transformateur de protection envoie la commande ARRÊT au disjoncteur transformateur LS 2.
6. Sur le Trafo Security Control, LS 2 coupe le champ du trafo et envoie le message au centre de contrôle.
7. Le redresseur génère une tension continue à partir du réseau 230V AC pour charger la batterie et alimenter les appareils de commutation et les systèmes de protection.
8. En cas de panne du réseau, l'installation ASI assure l'approvisionnement ininterrompu des consommateurs en courant alternatif pour les technologies de l'information et des télécommunications.
9. En cas de défaillance du secteur, la batterie tamponne l'alimentation en courant continu des appareils de protection et de commutation et assure leur alimentation.
10. La commande des sectionneurs (sectionneurs) peut s'effectuer par l'intermédiaire du poste de route, de l'interface de station ou de la commande sur place (VOB).
11. Le convertisseur de mesure 2 signale une nouvelle grandeur primaire (U) à un commutateur à gradins de transformateur (TSS) en vue d'un réglage ultérieur, TSS envoie un signal au poste de commande.

7. Type de poste/Architecture

7.1 Niveau de tension

Les niveaux de tension utilisés diffèrent d'un type de réseau à un autre et diffèrent d'un pays ou d'une région à une autre. Selon la norme IEC (International Electrotechnical Committee) les niveaux de tension sont définis comme suit tableau (1.1) :

Domaines de Tension		Valeur de la tension composée nominale (Un en Volts)	
		Tension Alternative	Tension Continue
Très Basse Tension (TBT)		$Un \leq 50$	$Un \leq 120$
Basse Tension (BT)	BTB	$50 < Un \leq 500$	$120 < Un \leq 750$
	BTB	$500 < Un \leq 1000$	$750 < Un \leq 1500$
Haute Tension (HT)	HTA ou MT	$1000 < Un \leq 50\ 000$	$1500 < Un \leq 75\ 000$
	HTB	$Un > 50\ 000$	$Un > 75\ 000$

Tableau 1.1 : Gamme de tension utilisée par SONELGAZ. [39]

7.2 Technologie

7.2.1 Poste ouvert

Les différents éléments des circuits (schéma et position des organes de sectionnement) sont visibles de l'extérieur. L'isolement est l'air environnant (distances minimales à respecter), les organes vitaux ne sont pas à l'abri :

- Des chocs venant de l'extérieur,
- De l'action d'agents extérieurs.

L'opérateur doit assurer sa propre sécurité lorsqu'il effectue :

- Les opérations normales d'exploitation,
- Les opérations de sécurité.

7.2.2 Poste blindé

Le poste blindé ou GIS (sous enveloppe métallique) se présente donc comme un assemblage de caissons remplis de SF6 et contenant, non seulement les conducteurs, mais aussi les appareils à haute tension. Pour des raisons de sécurité, ces caissons sont divisés en compartiments étanches et surveillés individuellement.

7.2.3 Cellule préfabriquée

Mise en œuvre de matériel compact installé dans une armoire métallique (1 x 1,5 x 2,5 M environ), par travée. L'installation se fait principalement en intérieur. Les postes utilisant cette technologie sont nommés "postes préfabriqués". Ce sont majoritairement les postes MT.

7.3 Architecture

Le choix de l'architecture d'un poste dépend de plusieurs paramètres technico-économiques (Fiabilité, flexibilité, maintenance, les coûts d'investissement et de maintenance). La fiabilité et la flexibilité d'un poste sont déterminées par son architecture, et plus précisément du nombre et disposition des jeux de barres, nombre et disposition des appareils de coupure (disjoncteurs), et éventuellement des lignes qui alimentent le poste.

Les postes, au niveau de l'architecture et indépendamment de leurs types peuvent être classés en deux familles :

- les postes à couplage de barre
- les postes à couplage de disjoncteur

Dans la première famille, les barres couplent entre eux les différents départs. Dans la seconde famille, les disjoncteurs couplent entre eux les différents départs.

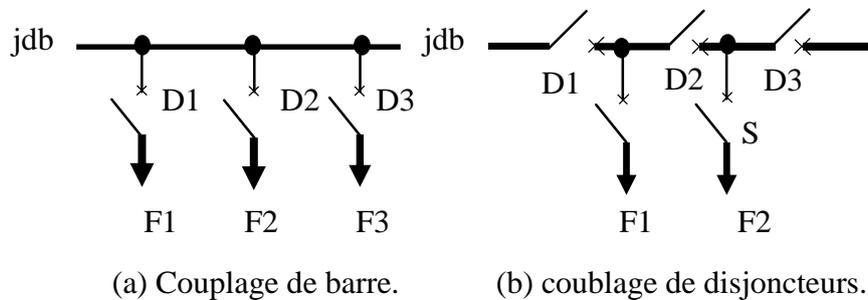


Figure.1.8. Les deux principales architectures des postes.

La Figure.1.8 montre la différence entre ces deux familles de postes. De point de vue fiabilité, on peut remarquer qu'un défaut sur le départ F1 par exemple nécessitera l'ouverture du disjoncteur D1 pour l'architecture à couplage de barre, alors que pour l'autre architecture il faudra ouvrir D1 et D2 pour isoler le départ en défaut. Cependant, en cas de maintenance de disjoncteur D1 le départ est F1 est condamné pour l'architecture à couplage de barre, mais peut rester en service grâce à D2 pour l'architecture à couplage de disjoncteurs. Donc, à la lumière de cette exemple, on peut dire que l'architecture à couplage de disjoncteur est plus fiable, cependant de point de vue coût, il est évident qu'elle revient plus chère du fait qu'il nécessite plus de disjoncteurs pour protéger le même nombre de départ (exemple : trois disjoncteurs pour trois départs dans une architecture à couplage de barres, le même nombre de disjoncteurs pour deux départs pour une architecture à couplage de disjoncteurs.).

8. Mode d'exploitation des postes et téléconduite du réseau

Pour satisfaire à tout instant la demande dans les meilleures conditions de coût et de qualité de service, il est nécessaire que des centres de conduite reçoivent des informations en permanence des réseaux et des groupes de production, les traitent pour concevoir les actions à engager et émettent les ordres correspondants. À cette fin, au réseau de transit d'énergie se superpose un système de conduite constitué de liaisons de télécommunication qui relie les différents niveaux de contrôle et de commande aux postes.

8.1 Mode d'exploitation des postes

La commande d'appareillages et d'automatismes depuis des sites déterminés permet ainsi d'adapter en permanence et de manière la plus optimale le schéma d'exploitation aux conditions de charge tout en assurant la sécurité des installations. La transmission, en retour de données, de mesures, de signalisations de position permet la connaissance de l'état du réseau et la surveillance du bon fonctionnement des appareils. En fonction du type d'exploitation et de la plus-value apportée par l'intervention de l'homme, on distingue :

- **les postes gardiennes**, comportant du personnel d'exploitation présent durant les heures ouvrables et loge sur place ;
- **les postes télécommandes**, exploités soit à partir d'un autre poste gardiennes, soit à partir d'un bureau de conduite centraliste et qui n'ont donc pas de personnel sur place, sauf pour des interventions particulières ;
- **Les postes téléalarmes**, qui, dans le cas où la reprise automatique de service ne s'effectue pas, font parvenir une signalisation en un lieu où séjourne du personnel d'intervention.

Ces derniers postes ne comportent généralement que des installations modestes nécessitant un nombre de manœuvres des postes importants étant, suivant les conditions locales, soit gardiennes, soit télécommandes.

8.2 La téléconduite des réseaux

Les fonctions de base de la téléconduite sont de surveiller, contrôler et télécommander des organes situés dans les postes électriques mais aussi dans les centrales. La taille et la complexité du système électrique justifient une organisation hiérarchisée de ces fonctions. Au niveau du réseau de transport, on distingue quatre niveaux de conduite :

- un niveau national assuré par le dispatching national. Ses rôles sont d'assurer en temps réel l'équilibre production-consommation, de gérer le plan de tension, ainsi que la maîtrise des transits sur le réseau 400 kV,

- un niveau régional assuré par les dispatchings régionaux. Les rôles de ces dispatchings sont de surveiller les transits sur les réseaux 63 kV, 90 kV, 225 kV, voire 400 kV, de gérer la topologie des réseaux HTB, de piloter la tension par zone et de surveiller les injections aux nœuds électriques du réseau,

- un niveau intermédiaire, assuré par les groupements de postes électriques. Ils ont en charge la surveillance et la conduite des installations de transport, ainsi que certaines fonctions de conduite du système à la demande du dispatching régional,

- un niveau local situé dans chaque poste de transport. Ce niveau peut assurer la surveillance et la conduite d'installations en ultime secours ou pendant certains travaux.

Les centres de conduite sont équipés de systèmes informatiques assurant l'acquisition et le traitement des informations en provenance des installations de puissance. [9]

CHAPITRE II

Comportement du réseau électrique en régime transitoire

1. Introduction

Un réseau électrique est toujours exposé à des contraintes diélectriques désignées par internes ou externes, telles que par exemple : enclenchement de lignes, coups de foudre, etc. La tension permanente du réseau n'est pas la seule contrainte diélectrique interne : bien au contraire, de nombreux phénomènes électriques sont causes de contraintes extrêmement variées. Il y'a plusieurs classements de tensions, un classement habituel définit comme suit :

- Tension à fréquence industrielle dans les conditions normales d'exploitation, c'est-à-dire dans le régime normal non perturbé.
- Surtensions temporaires à fréquence industrielle ou fréquence voisine.
- Surtensions transitoires de manœuvre, de foudre, ...

Les chocs de manœuvre influencent la tenue diélectrique de l'isolation selon leur amplitude et leur durée, causant à l'occasion des interruptions du service électrique et des dommages sur les composantes du réseau électrique. L'analyse des régimes transitoires est un sujet important dans l'étude des réseaux de transport d'énergie principalement pour la coordination de l'isolement. Dans notre projet de fin d'études, nous allons étudier les surtensions lors de manœuvres dans les postes électriques.

Dans ce deuxième chapitre intitulé " Comportement du réseau électrique en régime transitoire" nous proposons quelques éléments descriptifs propres à notre problématique.

2. Ligne en charge symétrique

La plupart du temps, les réseaux de transport d'énergie électrique travaillent dans des conditions proches d'une symétrie parfaite. En effet, les trois phases des alternateurs sont, par constructions, symétriques et les impédances propres et mutuelles des différentes phases des transformateurs et des lignes aériennes ou souterraines ont des valeurs approximativement égales.

Le calcul des courants et des tensions aux deux extrémités d'une ligne triphasée de construction symétrique, et en régime sinusoïdal symétrique, peut être fait à partir d'un schéma en π monophasé équivalent. On démontre que, pour une tension donnée et imposée au début de la ligne, les puissances actives et réactives que l'on peut obtenir en fin de ligne sont limitées. La chute de tension peut être positive, nulle ou négative. Il y a en général deux solutions dont seule celle qui comporte le plus petit courant doit être retenue.

3. Ligne en régime sinusoïdal non symétrique

Les charges sont aussi en général symétriques équilibrées. Des cas déséquilibrés existent cependant en régime de fonctionnement normal, telle la présence dans le réseau d'importants consommateurs monophasés. En plus, des situations de déséquilibre apparaissent d'une manière accidentelle dans le réseau : court-circuit ou ruptures accidentelles d'une phase d'alternateur ou d'une phase de la ligne de transport.

4. Surtension

Les installations et les systèmes électroniques peuvent subir des surtensions variées. Ces dernières se différencient principalement par leur durée et leur amplitude. Selon sa provenance, une surtension peut durer de quelques centaines de microsecondes à plusieurs heures voire plusieurs jours. L'amplitude s'étend de quelques millivolts à plusieurs centaines de milliers de volts.

4.1 Définition

On définit par Un régime transitoire, l'évolution des surtensions entre deux états de fonctionnement permanent [10]. On qualifie de surtension toute tension fonction du temps qui dépasse la tension crête de régime permanent à sa tolérance maximale.

Les surtensions de très grande amplitude, qui relèvent donc du domaine du kilovolt, correspondent en général à ce que l'on appelle les surtensions transitoires, c'est à dire qu'elles sont d'une durée relativement courte qui va de quelques microsecondes à quelques centaines de microsecondes. La forte amplitude et la courte durée impliquent des hausses de tension très abruptes et d'importants écarts de tension, dont les conséquences ne peuvent être contrées qu'avec un parafoudre basse tension. Certes, les dommages matériels de l'installation électrique d'un exploitant peuvent être pris en charge par une assurance adéquate, mais la panne temporelle jusqu'à la réparation de l'installation reste au détriment de ce dernier Cette défaillance n'est bien souvent pas assurée et peut rapidement induire une lourde charge financière. Elles se superposent à la tension nominale comme montré sur la (figure 2.1)

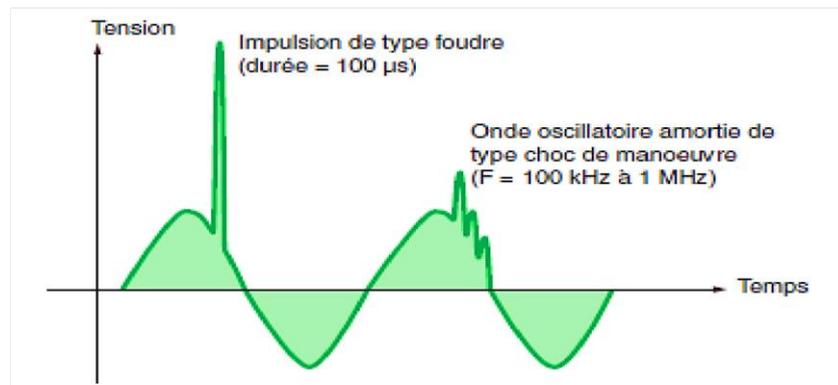


Figure.2.1. Exemple de surtensions. [11]

La courbe est une impulsion de la foudre de la chute de l'éclair et de l'impulsion du commutateur de type choc.

Les surtensions se caractérisent par des ondes de courant et de tension.

En général par :

- Le temps de montée en (μs) ;
- Une pente S ($\text{kV}/\mu\text{s}$).

4.2 Origine des surtensions

On distingue d'abord :

➤ **Les surtensions d'origine externe**, dont la cause est extérieure au réseau essentiellement dues à la foudre, qu'on appelle aussi les surtensions à front rapide (exemple : surtension de foudre ayant un temps de crête compris entre 0.1 et 20 μs et un temps jusqu'à la mi-amplitude de moins de 300 μs).

➤ **Les surtensions d'origine interne**, dont la cause réside dans le fonctionnement (correct ou défectueux) de l'un des appareils constituant le réseau (disjoncteur, etc.), qu'on appelle aussi surtensions à front lent (exemple : surtensions de manoeuvre, ayant un temps de crête compris entre 20 et 5000 μs et une durée totale jusqu'à la mi-amplitude de moins de 20 ms).

4.3 Durée des surtensions

La tension de claquage dépend sensiblement de la durée d'application de la contrainte diélectrique et c'est donc aussi sur la durée et l'allure des surtensions que l'on base leur classification. On distingue alors :

➤ **Les surtensions temporaires**

Ces perturbations peuvent avoir des formes alternatives ou oscillatoires dont la durée est limitée au temps de fonctionnement des dispositifs de contrôle et de protection du réseau, elles se présentent soit à la fréquence industrielle, soit à d'autres fréquences plus élevées. Elles apparaissent lors de la modification brusque de la configuration du réseau ou lors d'un défaut à la terre. Les surtensions temporaires, ont une amplitude relativement non élevée ; elles sont de longue durée (quelques secondes) et de basse fréquence. [12]

➤ **Les surtensions transitoires**

Ce sont des surtensions de courte durée, quelques fois oscillantes et généralement fortement amorties ; qui peuvent être superposées ou non à des surtensions temporaires. Les surtensions transitoires se divisent en trois types :

☞ **Les surtensions à front lent**, ou surtensions de manœuvre, qui présentent un temps de crête compris entre 20 et 5000 μ s et une durée totale jusqu'à la mi-amplitude de moins de 20 ms.

☞ **Les surtensions à front rapide**, ou surtensions de foudre, qui présentent un temps de front compris entre 0,1 et 20 μ s, et un temps jusqu'à la mi-amplitude de moins de 300 μ s.

☞ **Les surtensions à front très rapide**, qui présentent un temps de front inférieur à 0,1 μ s et un temps jusqu'à la mi-amplitude de moins de 3 ms. Les paragraphes suivants traitent plus profondément les surtensions de manœuvre et de foudre, en raison de leur importance dans cette étude.

➤ **Les surtensions de manœuvre**

Provoquées par les manœuvres de disjoncteurs (ou sectionneurs) dans le réseau On a ainsi des manœuvre volontaires (enclenchement, déclenchement d'un élément du réseau) ou involontaires (rupture d'un conducteur ou court-circuit).

➤ **Les surtensions de foudre**

Provoquées par la chute d'un coup de foudre sur la ligne ou sur le poste de couplage ou dans leur proximité.

Cette répartition est basée sur les caractéristiques de forme de surtensions qui sont reprises dans le tableau suivant [2.1] :

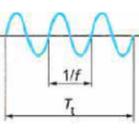
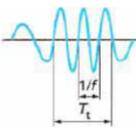
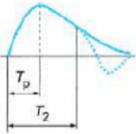
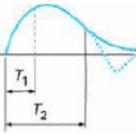
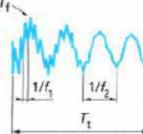
Classe	Basse fréquence		Transitoire		
	Permanente	Temporaire	À front lent	À front rapide	À front très rapide
Forme de tension					
Domaine des formes de tension	$f = 50$ ou 60 Hz $T_t > 1$ h (durée)	$10 < f < 500$ Hz $0,03 < T_t < 3\ 600$ s	$20 < T_p < 5\ 000$ μ s $T_2 \leq 20$ ms	$0,1 < T_1 < 20$ μ s $T_2 < 300$ μ s	$3 < T_t < 100$ ns $0,3 < f_1 < 100$ MHz 30 kHz $< f_2 < 30$ MHz $T_t < 3$ ms (durée)
Forme normalisée de tension	$f = 50$ ou 60 Hz	$48 < f < 62$ Hz	$T_p = 250$ μ s $T_2 = 2\ 500$ μ s	$T_1 = 1,2$ μ s $T_2 = 50$ μ s	aucune
Essai de tenue normalisé	aucun	Essai de courte durée à fréquence industrielle	Essai aux chocs de manœuvre normalisé	Essai aux chocs de foudre normalisé	aucun

Tableau.2.1. Caractéristiques des formes des surtensions. [13]

Les ondes transitoires sont caractérisées par les paramètres suivants :

- Le temps de montée (T_{cr}) en μ s ;
- La pente de montée mesurée en kV/ μ s ou en kA/ μ s ;
- La durée de la surtension (T_h) en μ s correspondant à la descente à mi- amplitude.

Remarque : ou durée jusqu'à la mi- valeur T_2 définie dans la norme CEI 60-1 comme l'intervalle de temps compris entre le point origine réel et l'instant où la tension a déchu pour la première fois jusqu'à la moitié de la valeur de crête de la tension impulsionnelle.

5. Définition de facteur de surtension entre phase et terre

Le facteur de surtension entre phase et terre (K_{st}) est le rapport des valeurs de crête d'une surtension entre phase et la terre de la tension entre phase et terre qui correspond à la tension la plus élevée pour le matériel. On peut définir également un facteur de surtension entre phases.

5.1 Paramètres influençant le facteur de surtension

Le facteur de surtension dépend :

- de la longueur de la ligne,
- du type de terminaison de la ligne (ouverture, fermée sur un transformateur, ou sur une charge quelconque),
- du degré de compensation parallèle,
- la puissance de court-circuit de la source,
- du déphasage (entre courant et tension) aux instants de manœuvre.

5.2 Paramètres influençant la forme des surtensions

En ce qui concerne les formes d'onde, elles dépendent fortement de :

- La longueur de la ligne enclenchée,
- La configuration du réseau d'alimentation (nombre de lignes en parallèles, etc.).

6. Surtensions de manœuvre

On considère comme manœuvre dans un réseau tout ce qui contribue à modifier la topologie de ce réseau. En général, une manœuvre (fermeture, ouverture de disjoncteurs, etc.) effectuée dans un réseau d'énergie modifie l'état du réseau en le faisant passer des conditions existantes avant la manœuvre à celles qui existent après exécution de celle-ci, il en résulte des phénomènes transitoires. La tension à fréquence industrielle peut avoir avant et après la manœuvre, des valeurs différentes par suite de la modification de l'état du réseau. L'amplitude totale de la surtension due à la manœuvre peut être décomposée en deux parties, à savoir une composante transitoire superposée à une composante à fréquence industrielle.

Les surtensions de manœuvres peuvent être assimilées à un choc de manœuvre de forme normalisée (figure 2.2), c'est-à-dire à une onde apériodique dont le front à une durée de l'ordre de quelques centaines de microsecondes. [14]

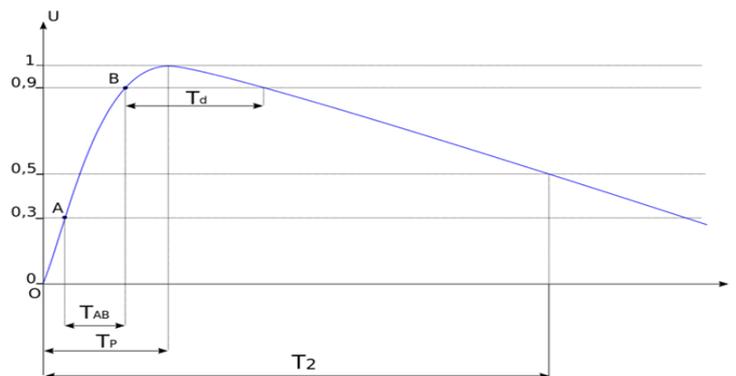


Figure.2.2. Forme normalisée d'un choc de manœuvre.

Elles exercent des contraintes diélectriques sur les différentes parties d'une isolation sensiblement dans la même proportion que les tensions à fréquence industrielle, mais ne sont pas répétitives. En général, on ne prend en considération que la valeur d'une seule crête de l'une ou de l'autre polarité. [15]

Nous citons l'apparition de phénomènes transitoires lors de la fermeture dans les cas suivants :

- L'enclenchement et le réenclenchement de lignes à vide ou terminées par un transformateur à vide,
- La mise sous tension de transformateurs à vide, d'inductances de compensation ou de transformateurs chargés par des inductances,
- La mise sous tension de batteries de condensateurs,
- Le ré-enclenchement sur un défaut permanent,

Ces surtensions dépendent de la nature de la ligne et des éléments dont elle est constituée (par exemple : moyens de compensation), de la puissance de court-circuit de la source, du type de disjoncteur et de l'instant de l'enclenchement. Lors d'un enclenchement, le niveau de surtension à l'extrémité ouverte de la ligne peut avoir des valeurs jusqu'à 2,4 fois supérieures à la tension de service.

6.1 Surtensions de manœuvre dues à l'enclenchement ou au ré-enclenchement (fermeture)

Ce type de surtensions apparaît lors de la mise sous tension d'une ligne ou lors de la remise sous tension de la ligne à la suite d'une ouverture sur défaut. Dans le premier cas les surtensions de manœuvre sont essentiellement dues au phénomène de réflexion d'onde. Dans le deuxième cas, des phénomènes dus aux charges résiduelles de la ligne peuvent amplifier ces phénomènes de réflexion.

6.1.1 Phénomène de base

Lorsqu'une ligne ou un câble de transport d'énergie est mis sous tension par une source de faible impédance interne les réflexions d'un saut de tension appliqué à l'instant initial créent à l'extrémité ouverte une onde de tension rectangulaire. Si le disjoncteur se ferme au moment de la crête de tension alternative de la source, l'amplitude des ondes à l'extrémité ouverte approche le double de l'amplitude de la tension de la source.

La fréquence fondamentale du phénomène est égale à $1/4\tau$, τ étant le temps de parcours de l'onde sur la ligne. Les pertes ont pour effet de diminuer l'amplitude du phénomène de surtension et d'amener la décroissance des amplitudes des oscillations successives.

7. Manœuvres dans les postes aériens THT et HT

7.1 Appareillage de coupure à haute tension

L'appareillage de coupure à haute tension est l'ensemble des appareils électriques qui permettent la mise sous ou hors tension de portions d'un réseau électrique à haute tension. C'est un élément essentiel qui permet d'obtenir la protection et une exploitation sûre et sans interruption d'un réseau à haute tension.

Selon la classification par fonction, ces appareils sont composés de : sectionneurs, interrupteurs, contacteurs, coupe-circuit à fusibles et disjoncteurs. Parmi eux, le disjoncteur est seul capable d'interrompre un courant de court-circuit et donc d'éviter que le matériel connecté sur le réseau soit endommagé. Il est destiné à établir, supporter et interrompre des courants sous sa tension assignée (la tension maximale du réseau électrique qu'il protège). 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).

A l'heure actuelle, le disjoncteur SF₆ est le plus répandu dans les applications industrielles. [16]

Dans leur configuration actuelle, les disjoncteurs peuvent être équipés d'appareils électroniques permettant à tout moment de connaître leur état (usure, pression de gaz pour la coupure, etc.) et éventuellement de détecter des défauts par des dérives de caractéristiques, ce qui permet à l'exploitant de programmer les opérations de maintenance et de prévenir les risques de défaillance. [17-18]

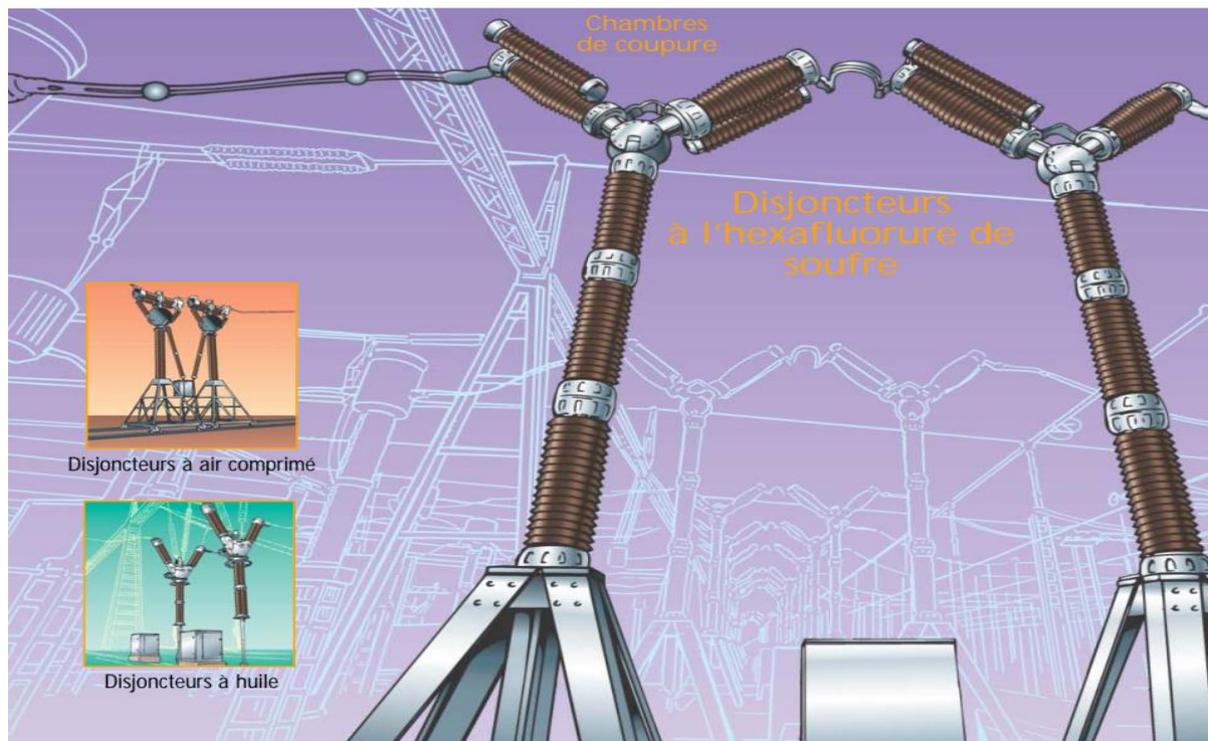


Figure.2.3. Disjoncteur en réseau THT.

Pour couper les courants de charge ou de défaut, les constructeurs ont développé et perfectionné des appareils de coupure, comme les disjoncteurs qui sont notamment utilisés dans divers milieux de coupure : l'air, l'huile, et le SF6. Comme il est montré figure (2.4), un disjoncteur pour assurer sa tâche est généralement composé de :

➤ **Contacts**

Les appareils de coupure sont avant tout des appareils de connexion, qui laissent ou non passer le courant selon que les contacts sont ouverts ou fermés. Ces contacts électriques ont donc un rôle fondamental dans la constitution des appareils et leurs performances, en particulier : leur résistance de contact, résistance à l'érosion, la propension à souder des matériaux.

➤ **Milieu de coupure**

Le choix du milieu de coupure est donc fondamental. Un bon milieu de coupure doit :

- avoir une conductivité thermique importante, en particulier dans la phase d'extinction pour évacuer l'énergie thermique de l'arc ;
- retrouver ses propriétés diélectriques le plus vite possible après la coupure, afin d'éviter un réamorçage intempestif.

➤ **La chambre de coupure**

La chambre de coupure est dimensionnée selon la technique de coupure choisie et principalement définie par la puissance de court-circuit du réseau (en MVA).

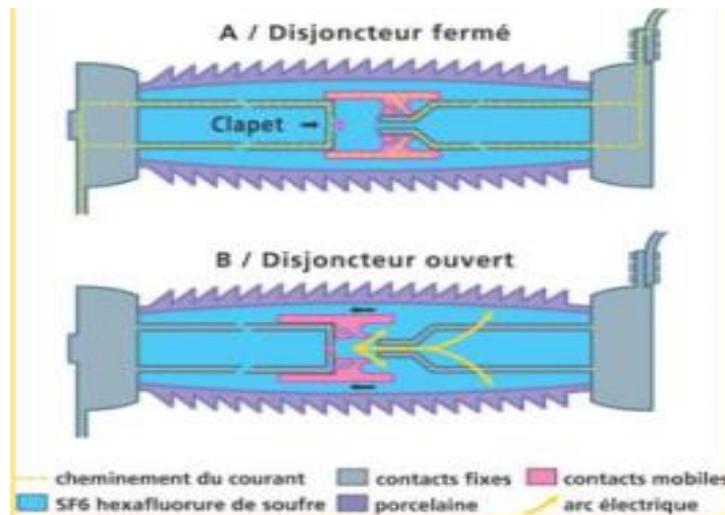


Figure.2.4. fonctionnement de la chambre de coupure d'un disjoncteur.

7.2 Régimes transitoires dus aux manœuvres

Les opérations de manœuvres (ouverture ou fermeture d'un interrupteur) assurent le bon fonctionnement et la sécurité du réseau électrique. Ces manœuvres permettent soit la coupure d'un défaut (ouverture d'un disjoncteur) ou l'enclenchement (mise en service) ou le ré-enclenchement d'une ligne. Lors d'une opération de manœuvre (fermeture ou ouverture d'un disjoncteur ou d'un sectionneur), des surtensions et surintensités transitoires à haute fréquence apparaissent dans les circuits, principalement les jeux de barres, haute tension des postes.

7.2.1 Cas général

En général, lorsque le courant dans le cercle est coupé avant son passage normal à zéro, ou lorsqu'une connexion « brutale » est créée entre deux circuits électriques à potentiel différent, les soi-disant perturbations sont créées. [13]

Dans le premier cas, l'adjectif 'brutale' indique que le temps d'établissement d'une connexion à faible impédance est petit devant la plus petite constante de temps des circuits. On peut, très simplement, représenter le phénomène à l'aide du schéma équivalent donné à la (figure.2.5). En réalité, pour le calcul rigoureux du régime transitoire on doit recourir à la théorie des lignes de transmission et à une représentation modale dans le cas des systèmes multiconducteurs. [19]

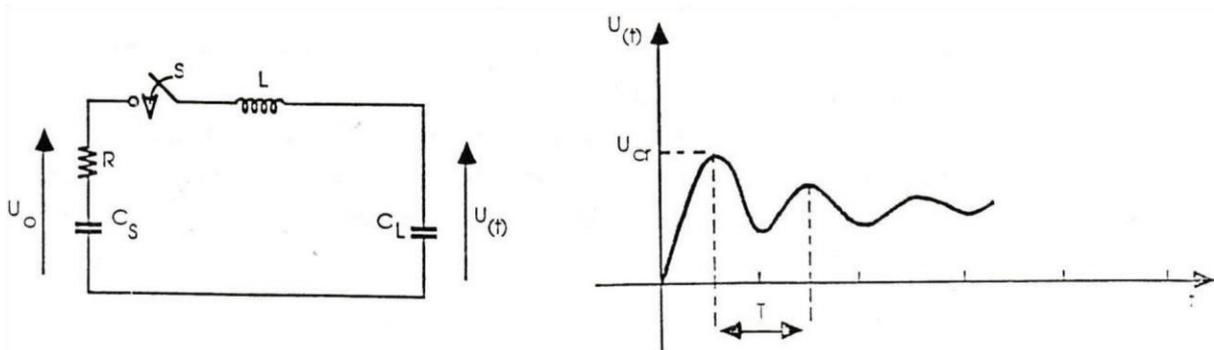


Figure.2.5. Production de transitoires à haute fréquence ; schéma simplifié.

La modification brusque de la structure d'un réseau électrique provoque l'apparition de phénomènes transitoires. Ceux-ci se traduisent souvent par la naissance d'une onde de surtension ou d'un train d'ondes haute fréquence de type apériodique ou oscillatoire à amortissement rapide.

7.2.2 manœuvre de sectionneur

Prenons le cas d'un sectionneur d'aiguillage, utilisé pour la mise sous tension ou hors tension du tronçon de jeu de barres situé entre le sectionneur et le disjoncteur.

➤ Fermeture du sectionneur

Lorsque le sectionneur est ouvert, la tension entre ces bornes est à peu près égale à la tension simple du réseau. Lors de la fermeture, lorsque la distance entre les mâchoires est suffisamment faible, un arc s'établit entre elles. Les deux conducteurs de part et d'autre du sectionneur sont mis brusquement au même potentiel. Un régime transitoire d'oscillations, lié aux différents circuits HT du poste (inductances, capacités...), s'établit alors. Cette oscillation s'amortit, et s'éteint. Ce premier amorçage a lieu à la tension simple crête du réseau, car la durée de la manœuvre est très grande devant la période de la tension du réseau. Par ailleurs, la durée de l'oscillation (10 à 100 μ s) étant faible devant même cette période, le tronçon mis sous tension reste chargé à un potentiel sensiblement égal à la tension simple crête du réseau. Quelques millisecondes plus tard, la distance entre les mâchoires a encore diminué, et l'écart de tension entre les deux pôles redevient suffisant pour qu'un arc s'établisse à nouveau. Le potentiel du tronçon mis sous tension prend une nouvelle valeur. Le phénomène se reproduit une nouvelle fois, puis à une cadence de plus élevée jusqu'à fermeture complète du sectionneur [20]. La figure 2.6 présente le schéma électrique relatif à cet exemple (pour une phase).

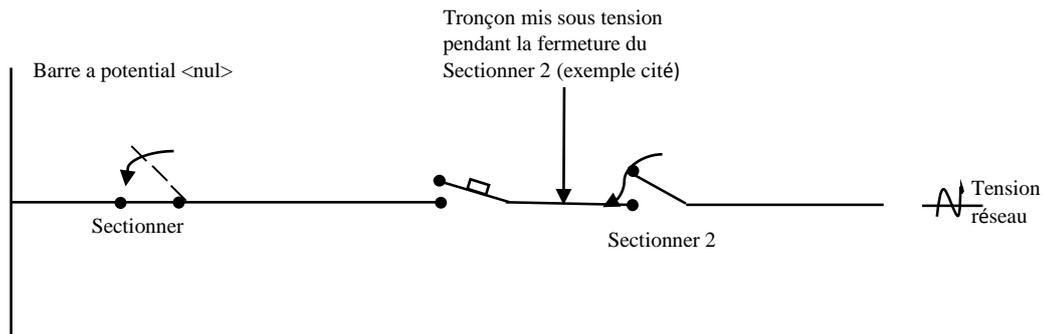


Figure.2.6. Mise sous tension d'un tronçon de barre.

Ordre des manœuvres :

- a) **fermeture sectionneur 1** (pas d'arc, car avant fermeture, potentiel « nul » de part et d'autre).
- b) **fermeture sectionneur 2** : objet de l'exemple (présence d'arc, car avant fermeture, potentiel « nul » coté tronçon, tension réseau de l'autre coté).
- c) **fermeture disjoncteur** Les manœuvres a) et b) peuvent être inversés.

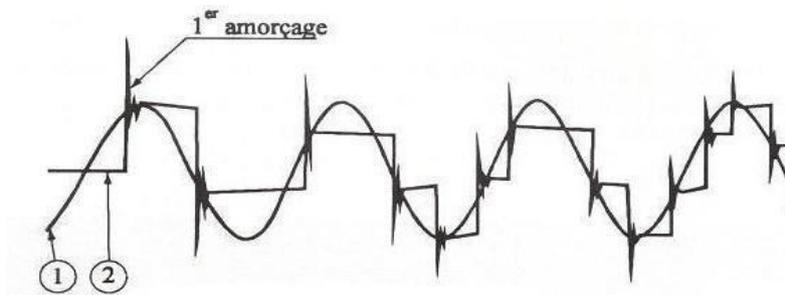


Figure.2.7. Tension transitoire lors d'une fermeture.

La figure 2.7 présente, lors de la fermeture du sectionneur 2 de la figure 2.6, les tensions suivantes :

1. La tension de la barre reliée au réseau (tension réseau).
2. La tension du tronçon de jeu de barres, lors de sa mise sous tension, pendant la fermeture du sectionneur.

➤ Ouverture du sectionneur

Les phénomènes sont les mêmes que lors de la fermeture, mais se produisent en ordre inverse. La cadence à laquelle ont lieu les amorçages est élevée au début, lorsque les mâchoires sont de faible distance l'une de l'autre, puis diminue au fur et à mesure que les mâchoires

s'écartent. Le dernier amorçage se produit à une différence de potentiel entre les deux barres qui est le maximum possible : le double de la tension simple du réseau. La forme des oscillations (pseudo-fréquence) dépend des caractéristiques électriques des circuits haute tension du poste (dimensions et configuration, qui déterminent les inductances et les capacités). Elle est en particulier indépendante du type de manœuvre (ouverture ou fermeture). La pseudo-fréquence peut être comprise entre 100 KHz et 1 MHz.

Par contre l'amplitude des oscillations dépend de la différence de potentiel entre les barres au moment de l'amorçage. Ainsi, les oscillations présentent une amplitude plus élevée lors de l'ouverture (fin de l'ouverture) que lors de la fermeture. L'amortissement de l'oscillation dépend en particulier des caractéristiques de l'arc.

Signalons enfin que ce qui est vrai pour une phase est vrai pour trois phases, et que la manœuvre est simultanée sur les trois phases et similaire à la manœuvre sur une phase. En effet, les oscillations étant très brèves, et les tensions des trois phases étant décalées d'un tiers de période de la tension réseau, la probabilité pour que deux amorçages sur deux phases différentes se produisent simultanément est pratiquement nulle.

7.2.3 Manœuvre de disjoncteur

La manœuvre d'un disjoncteur se différencie de celle d'un sectionneur par le fait qu'elle est beaucoup plus rapide. Le nombre d'amorçage est donc réduit. Les phénomènes de surtensions transitoires sont par ailleurs les mêmes.

➤ Fermeture de disjoncteur

Le nombre d'amorçages est faible, souvent il n'y en a qu'un seul (pré amorçage). L'amplitude des oscillations dépend de l'instant, dans la période de la tension réseau, auquel le disjoncteur est fermé. Elle est maximale lorsque la fermeture a lieu au maximum de la tension réseau.

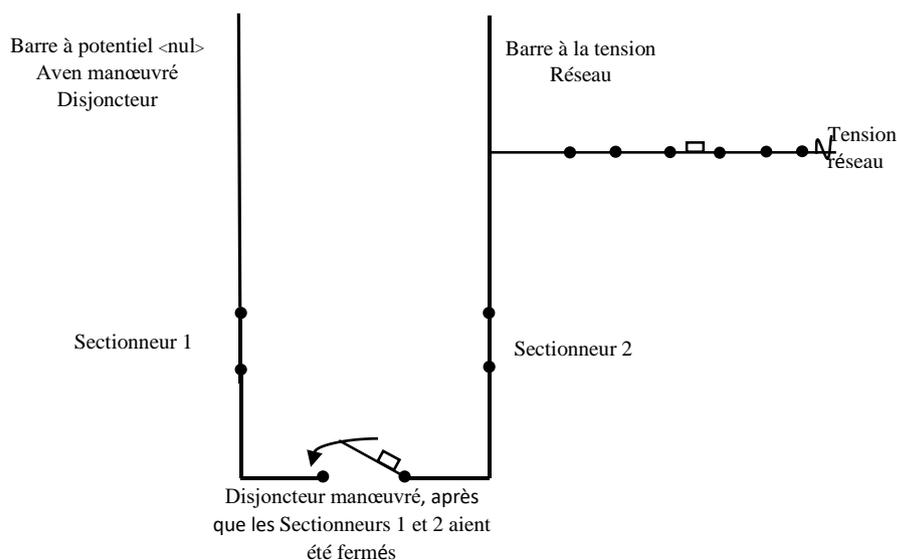


Figure.2.8. Fermeture d'un disjoncteur dans le cas du couplage de deux barres.

Signalons enfin que ce qui est vrai pour une phase est vrai pour trois phases, et que la manœuvre est simultanée sur les trois phases et similaire à la manœuvre sur une phase. En effet, les oscillations étant très brèves, et les tensions des trois phases étant décalées d'un tiers de période de la tension réseau, la probabilité pour que deux amorçages sur deux phases différentes se produisent simultanément est pratiquement nulle.

➤ Ouverture de disjoncteur

Si le disjoncteur ne réamorçait pas, aucun phénomène transitoire à haute fréquence ne se produit. Si le disjoncteur exceptionnellement, réamorçait, on a ce type de phénomène, mais la présence de résistances auxiliaires de déclenchement conduit à un amortissement très important du phénomène transitoire. Pour ces raisons, dans le cas des disjoncteurs, les amplitudes maximales d'oscillations prennent naissance lors de la fermeture.

8. Surtensions et coordination de l'isolement

8.1 Propagation des surtensions

Quelle que soit l'origine d'une surtension, celle-ci va se propager le long de la ligne ou du câble constituant le réseau. Ce support de propagation peut être modélisé en faisant intervenir les valeurs par unité de longueur de l'inductance et de la résistance en longitudinal, et de la capacité et de la conductance en transversal, Aux fréquences élevées généralement associées aux surtensions, les termes inductifs et capacitifs deviennent prépondérants. Les

termes résistifs et conductifs correspondent à des pertes entraînant l'atténuation de l'onde au cours de sa propagation. Ces surtensions peuvent conduire à :

- des interruptions courtes (réenclenchements automatiques sur les réseaux de distribution publique MT par lignes aériennes),
- des interruptions longues (intervention pour changement d'isolants détruits, voire remplacement de matériel).

8.2 Définition de la coordination de l'isolement

Le rôle de la coordination de l'isolement est de déterminer les caractéristiques d'isolement nécessaires et suffisantes des différents composants du réseau pour obtenir une résistance uniforme aux tensions normales ainsi qu'aux surtensions provenant de diverses sources. Le but ultime est la distribution sûre et optimale de l'énergie électrique. Par l'optimisation, il faut comprendre la recherche de la meilleure relation économique entre différents paramètres en fonction de cette coordination [21] :

- coût de l'isolement,
- coût des protections,
- coût des défaillances (perte d'exploitation et réparation) compte-tenu de leurs probabilités.

8.3 Importance de la coordination de l'isolement

La coordination de l'isolement est une discipline qui permet de réaliser le meilleur compromis technico-économique dans la protection des personnes et des matériels contre les surtensions pouvant apparaître sur les installations électriques, que ces surtensions aient pour origine le réseau ou la foudre.

Elle participe à l'obtention d'une grande disponibilité de l'énergie électrique. Elle est d'autant plus utile qu'elle concerne des réseaux de tensions élevées. Pour maîtriser la coordination de l'isolement il est nécessaire :

- de connaître le niveau des surtensions pouvant exister sur le réseau,
- d'utiliser les bonnes protections quand cela est nécessaire,
- de choisir le niveau de tenue aux surtensions des divers composants du réseau, parmi les tensions d'isolement permettant de satisfaire les contraintes déterminées.

Conclusion

Les éléments présentés dans ce deuxième chapitre montrent que la gestion en temps réel du réseau de transport d'énergie pour garantir une énergie de qualité (amplitude et fréquence de la tension dans les plages admissibles, et sans interruption de service) n'est pas une tâche aisée. L'enclenchement ou le ré-enclenchement d'une ligne de transport d'énergie est à l'origine de surtensions transitoires, d'où la nécessité de la coordination des isolements pour éviter d'altérer les équipements du réseau et la rupture de service.

Dans ce travail de projet de fin d'études de master, notre objectif est de modéliser (quantifier par calcul mathématique) les surtensions transitoires d'enclenchement. Nous exposerons notre méthodologie dans le chapitre qui va suivre.

CHAPITRE III

***Modélisation des régimes
transitoires de manœuvres
dans un poste électrique***

1. Introduction

Le régime transitoire apparaît dans les postes de transformation aériens et blindés. Les manœuvres de fermeture et ouverture des disjoncteurs créent des ondes mobiles de surtensions transitoires très rapides à l'intérieur des postes. Pour dépasser cette difficulté, plusieurs types de modélisations proposés en régime transitoire.

Dans ce troisième chapitre, après un bref rappel sur la configuration générale du poste aérien, nous détaillons le calcul des paramètres linéiques des jeux de barres qui est son élément constitutif fondamental et qui sera représenté comme une ligne en régime transitoire.

Aussi, Nous présentons dans ce chapitre différentes méthodes analytiques pour la quantification par calcul des régimes transitoire suite à une manœuvre.

2. Configuration d'un poste électrique aérien

Les nœuds du réseau de transmission sont représentés dans les sous-stations les fonctions du réseau fonctionnent grâce aux lignes aériennes, aux lignes terrestres et aux transformateurs de puissance, qui forment un réseau interconnecté.

Ces stations effectuent les actions suivantes :

- l'aiguillage des lignes de même tension entre elles ;
- l'évacuation de l'énergie des sources de production vers le réseau ;
- la liaison entre des réseaux de tensions différentes.

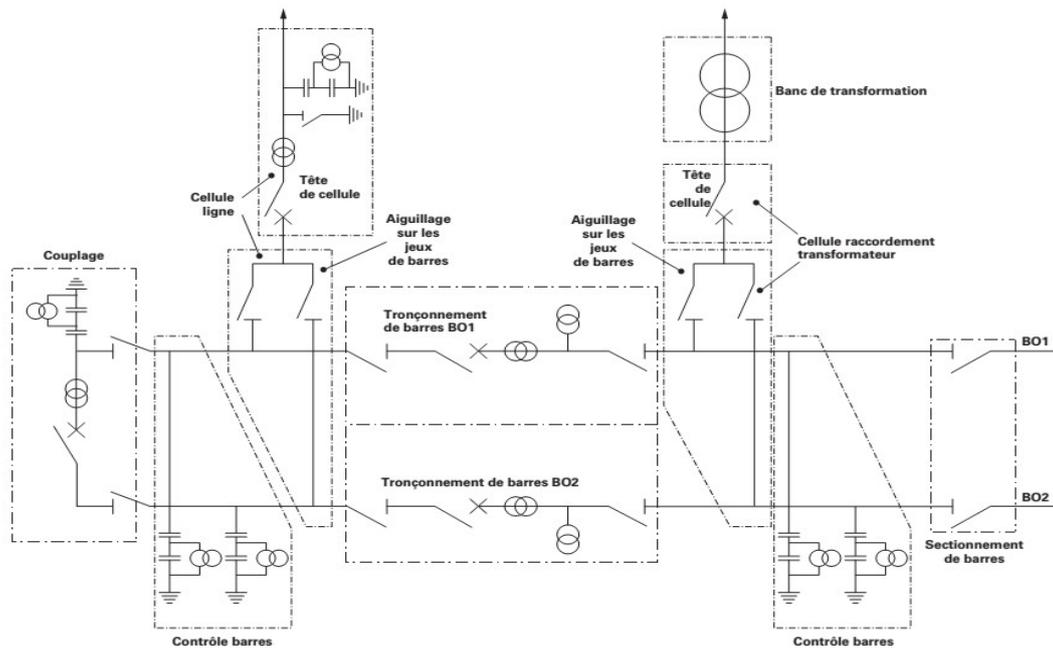


Figure.3.1. Désignation des principales travées des postes.

Les sous-stations forment des arrangements de conducteurs qui relient entre eux des panneaux de même tension de fonctionnement, et les actions ci-dessus sont assurées par l'appareillage haute tension qui permet :

- de contrôler les grandeurs électriques (tension et courant) ;
- d'établir ou d'interrompre le passage du courant, grâce aux disjoncteurs ;
- d'assurer la continuité ou l'isolement d'un circuit, grâce aux sectionneurs ;
- de modifier la tension de l'énergie électrique, grâce aux transformateurs de puissance.

En raison de l'importance des sous-stations dans l'organisation du réseau, leur défaillance peut rendre de nombreuses lignes inutilisables.

Le schéma le plus général d'un poste comprend donc les éléments en figure 3.1.

- les jeux de barres qui assurent la matérialité du nœud électrique ;
- les disjoncteurs qui jouent un rôle de coupure et de protection des ouvrages ;
- les sectionneurs qui ont un rôle d'isolement ou d'aiguillage ;
- les transformateurs de mesure qui sont destinés à l'alimentation des appareils de mesure nécessaires à la conduite du réseau, à l'alimentation des protections et des automatismes de reprise du service.

➤ **Jeux de barres**

Les jeux de barres sont des agencements de conducteurs qui relient les panneaux de la même tension de fonctionnement les uns aux autres. Les jeux de barres doivent pouvoir supporter des courants élevés. Par conséquent, les résistances de transition à toutes les connexions sont critiques. Ceux-ci doivent être aussi petits que possible. En cas de défaut, une résistance mécanique élevée est requise en raison de la force électromagnétique. Le jeu de barres est alimenté via le panneau de départ. L'énergie électrique est distribuée aux consommateurs via les panneaux de départ.

Comme les signaux électriques se propagent dans l'état transitoire, les rails sont simulés comme des lignes de transmission avec des paramètres linéaires. Dans le paragraphe suivant, nous décrivons la méthodologie analytique qui nous permet de calculer les paramètres linéaires des jeux de barres de longueur finie.

3. Calcul des paramètres linéiques du jeu de barres

3.1 Les paramètres linéiques longitudinaux

Les dimensions de la couche traversée par le courant ne sont pas bien définies, il est donc difficile d'entrer la conductivité de la terre dans les calculs, que la répartition du courant dans cette couche n'est pas uniforme et que la résistivité du sol est irrégulière dans l'espace et variable au cours du temps [22]. On doit aussi s'attendre à trouver toutes sortes de canalisations enterrées (eau, gaz, câbles, etc.), particulièrement au voisinage des tracés de lignes électriques. La résistivité du sol peut ainsi varier suivant l'endroit et les conditions météorologiques.

L'influence de la distribution du courant dans le sol sur la valeur de l'impédance linéique d'une ligne a été traitée par plusieurs auteurs [23-24].

3.1.1 Lignes infinies parallèles au sol

Trois méthodes de détermination des paramètres linéaires longitudinaux d'une ligne de transport d'énergie dans lesquelles les hypothèses de base (homogénéité de la ligne, conservation du courant, prise en compte ou non de la résistance finie du plan de masse) sont prises en compte :

- Théorie des images (applicable quand la ligne se trouve au-dessus d'un plan parfaitement conducteur) [23] ;

- Théorie de Carson (applicable pour tout plan de masse) ; [24]
- Théorie des plans complexes fictifs (théorie de Carry, applicable pour des sols conducteurs mais nécessairement homogènes) [25]

Dans le spectre usuel de fonctionnement du réseau de transport d'énergie (qq. Hz à 10 MHz), on peut montrer [26] que la méthode du plan fictif conduit à des résultats identiques à ceux qu'on obtient avec la méthode de Carson, qui est plus exacte pour des fréquences bien plus élevées.

Dans notre travail les paramètres linéiques longitudinaux sont déterminés à partir de la méthode du plan complexe fictif.

3.1.1.1 Théorie du plan complexe fictif (Carry)

La méthode du plan fictif, inspirée de l'optique géométrique avec les images virtuelles, consiste à introduire une profondeur de pénétration fictive dans le sol, complexe p telle que l'image de chaque phase dans le sol soit située à une profondeur égale à la somme de la hauteur de la phase en question et deux fois l'épaisseur de peau dans le sol. Cette hypothèse provient de l'idée que l'apparition de l'effet de peau dans le sol dû au champ magnétique variable en fonction du temps provoque le déplacement du miroir du plan de masse au plan fictif (figure.3.2).

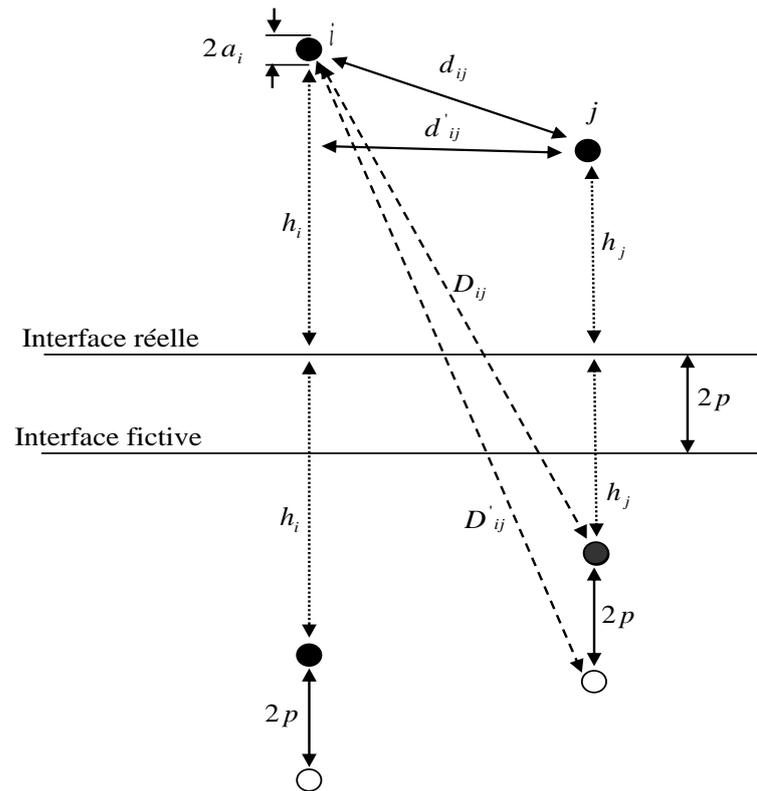


Figure.3.2. Configuration géométrique pour la méthode du plan fictif.

Les expressions donnant les impédances linéiques propres et mutuelles sont comme suit :

$$\underline{Z}_{ii} = R_{ii} + j \frac{\omega \mu_0}{2\pi} \ln \left(\frac{2(h_i + p)}{a_i} \right) \quad (3.1)$$

$$\underline{Z}_{ij} = j \frac{\omega \mu_0}{2\pi} \ln \left(\frac{D'_{ij}}{d_{ij}} \right) \quad (3.2)$$

Avec :

$$p = \sqrt{\frac{2}{j\sigma_{\text{sol}}\mu\omega}} \quad \text{Épaisseur de peau complexe.} \quad (3.3)$$

σ_{sol} : La conductivité de sol,

$\mu = \mu_0 \cdot \mu_r$: La perméabilité absolue du conducteur,

μ_0 : La perméabilité du vide,

μ_r : La perméabilité relative du conducteur,

ω : La pulsation en rad/s.

Les parties réelles donnent les résistances linéiques propres et mutuelles, les parties imaginaires donnent les réactances linéiques propres et mutuelles.

3.1.2 Lignes de longueurs finies et parallèles au sol

Le conducteur doit être horizontal au-dessus du niveau du sol si sa longueur est limitée, le calcul des paramètres longitudinaux est réalisé en utilisant l'intégral de Neumann [27] et la méthode du plan fictif [25] figure.3.3.

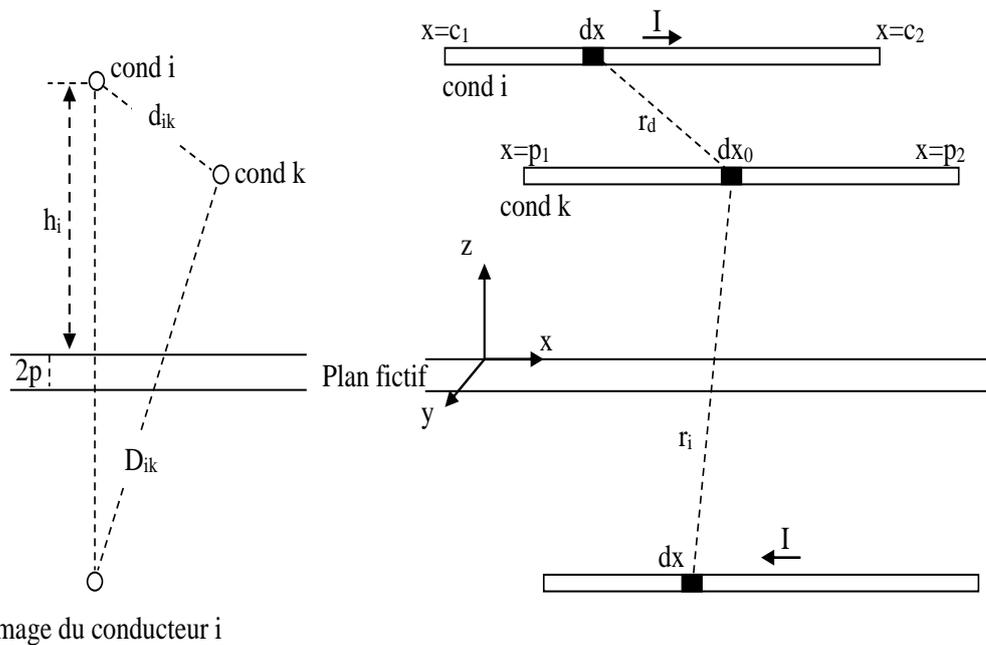


Figure.3.3. Couplage entre deux conducteurs parallèles.

On

suppose que le rayon des conducteurs est très petit et que le courant I parcourant le conducteur i est constant. La tension induite dans le conducteur k due au courant I du conducteur i et son image est calculée à l'aide de l'intégrale de Neumann qui consiste en la prise en compte de la somme des potentiels induits dans chaque dipôle dx du conducteur :

$$V_{ik} = j \frac{\omega \mu_0 I}{4\pi} \int_{p_1}^{p_2} dx_0 \int_{c_1}^{c_2} \left(\frac{1}{r_d} - \frac{1}{r_i} \right) dx \quad (3.4)$$

Avec :

$$r_d = \sqrt{(x - x_0)^2 + d_{ik}^2} \quad \text{et} \quad r_i = \sqrt{(x - x_0)^2 + D_{ik}^2} \quad (3.5)$$

Après quelques manipulations mathématiques, l'impédance mutuelle entre le conducteur i et le conducteur k s'écrit [26] :

$$\begin{aligned}
Z_{ik} = & j \frac{w\mu_0}{4\pi} \left(\left\{ -(x-x_0) \ln \left[(x-x_0) + \sqrt{(x-x_0)^2 + d_{ik}^2} \right] + \sqrt{(x-x_0)^2 + d_{ik}^2} \right\}_{x=c_1}^{x=c_2} \right)_{x_0=p_1}^{x_0=p_2} \\
& + j \frac{w\mu_0}{4\pi} \left(\left\{ -(x-x_0) \ln \left[(x-x_0) + \sqrt{(x-x_0)^2 + D_{ik}^2} \right] + \sqrt{(x-x_0)^2 + D_{ik}^2} \right\}_{x=c_1}^{x=c_2} \right)_{x_0=p_1}^{x_0=p_2}
\end{aligned} \quad (3.6)$$

L'impédance propre du conducteur i s'obtient en remplaçant d_{ik} et D_{ik} de l'équation (3.9) par r (rayon du conducteur) et, d ($d=2(h_i+p)$) ; on trouvera donc l'expression de Z_{ii} .

$$\begin{aligned}
Z_{ii} = & j \frac{w\mu_0}{4\pi} \left(\left\{ -(x-x_0) \ln \left[(x-x_0) + \sqrt{(x-x_0)^2 + r^2} \right] + \sqrt{(x-x_0)^2 + r^2} \right\}_{x=c_1}^{x=c_2} \right)_{x_0=p_1}^{x_0=p_2} \\
& + j \frac{w\mu_0}{4\pi} \left(\left\{ -(x-x_0) \ln \left[(x-x_0) + \sqrt{(x-x_0)^2 + d^2} \right] + \sqrt{(x-x_0)^2 + d^2} \right\}_{x=c_1}^{x=c_2} \right)_{x_0=p_1}^{x_0=p_2}
\end{aligned} \quad (3.7)$$

3.1.3 Lignes parallèles et de même longueur

Soit deux lignes de longueurs finies L situés au-dessus d'un plan de masse de conductivité finie σ .

Les coefficients des matrices impédances linéiques sont calculés en substituant les conditions additionnelles, $c_1=p_1=0$ et $c_2=p_2=L$, dans les équations (3.6) et (3.7), donc on obtient :

$$Z_{ii} = j \frac{w\mu_0}{2\pi} \left[\ln \left(\frac{L+A}{L+B} \frac{2(h_i+p)}{r_i} \right) + \frac{B-A+r_i-2(h_i+p)}{L} \right] \quad (3.8)$$

$$Z_{ik} = j \frac{w\mu_0}{2\pi} \left[\ln \left(\frac{D_{ik}}{d_{ik}} \frac{L+\sqrt{L^2+d_{ik}^2}}{L+\sqrt{L^2+D_{ik}^2}} \right) + \frac{d_{ik}-D_{ik}-\sqrt{L^2+d_{ik}^2}+L+\sqrt{L^2+D_{ik}^2}}{L} \right] \quad (3.9)$$

Avec :

$$A = \sqrt{L^2 + r_i^2} \quad B = \sqrt{L^2 + 4(h_i + p)^2} \quad (3.10)$$

3.1.4 Deux lignes parallèles de longueur différentes

Soit deux lignes parallèles de longueurs finies respectivement L et L' , figures 3.4. Les deux lignes sont situées au-dessus d'un plan de masse de conductivité finie σ . Les coefficients des matrices impédances sont données à partir des équations (3.6) et (3.7)

$$Z_{ii} = j \frac{w\mu_0}{2\pi} [-L_1 \ln\left(\frac{L_1 + A_1}{L_1 + B_1}\right) + L_2 \ln\left(\frac{L_2 + A_2}{L_2 + B_2}\right) + L_3 \ln\left(\frac{L_3 + A_3}{L_3 + B_3}\right) - L_4 \ln\left(\frac{L_4 + A_4}{L_4 + B_4}\right) + A_1 - A_2 - A_3 + A_4 - B_1 + B_2 + B_3 - B_4] \quad (3.11)$$

Avec :

$$L_1 = c_2 - p_2 \quad L_2 = c_1 - p_2 \quad L_3 = c_2 - p_1 \quad L_4 = c_1 - p_1 \quad (3.12)$$

$$A_1 = \sqrt{L_1^2 + r_i^2} \quad A_2 = \sqrt{L_2^2 + r_i^2} \quad A_3 = \sqrt{L_3^2 + r_i^2} \quad A_4 = \sqrt{L_4^2 + r_i^2} \quad (3.13)$$

$$B_1 = \sqrt{L_1^2 + 4(h_i + P)^2} \quad B_2 = \sqrt{L_2^2 + 4(h_i + P)^2} \quad (3.14)$$

$$B_3 = \sqrt{L_3^2 + 4(h_i + P)^2} \quad B_4 = \sqrt{L_4^2 + 4(h_i + P)^2}$$

$$Z_{ik} = j \frac{w\mu_0}{2\pi} [-L_1 \ln\left(\frac{L_1 + E_1}{L_1 + F_1}\right) + L_2 \ln\left(\frac{L_2 + E_2}{L_2 + F_2}\right) + L_3 \ln\left(\frac{L_3 + E_3}{L_3 + F_3}\right) - L_4 \ln\left(\frac{L_4 + E_4}{L_4 + F_4}\right) + E_1 - E_2 - E_3 + E_4 - F_1 + F_2 + F_3 - F_4] \quad (3.15)$$

$$E_1 = \sqrt{L_1^2 + d_{ik}^2} \quad E_2 = \sqrt{L_2^2 + d_{ik}^2} \quad E_3 = \sqrt{L_3^2 + d_{ik}^2} \quad E_4 = \sqrt{L_4^2 + d_{ik}^2} \quad (3.16)$$

$$F_1 = \sqrt{L_1^2 + D_{ik}^2} \quad F_2 = \sqrt{L_2^2 + D_{ik}^2} \quad F_3 = \sqrt{L_3^2 + D_{ik}^2} \quad F_4 = \sqrt{L_4^2 + D_{ik}^2} \quad (3.17)$$

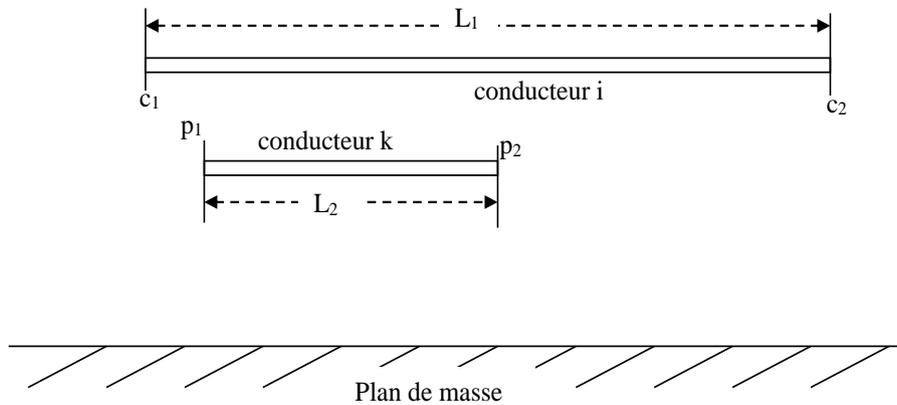


Figure.3.4. couplage entre deux conducteurs parallèles de longueurs différentes.

3.2 Paramètres linéiques transversaux

Les phénomènes capacitifs liant les charges superficielles au champ électrique transversal, donc aux tensions, sont représentés par des capacités linéiques de différents types.

Le calcul des capacités linéiques propre et mutuel passe par le calcul de la matrice des coefficients de potentiel $[P]$; l'inversion de cette dernière nous permet d'obtenir la matrice nodale $[C]$ des capacités linéiques. Les coefficients de potentiel peuvent être calculés à l'aide de la théorie des images électrique [23]. On a :

$$P = \begin{bmatrix} p_{11} & p_{12} & \cdots & p_{1n} \\ p_{21} & p_{22} & \cdots & p_{2n} \\ \cdots & \cdots & \cdots & \cdots \\ p_{n1} & p_{n2} & \cdots & p_{nn} \end{bmatrix} \quad (3.18)$$

3.2.1 Lignes infinies parallèles au sol

Dans ce cas les coefficients de potentiels sont simplement calculés en utilisant la méthode des images électrique [23].

$$P_{ii} = \frac{1}{2\pi\epsilon_0} \ln\left(\frac{2h_i}{a_i}\right) \quad (3.19)$$

$$P_{ij} = \frac{1}{2\pi\epsilon_0} \ln\left(\frac{D_{ij}}{d_{ij}}\right) \quad (3.20)$$

D'où :

$$[C] = [P]^{-1} \quad (3.21)$$

ϵ_0 : La permittivité du vide.

3.2.2 Lignes de longueurs finies et parallèles au sol

Afin de déterminer les coefficients de potentiel propre et mutuel des lignes finies parallèles au sol, on commence par calculer le potentiel en un point quelconque P de l'espace dû à une ligne contenant des charges uniformes, figure.3.5.

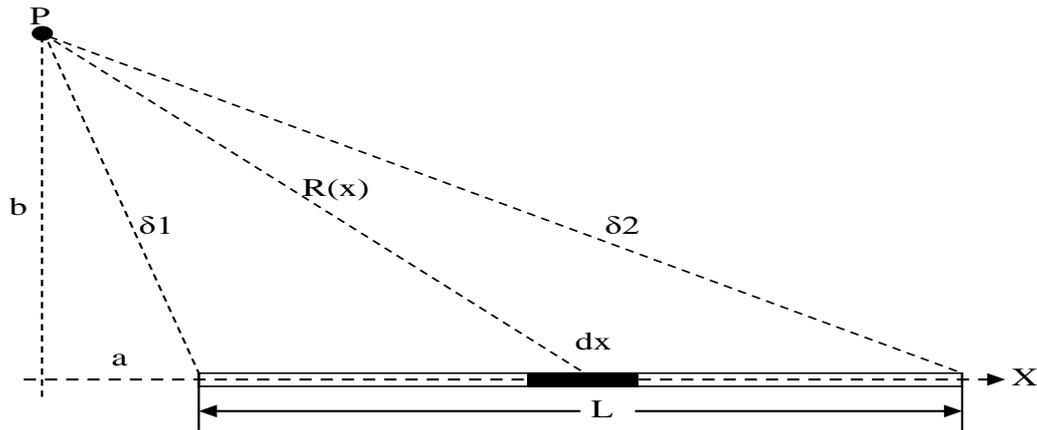


Figure.3.5. Calcul de potentiel du point P d'une ligne chargée.

Le potentiel V_p au point P s'exprime par :

$$V_p = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \int_a^{a+L} \frac{Q}{R(x)} dx = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \int_a^{a+L} \frac{Q}{\sqrt{b^2 + x^2}} dx \quad (3.22)$$

Où Q est la densité de charge et L est la longueur de la ligne. On peut intégrer l'équation (3.22) et on obtient :

$$V_p = \frac{Q}{4\pi\epsilon_0} \ln \left[\frac{a+L+\delta_2}{a+\delta_1} \right] \quad (3.23)$$

Considérons la relation suivante :

$$\frac{a+L+\delta_2}{a+\delta_1} = \frac{\delta_1+\delta_2+L}{\delta_1+\delta_2-L} \quad (3.24)$$

On a donc :

$$V_p = \frac{Q}{4\pi\epsilon_0} \ln \left[\frac{\delta_1+\delta_2+L}{\delta_1+\delta_2-L} \right] \quad (3.25)$$

Si l'on tient compte du sol (conducteur de retour), le potentiel électrique au point P s'écrit :

$$V_p = \frac{Q}{4\pi\epsilon_0} \ln \left[\frac{\delta_1+\delta_2+L}{\delta_1+\delta_2-L} \frac{\delta_1'+\delta_2'-L}{\delta_1'+\delta_2'+L} \right] \quad (3.26)$$

Où δ_1' et δ_2' sont les distances entre le point P et les deux extrémités de l'image de la ligne. Selon le concept de coefficient de potentiel, les coefficients pour les conducteurs i et k sont :

$$(\delta_1 = \delta_2 \text{ Et } \delta_1' = \delta_2')$$

$$P_{ik} = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \ln \left[\frac{\delta_1^2 - \left(\frac{L}{2}\right)^2 \left(\delta_1 + \frac{L}{2}\right)^2}{\delta_1^2 - \left(\frac{L}{2}\right)^2 \left(\delta_1 - \frac{L}{2}\right)^2} \right] \quad (3.27)$$

Où :

δ_1 et δ_1' sont respectivement la distance entre le milieu de la ligne i et les extrémités de la ligne k et celle entre le milieu de la ligne i et les deux extrémités de l'image k, après certaines manipulations algébriques, on obtient :

$$P_{ii} = \frac{1}{2\pi\epsilon_0} \ln \left[\frac{2h_i \left(\delta_1 + \frac{L}{2}\right)^2}{r_i \left(\delta_1' + \frac{L}{2}\right)} \right] = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \ln \left[\frac{2h_i L + \sqrt{L^2 + r_i^2}}{r_i L + \sqrt{L^2 + h_i^2}} \right] \quad (3.28)$$

$$P_{ik} = \frac{1}{2\pi\epsilon_0} \ln \left[\frac{D_{ik} \left(\delta_1 + \frac{L}{2}\right)^2}{d_{ik} \left(\delta_1' + \frac{L}{2}\right)} \right] = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \ln \left[\frac{D_{ik} L + \sqrt{L^2 + d_{ik}^2}}{d_{ik} L + \sqrt{L^2 + D_{ik}^2}} \right] \quad (3.29)$$

Où :

L : est la longueur de la ligne.

Nous constatons que les expressions (3.19) et (3. 20) sont des limite de convergence du (3.28) et (3.29) quand L tend vers ∞

4. Calcul du courant transitoire

4.1 Transitoires de la ligne de transport électrique

Les surtensions transitoires qui se produisent sur un système d'alimentation sont soit d'origine externe (par exemple, une décharge de foudre) ou générée en interne par les opérations de commutation. En général, les transitoires sur les systèmes de transmission sont causés par un changement soudain de l'état de fonctionnement ou de la configuration des systèmes. La foudre est toujours un danger important pour l'équipement du système d'alimentation, mais les opérations de commutation peuvent également endommager l'équipement. Pour des tensions allant jusqu'à environ 230 kV, le niveau d'isolation des lignes et de l'équipement est dicté par la nécessité de se protéger contre le foudroyage.

Sur les systèmes où les tensions sont supérieures à 230 kV mais inférieures à 700 kV, les opérations de commutation aussi bien que la foudre peuvent endommager l'isolation. Aux tensions supérieures à 700 kV, les surtensions de commutation sont le principal déterminant du niveau d'isolation.

Bien sûr, les câbles souterrains sont immunisés contre les coups de foudre directs et peuvent être protégés contre les transitoires provenant des lignes aériennes. Toutefois, pour des raisons économiques et techniques, les lignes aériennes aux niveaux de tension de transport prévalent, sauf dans des circonstances inhabituelles et pour de courtes distances sous une rivière.

Dans la plupart des cas, les lignes aériennes peuvent être tracées à partir de coups de foudre directs par un ou plusieurs fils à potentiel de terre tendus au-dessus des conducteurs de lignes électriques. Ces fils de protection, appelés fils de garde, ou fils de protection, sont reliés à la terre par les tours de transmission soutenant la ligne. La zone de protection est généralement considérée comme étant de chaque côté de la verticale sous un fil de garde, c'est-à-dire que les trois lignes électriques se divisent en six secteur. Dans la plupart des cas, ce sont les fils de garde qui sont touchés plus que les lignes électriques.

Les coups de foudre tombent soit sur les fils de garde, soit sur les conducteurs de puissance, provoquant une injection de courant, qui se divise avec la moitié du courant circulant en une cote et la moitié dans l'autre. L'amplitude du courant le long du conducteur varie considérablement en raison de la variation de l'intensité des coups de foudre et les paramètres linéiques de la ligne.

Les dommages causés à l'équipement aux bornes de la ligne, dans le cas où une ligne électrique reçoit un coup de foudre directe, sont dus par les variations des tensions entre la ligne et le sol résultant des courants injectées qui se déplacent le long de la ligne. Les coups sur les fils de garde peuvent également causer des surtensions à haute tension sur les lignes électriques par induction électromagnétique.

4.2 Modèle de calcul des courants transitoire le long d'une structure filaires

Des expressions analytiques, spatio-temporelles, ont été proposées par plusieurs auteurs pour déterminer le courant transitoire le long de la structure filaire où chacun des modèles est lié au schéma équivalent de son support.

4.2.1 Lignes sans pertes ou transitoires très rapides

Si les conditions de propagation sont réunies, pour une ligne sans pertes ou lorsque les transitoires sont très rapides, les ondes mobiles [28] [23], le modèle de la ligne à constantes réparties et la solution générale en fréquentiel des équations télégraphistes (**ANNEXE**).

Soit k et m les nœuds extrémités de la ligne et Z_c son impédance caractéristique réelle alors nous aurons :

$$u_+(x-vt) = \frac{1}{2}(u_k(t-x/v) + Z_c i_k(t-x/v)) \quad (3.30)$$

$$u_-(x+vt) = \frac{1}{2}(u_k(t+x/v) - Z_c i_k(t-x/v)) \quad (3.31)$$

$$u(x, t) = \frac{1}{2}((u_k(t+x/v) - Z_c i_k(t+x/v)) + (u_k(t-x/v) + Z_c i_k(t-x/v))) \quad (3.32)$$

$$i_-(x+vt) = \frac{1}{2}(i_k(t+x/v) - Y_c u_k(t-x/v)) \quad (3.33)$$

$$i_+(x-vt) = \frac{1}{2}(i_k(t-x/v) + Y_c u_k(t+x/v)) \quad (3.34)$$

$$i(x, t) = \frac{1}{2}((i_k(t-x/v) + Y_c u_k(t+x/v)) + (i_k(t+x/v) - Y_c u_k(t-x/v))) \quad (3.35)$$

4.2.2 Lignes avec pertes

Pour les lignes avec pertes nous utilisons les modèles à éléments répartis avec les résistances localisées [29] [26] où les tensions et courants nodaux sont calculés en tenant compte de la résistance de la ligne.

À une fréquence donnée, D.P.Carroll [27] [30] propose, l'hypothèse où les paramètres linéiques sont calculés des expressions temporelles pour $\exp(-\gamma(w)x)$, $\exp(\gamma(w)x)$ et Z_{cf} .

$$F^{-1}(\exp(-\gamma(w)x)) = g(t) = \exp(-a\tau) \left(\delta(t-\tau) + \frac{a\tau}{\sqrt{t^2 + \tau^2}} I_1(a\sqrt{t^2 + \tau^2}) \right) u(t-\tau) \quad (3.36)$$

$$F^{-1}(Z_{cf}) = z(t) = Z_1 (\delta(t) + a \exp(-at) (I_0(at) + I_1(at))) \quad (3.37)$$

Avec :

F : opérateur de Fourier ;

$$\tau = \frac{x}{v} \quad (3.38)$$

$a = R/2L$, est le facteur d'affaiblissement de la ligne ;

I_0 et I_1 sont des fonctions de Bessel modifiées d'ordre 0 et 1 ;

$\delta(t)$: Impulsion de Dirac.

Les simplifications des expressions $g(t)$ et $z(t)$ serrent [27] [30] :

$$g(t) = \exp(-a\tau) \delta(t - \tau) \quad (3.39)$$

$$z(t) = Z_c \delta(t) \quad (3.40)$$

Les auteurs [31], proposent des expressions analytiques pour calculer le courant et ses ondes ainsi que la tension et ses ondes en tout point le long de la ligne, qui prendre en compte l'affaiblissement des grandeurs électriques (ondes de courant et de tension).

Les formules précédentes deviennent.

$$u_+(x-vt) = \frac{1}{2} \exp(-a\tau) (u_k(t-x/v) + Z_c i_k(t-x/v)) \quad (3.41)$$

$$u_u(x+vt) = \frac{1}{2} \exp(a\tau) (u_k(t+x/v) - Z_c i_k(t+x/v)) \quad (3.42)$$

$$i_-(x+vt) = \frac{1}{2} \exp(a\tau) (i_k(t+x/v) - Y_c u_k(t-x/v)) \quad (3.43)$$

$$i_+(x-vt) = \frac{1}{2} \exp(-a\tau) (i_k(t-x/v) + Y_c u_k(t+x/v)) \quad (3.44)$$

5. Calcul du courant dans un milieu dissipatif et semi infini

Dans notre travail, nous utilisons la méthode dite des images introduite par Takashima [32] [33]. En utilisant la loi de réflexion et de réfraction sur une interface pour une onde électromagnétique plan, l'auteur considère que l'image est située à la même hauteur ou profondeur que la source réelle, mais avec un courant modifié et remplace le demi milieu par le milieu du point d'observation.

Dans son travail, l'auteur [32] [30] s'est basé sur la continuité de la densité du courant tangentielle sur l'interface entre deux milieux différents.

Il propose une étude générale où il déduit les courantes images selon la position de la source et du point d'observation.

5.1 Milieu semi infini

Concèderons deux milieux de caractéristiques respectives $(\sigma_1, \varepsilon_1)$ et $(\sigma_2, \varepsilon_2)$ séparés par une surface plane, et une source de courant localisée dans le milieu (1) à une distance h de l'interface.

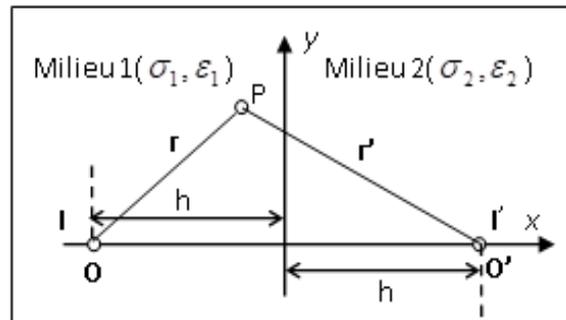


Figure.3.6. La source et son image représentant dans le milieu (1).

Après quelques manipulations, les coefficients de réflexion et de transmission définis respectivement par les expressions suivantes :

$$I' = R(\omega)I = \frac{(\sigma_1 + \omega\varepsilon_1) - (\sigma_2 + \omega\varepsilon_2)}{(\sigma_1 + \omega\varepsilon_1) + (\sigma_2 + \omega\varepsilon_2)} I \quad (3.45)$$

$$I'' = T(\omega)I = \frac{2(\sigma_2 + j\omega\varepsilon_2)}{(\sigma_1 + \omega\varepsilon_1) + (\sigma_2 + \omega\varepsilon_2)} I \quad (3.46)$$

Dans notre travail, les deux milieux étant le sol et l'air, en fonction de la position du point d'observation et de la source, nous considérons le cas qui présenter dans le paragraphe qui va suivre.

5.2 Source et point d'observation dans l'air

Le champ électromagnétique peut-être évalué comme étant la somme du champ dû au courant de source (I) et celui dû à son image (I').

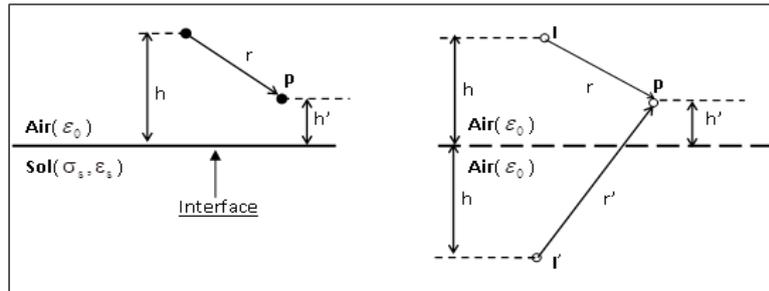


Figure.3.7. Configuration pour le calcul du champ Dans le milieu 1 (air).

$$I' = \frac{\varepsilon_0 - \underline{\varepsilon}_s}{\underline{\varepsilon}_s + \varepsilon_0} I \quad (3.47)$$

Avec :

$$\underline{\varepsilon}_s = \varepsilon_s + \frac{\sigma_s}{j\omega} \quad (3.48)$$

Pour tenir compte de l'interface sol-air nous utilisant la procédure suivante :

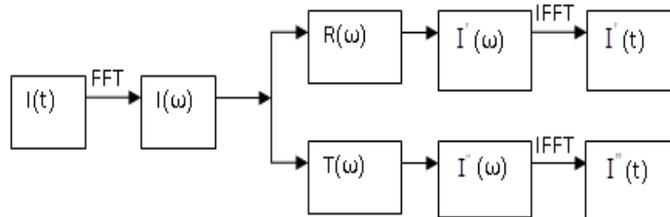


Figure.3.8. L'organigramme pour le calcul le courant Dans le milieu 1 (air).

FFT, IFFT : sont la transformée et la transformée inverse de Fourier.

6. Méthode des rampes de courant

La méthode des rampes de courant a été développée aux Etats-Unis par C.M.Wiggins [31] [34] et al Cette méthode consiste à discrétiser le courant transmis (onde directe et puis inverse) en plusieurs signaux élémentaires appelés rampes de courant. Ces signaux sont caractérisés par leur forme et leur instant de démarrage.

Pour comprendre le principe de cette méthode, il suffit d'imaginer que l'une des deux extrémités de la ligne véhiculant un signal $i(t)$ soit connectée à un générateur d'une série infinie de signaux élémentaires décalés dans le temps et de durée de vie infinie (Figure 3.9). La somme de ces signaux est égale, en chaque instant de temps, au courant réel $i(t)$.

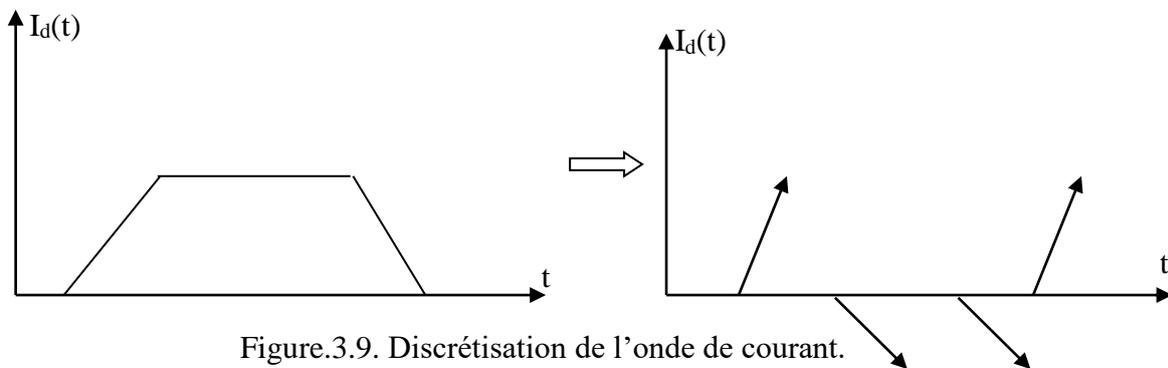
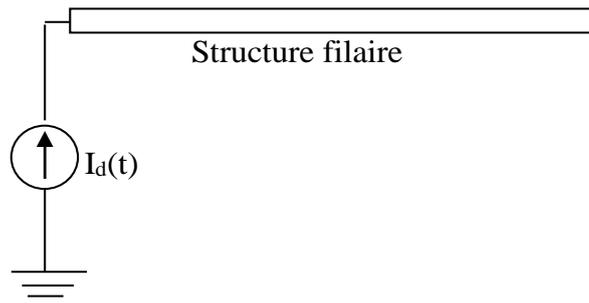


Figure.3.9. Discretisation de l'onde de courant.

6.1 Formulation du calcul une rampe de courant

Dans ce formalisme l'onde de courant direct à l'entrée ou inverse à la sortie de la structure filaire peut être approchée par :

$$i(t) \approx \sum_{i=1}^{i=N_r} \alpha_i (t-t_i) U(t-t_i) \quad (3.49)$$

$$\alpha_i = m_i - m_{i-1} \quad (3.50)$$

$$m_i = (i(t_{i+1}) - i(t_i)) / ((t_{i+1}) - t_i) \quad (3.51)$$

$$m_{N_r} = 0 \quad , \quad m_0 = 0 \quad (3.52)$$

Avec $t_i \geq 0$ (instant d'apparition de la rampe i), et $i=1,2,\dots, N_r$.

Où : α_i est le coefficient de rampe, N_r est le nombre de rampes, et $U(t-t_i)$ est la fonction de Heaviside, cette dernière joue le rôle d'un "starter".

Avec :

$$i(\xi, t') = \alpha_i \left((t - t_i) - \left(\frac{R(\xi) + \xi}{c} \right) \right) U \left((t - t_i) - \left(\frac{R(\xi) + \xi}{c} \right) \right) \quad (3.53)$$

$$\xi_1 = 0 \quad \text{Si } t < t_a$$

$$\xi = \frac{1}{2} \left(\theta - \frac{\rho^2}{\theta} \right) + z \quad \text{Si } t_a < t < t_b \quad (3.54)$$

$$\xi_1 = L \quad \text{Si } t > t_b$$

$$\theta = c(t - t_i) - z \quad (3.55)$$

$$t_a = t_i + R(0)/c$$

$$t_b = t_i + (L + R(L))/c$$

7. Méthode analytique exacte

Cette méthode a été développée au LEG par R.S.Shi [22] [35] à partir du modèle de calcul de courant propagatif proposé en [36] [37]. Dans cette méthode l'auteur ne discrétise ni le support ni le signal et propose des formules permettant le calcul des grandeurs électriques (courants et tensions) nodales.

En négligeant les pertes actives de la ligne et en supposant les paramètres linéiques constants, l'auteur propose une formulation simple mais limitée par le modèle de courant utilisé.

8. Limites et le domaine de validation des méthodes

Autrement dit, Une comparaison faite, de modèle exact et en approchant le courant injecté par une série de rampes, en obtenant les mêmes expressions que celles de la méthode des rampes. Cette dernière n'est donc qu'une approximation de notre modèle [22] [35]. Par ailleurs il est important de noter dans la méthode des rampes, que le repère dans lequel le courant est calculé est lié au point de départ (les extrémités de la ligne) de l'onde : ceci alourdit son utilisation [23] [38].

Les paragraphes précédents démontrent théoriquement que le modèle exact est une limite théorique de convergence des modèles numériques traditionnellement utilisés par les systèmes électriques filaires en régime transitoire [32] [30].

8.1 Amélioration de la méthode analytique

La méthode analytique ne peut décrire la forme générale des régimes transitoires. Le modèle de courant utilisé, est trop idéal.

Afin d'apporter une réelle amélioration à cette méthode, B.Nakhoul propose d'introduire un modèle de calcul de courant plus rigoureux qui tient compte des pertes actives et de la variation des paramètres linéiques de la ligne avec la fréquence. Ce modèle de calcul du courant, exprimé sous forme d'une somme d'une onde directe et une onde inverse, injecté directement dans l'expression du potentiel vecteur magnétique [39] [40] permet d'user de l'artifice mathématique introduit par R.S.Shi [22] [35].

Soit l'expression du courant déjà établi (3.44), ou la vitesse de propagation de l'onde conduite est approximée par celle de la lumière ($v = (\sqrt{L_\infty C})^{-1} \approx c$) :

$$i(\xi, t) = i_+(t - \frac{\xi}{c}) + i_-(t + \frac{\xi}{c}) \quad (3.56)$$

Avec :

$$i_+(\xi, t) = \frac{1}{2Z_1} \exp(-a \frac{\xi}{c}) f_k(t - \frac{\xi}{c}) \quad \text{Et} \quad i_-(\xi, t) = -\frac{1}{2Z_1} \exp(a \frac{\xi}{c}) b_k(t + \frac{\xi}{c}) \quad (3.57)$$

La présence de l'exponentielle dans l'intégrale alourdit le calcul de cette dernière. La résolution de cette intégrale conduirait au formalisme de calcul du champ le plus exact.

Dans ses travaux R.S.Shi [22] [35], montre que pour une ligne sans pertes le champ rayonné est fonction des grandeurs électriques nodales. Afin de pallier la difficulté rencontrée lors du calcul de l'intégrale, il suggère d'introduire dans l'expression du potentiel vecteur magnétique le modèle de calcul de courant à paramètres dépendant de la fréquence sans les termes exponentiels. Ceci conduit à un formalisme similaire à celui proposé par R.S.Shi [22] [53], mais avec des grandeurs nodales calculées en tenant compte des pertes actives dans la ligne ainsi que de la variation de ses paramètres linéique avec la fréquence [23] [38].

Dans la formulation finale de la méthode analytique ainsi améliorée [39] [40], nous retrouvons exactement les mêmes expressions que celles déjà établies en remplaçant bien sûr i_+ par $f_k/2Z_1$ et i_- par $-b_k/2Z_1$.

D'où :

$$I_0(t) = M_{ag} \frac{f_k(t - R(0)/c)}{2Z_1} - M_{af} \frac{b_k(t - R(0)/c)}{2Z_1} \quad (3.58)$$

$$I_L(t) = M_{bg} \frac{f_k(t - (R(L) + L)/c)}{2Z_1} - M_{bf} \frac{b_k(t - (R(L) - L)/c)}{2Z_1} \quad (3.59)$$

$$F_0(t) = \frac{c}{2Z_1} \int [f_k(t - R(0)/c) - b_k(t - R(0)/c)] dt \quad (3.60)$$

$$F_L(t) = \frac{c}{2Z_1} \int [f_k(t - (R(L) + L)/c) - b_k(t - (R(L) - L)/c)] dt \quad (3.61)$$

Conclusion

Ce chapitre nous l'avons consacré à des notions théoriques en relation directe avec la modélisation numérique d'un transitoire de manœuvre dans un poste électrique THT ou HT.

Vu que nous utilisons l'outil de simulation pour traiter nos applications, nous avons axé le contenu de ce chapitre sur cet objectif.

- Modélisation des jeux de barres par la théorie des lignes ;
- Modélisation de régime transitoire par la méthode rampes de courant ainsi la méthode analytique exact.

Dans ce chapitre, nous avons montré qu'il est possible de quantifier par calcul le le régime transitoire, dans le réseau de transport d'énergie, en adoptant des approches assez simplifiées et d'implémentation aisée. Notons que le principal avantage de notre modélisation est son adaptation aux structures filaires telles que les lignes de transport d'énergie et les jeux de barre.

Chapitre IV

Application

1. Introduction

Ce chapitre, nous le consacrons à l'application d'aspect fonctionnement en régime transitoire de manœuvre du réseau électrique ; il s'agit de l'enclenchement et ré-enclenchement de disjoncteur suite à un défaut dans le réseau de transport d'énergie.

Dans la première partie de ce chapitre, nous validons les expressions de calcul des paramètres linéiques des lignes de longueurs finies et de longueurs infinies que nous avons exposé dans le chapitre III.

Nous proposons dans la deuxième partie des résultats de simulations pour illustrer les manœuvres de fermeture de disjoncteurs dans un réseau électrique. Pour compléter notre étude, nous proposons une étude paramétrique où nous faisons varier la topologie et quelques grandeurs comme la tension et la longueur de la ligne Afin d'étudier leurs influences sur le régime transitoire.

2. Validations

Afin de valider notre travail théorique, nous considérons comme application le cas de la manœuvre d'un disjoncteur dans un poste aérien. Le poste aérien comporte uniquement une partie de 220 kV (tension efficace entre phases). Il est schématiquement représenté en figure.4.1.

Dans un poste, bien que triphasé, généralement la manœuvre s'opère phase après phase. Les transitoires ne coexistent pas en même temps sur les trois phases. Pour notre simulation nous procédons à la fermeture du bras central du disjoncteur D0.

En figure 4.1, nous présentons le schéma électrique permettant l'étude du transitoire.

Dans ce paragraphe nous confirmons la méthode des rampes du courant citée précédemment par le biais de la simulation sur la base d'exemples numériques.

L'exemple consiste en l'étude de la propagation d'une onde de courant transitoire dans le jeu de barre (figure.4.1), suite à un manœuvre de disjoncteur dont la forme d'onde de tension à l'extrémité ($z=0$) est donnée par (figure.4.2).

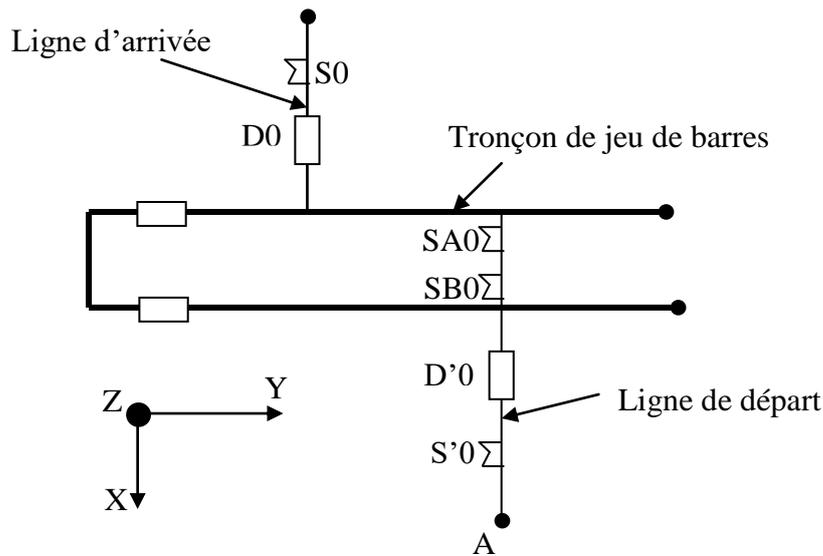


Figure.4.1. schéma électrique monophasée d'un jeu de barres.

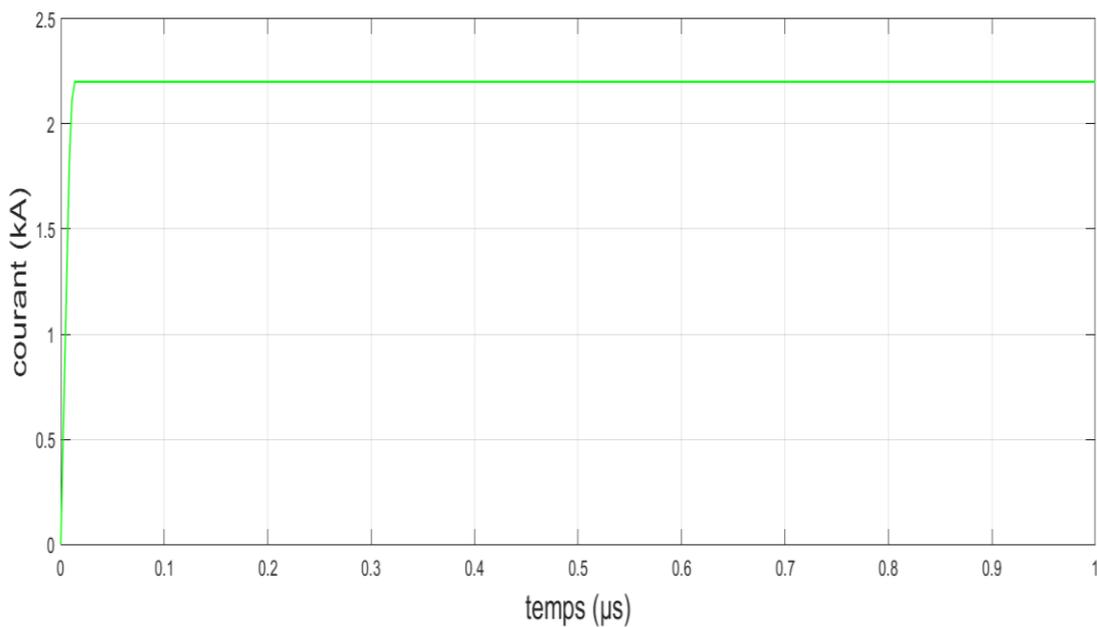


Figure.4.2. Courant trapézoïdal injecté à l'entrée de la phase.

Il s'agira, en fait, de comparer les résultats obtenus par le modèle des lignes à images modifier à ceux obtenus par le modèle analytique exact.

Les résultats relatifs aux deux derniers modèles seront déduits en faisant varier le nombre (le nombre de rampes pour la méthode des rampes de courants).

L'objet de ce paragraphe étant de valider notre modèle et de mettre en évidence ses performances numériques (précisions et temps de calcul), et non de faire des simulations de cas réels. Ainsi, l'élément est dans jeux de barre 10 m de longueur, située à 9 m au-dessus d'un plan de masse métallique parfaitement conducteur (figure.4.1). La ligne est supposée adaptée à ses deux extrémités et parcourue par un courant impulsionnel propageait dont la forme trapézoïdal à l'extrémité ($z=0$) est donnée (figure 4.2).

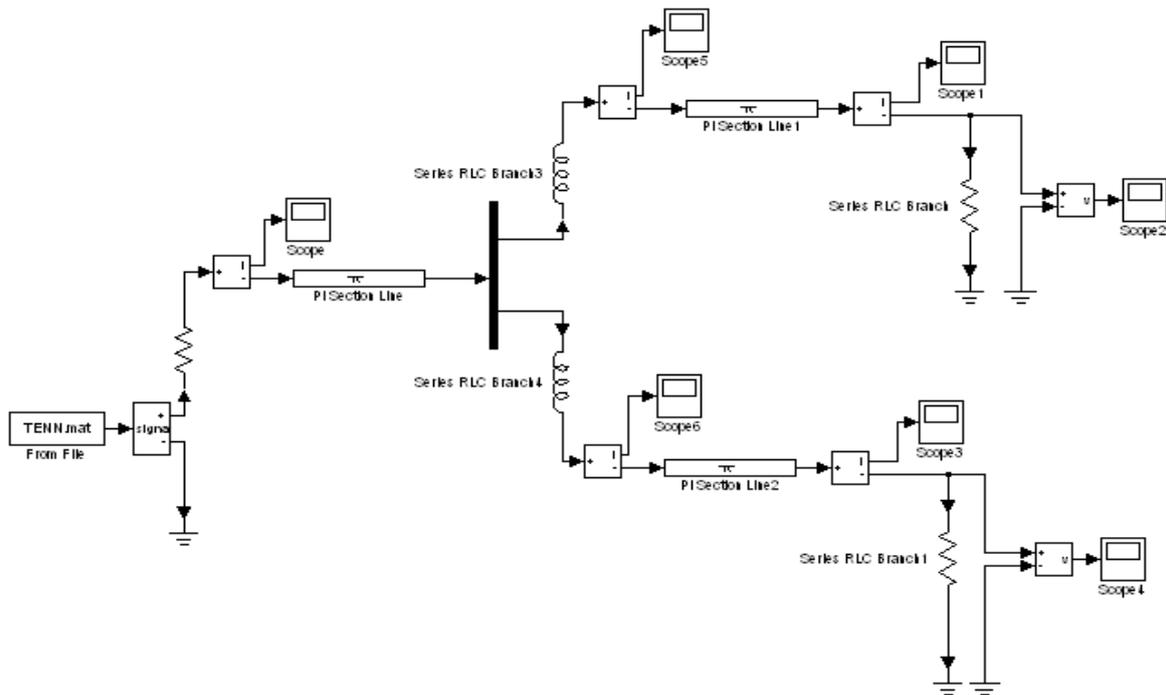


Figure.4.3. Schéma électrique unifilaire pour le calcul des courants transitoire sous SIMULINK.

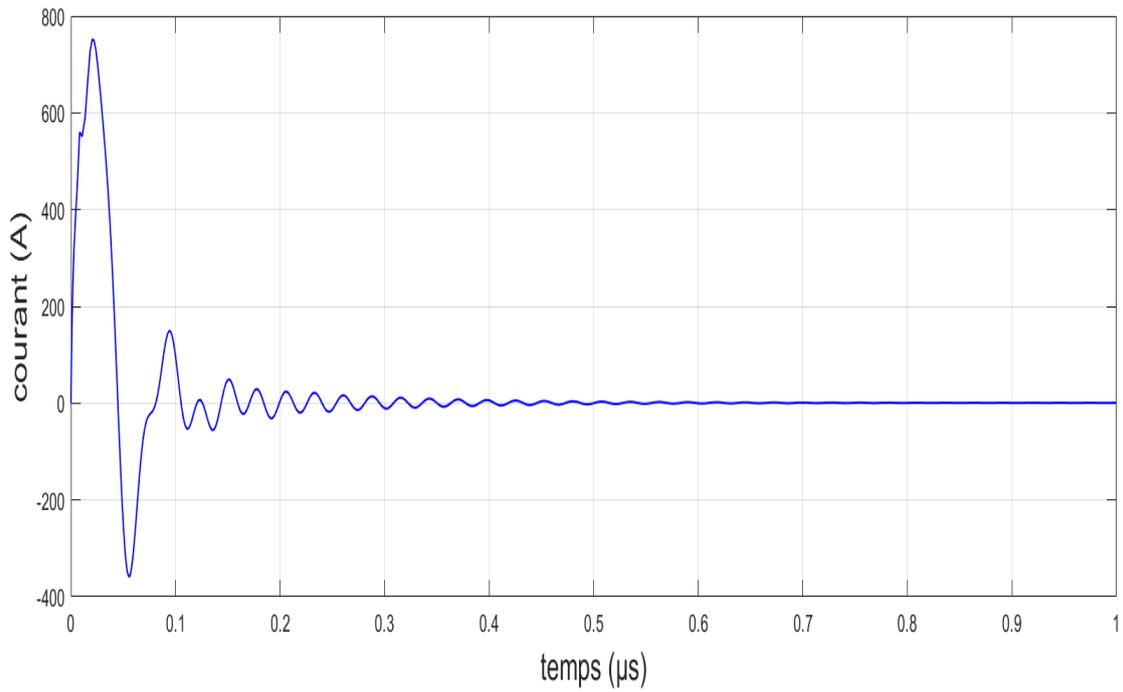


Figure.4.4. Variation du courant injecté à l'entrée du jeu de barre.

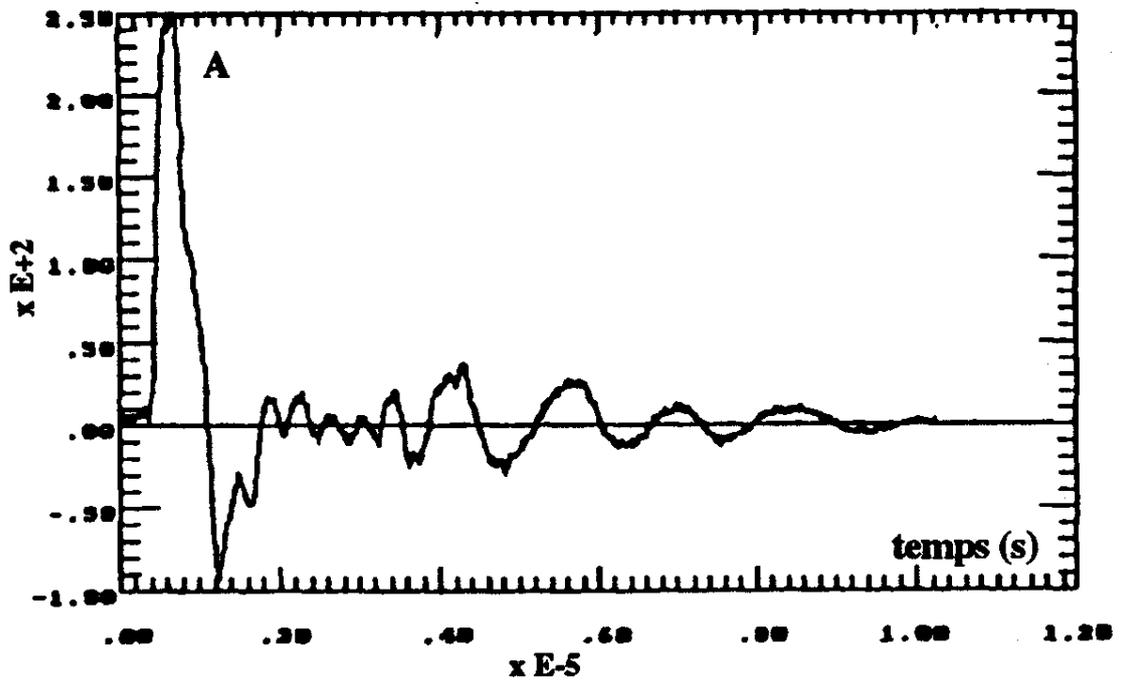


Figure.4.5. Variation du courant injecté dans le jeu de barre (résultat publié en pour un poste aérien THT lors de la fermeture à vide d'un disjoncteur.

En figure.4.4, nous présentons le courant injecté à l'entrée du jeu de barre suite à la fermeture à vide du disjoncteur D0. La figure.4.5, présente le courant injecté mesuré [32] à l'entrée du jeu de barre pour le même type de poste aérien ; les auteurs publient uniquement les résultats de mesure sans donner des détails sur le poste de mesure. Notons que la valeur de la self limitatrice de courant va énormément influencer l'amplitude et l'allure du courant transitoire. Ce résultat de mesure confirme l'allure générale que nous avons obtenue par simulation.

De ces résultats (figures 4.4 et 4.5) nous pouvons affirmer que la modélisation que nous avons réalisée avec SIMULINK (sous Matlab) est acceptable qualitativement.

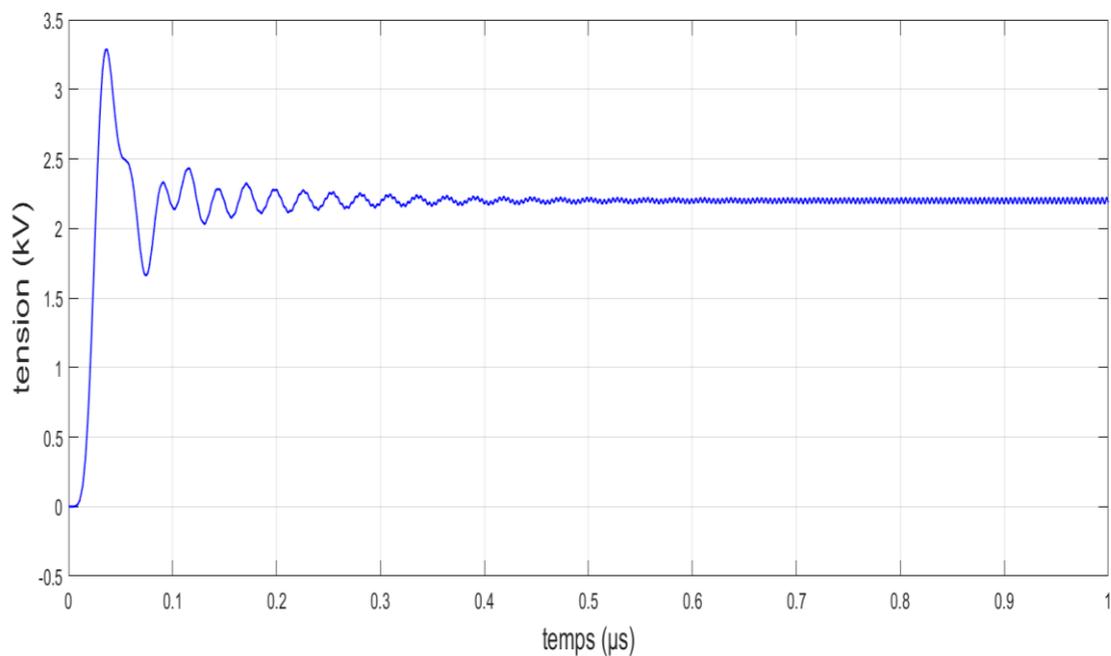


Figure.4.6. Variation de la tension à l'extrémité libre du jeu de barre.

De ces résultats obtenus illustrent la variation du courant injecté (figure 4.4), ainsi que la tension à l'extrémité libre du jeu de barre (figure 4.6). Ces variations pseudo-oscillatoires, présentent un pic puis s'atténuent pour s'annuler car le jeu de barre est à vide (extrémités ouvertes).

3. Application

Pour élargir notre étude théorique de ce travail, On considère des applications des manœuvres des disjoncteurs pour les cas suivants :

- dans un jeu de barre (a b c / a b c) d'un poste aérien de 410 kV.
- La propagation d'une onde de manœuvre sur une ligne de départ de 1km de longueur.

Le poste aérien comporte uniquement une partie de 410 kV (tension efficace entre phases). Il est schématiquement représenté en figure.4.7. Les hauteurs par rapport au sol des structures filaires modélisant le poste sont comme suit :

- les lignes d'arrivées sont à 18m,
- les jeux de barres à 9m.

Dans un poste, bien que triphasé, généralement la manœuvre s'opère phase après phase. Les transitoires ne coexistent pas en même temps sur les trois phases. Pour notre simulation nous procédons à la fermeture du bras central du disjoncteur D0.

3.1 Application sur d'un poste 410kV

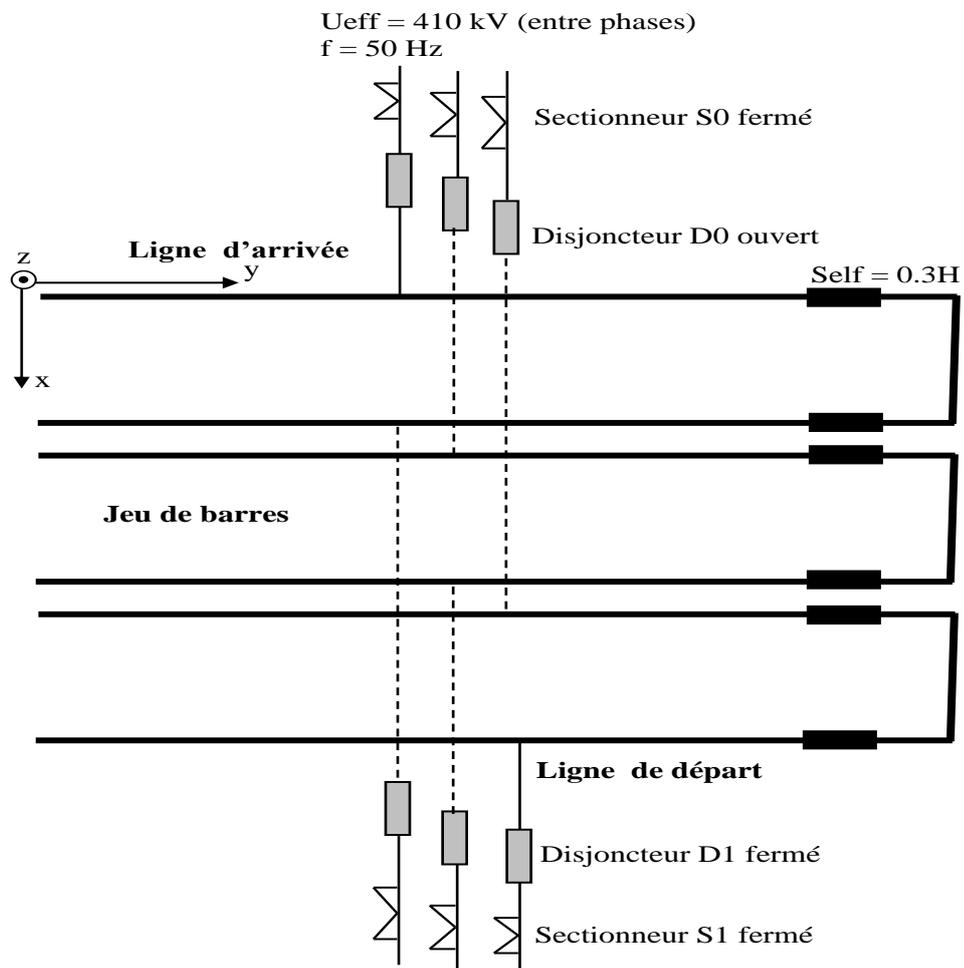


Figure.4.7. Schéma descriptif du poste aérien.

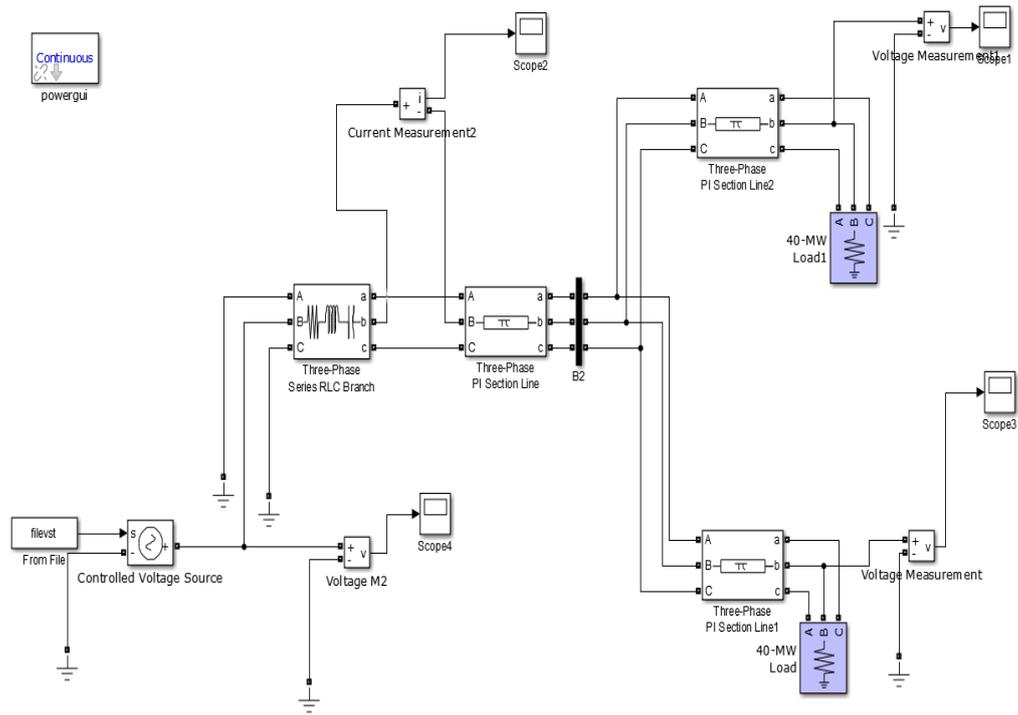


Figure.4.8. Schéma électrique triphasé (jeu de barre) pour le calcul des courants transitoire sous SIMULINK.

3.1.1 Cas de l'injection d'un courant trapézoïdal

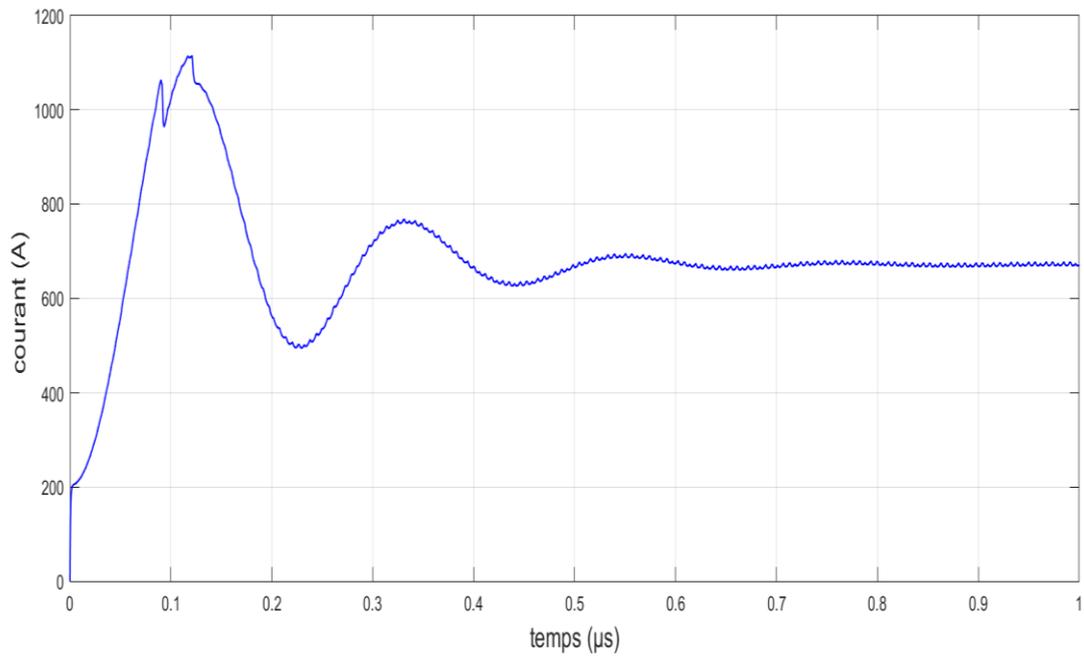


Figure .4.9 L'injection d'un courant trapézoïdal.

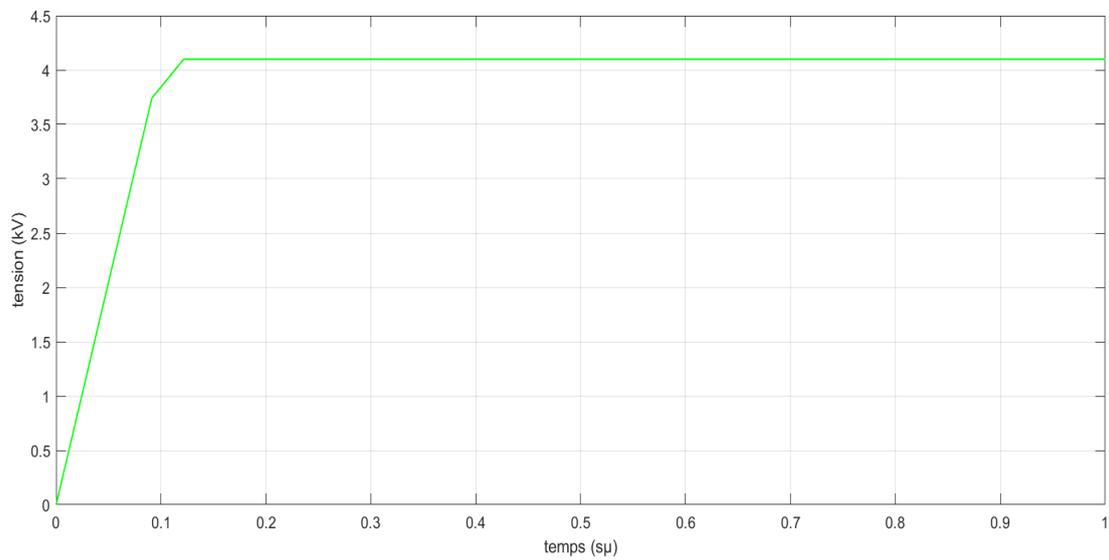


Figure.4.10 L'injection d'une tension trapézoïdale.

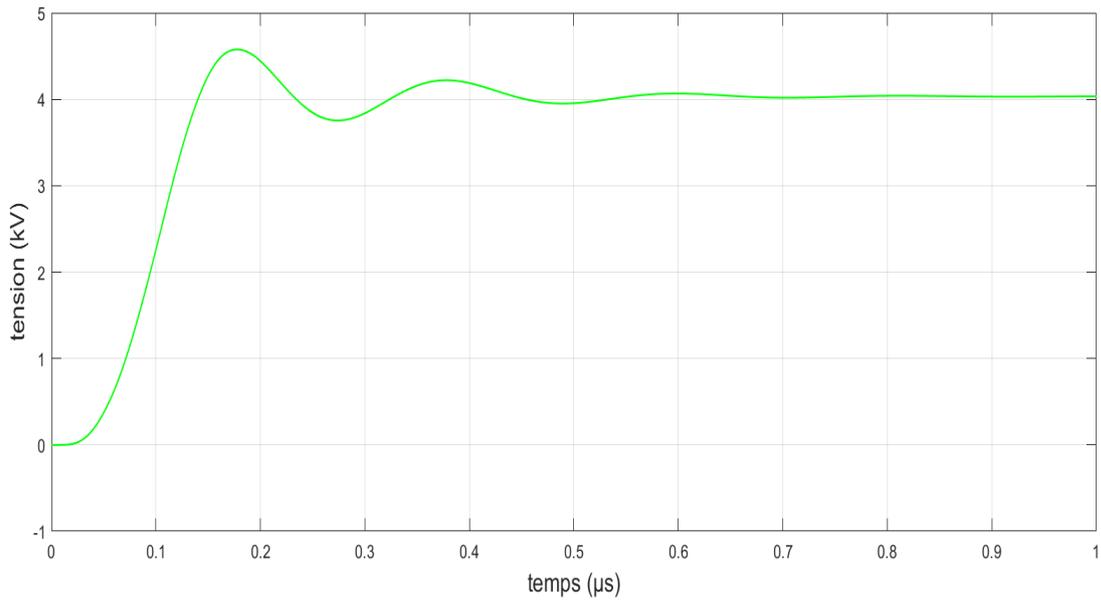


Figure .4.11. Variation L'injection d'une tension trapézoïdal.

En analysant les résultats de Variation L'injection d'une tension figure.4.11, nous constatons que la surtension apparaît uniquement sur la phase manœuvrée, La forme d'onde de tension elle consiste en un front de montée jusqu'à l'amplitude maximale (de 0.1 microseconde à 0.2 microsecondes). Suivi d'une courte décroissance de quelques dizaines de microsecondes. La tension se stabilise ensuite à une valeur maximale de 410 kV.

4. Cas propagation sur une ligne 220kV

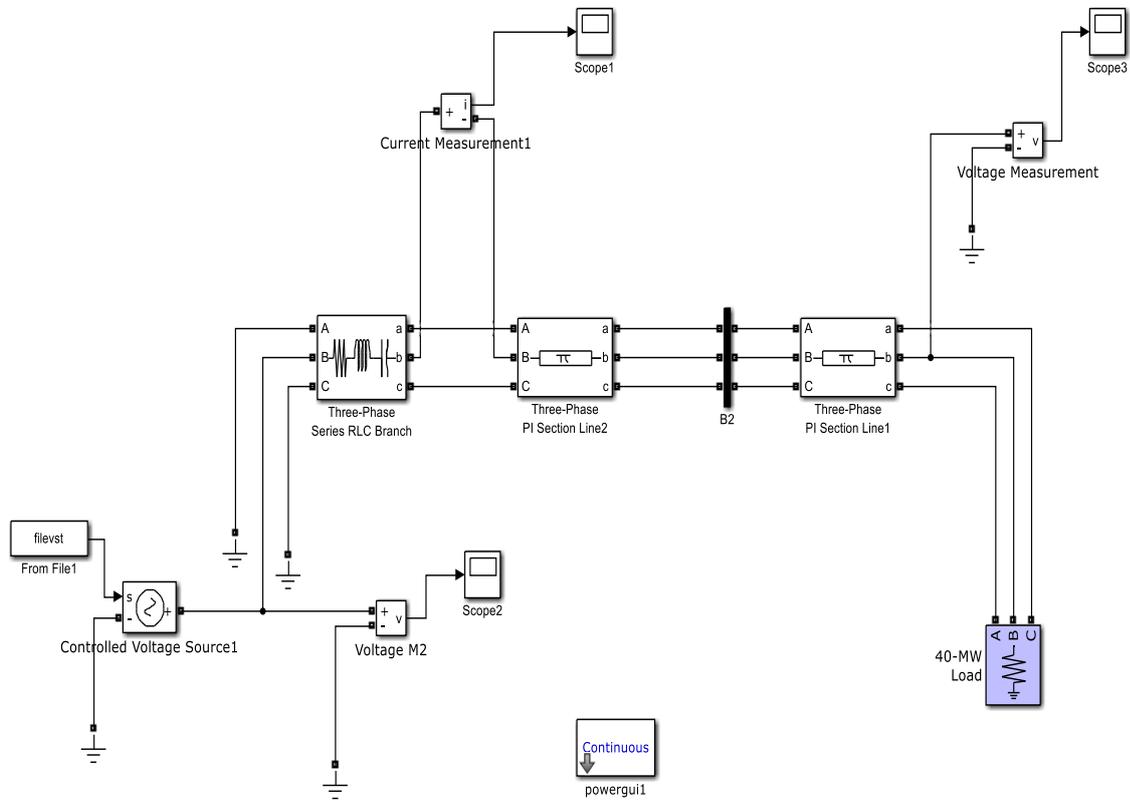


Figure.4.12 Schéma électrique triphasé (une seule ligne) pour le calcul des courants transitoire sous SIMULINK.

4.1 Cas de l'injection d'un courant trapézoïdal

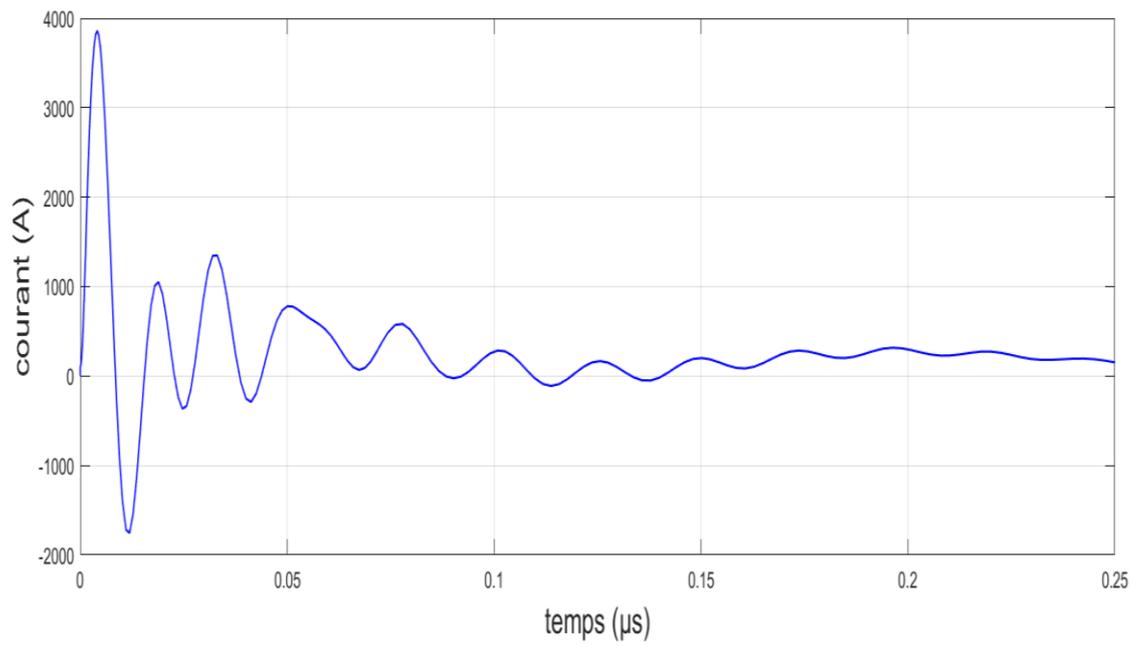


Figure.4.13 Courant injecté trapézoïdal

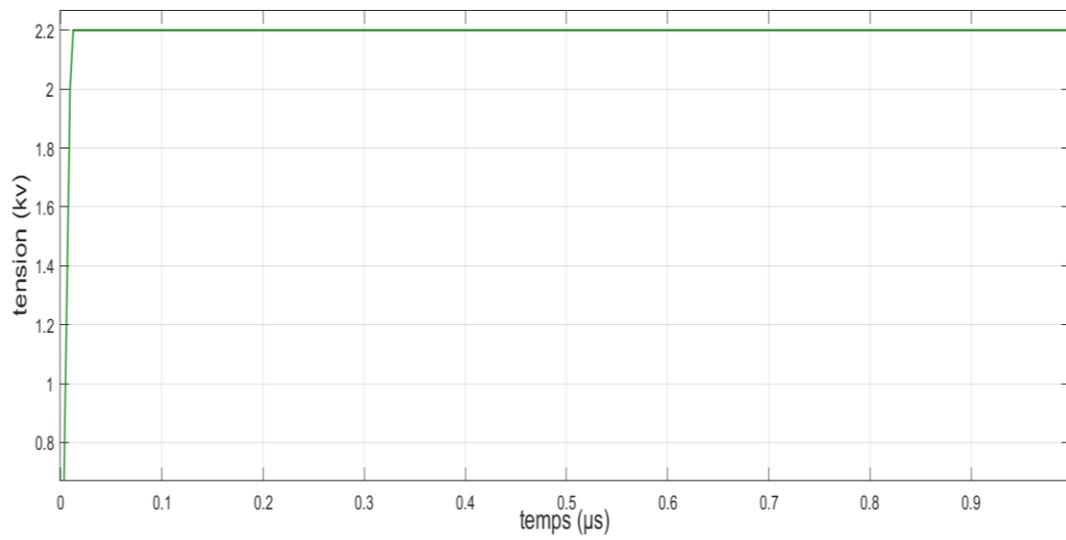


Figure.4.14 Tension injecté trapézoïdal.

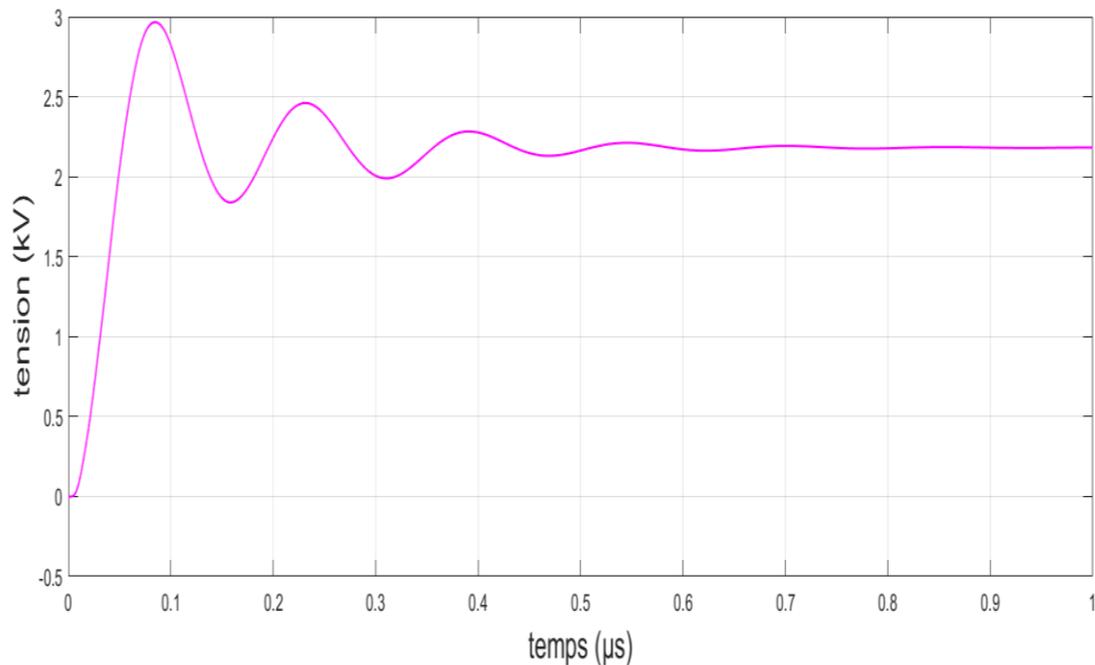


Figure.4.15. Variation tension injecté trapézoïdal.

Ces résultats (figures 4.13.a à 4.15) montrent que l'allure générale est conservée avec parfois quelques différences en amplitudes quand on s'éloigne du point d'injection. L'approche que nous utilisons prend en compte la longueur de la ligne (1km) ainsi le changement de configuration, justifie peut être en partie la différence d'amplitude des résultats. Notons cependant que l'ordre de grandeur est conservé au point d'injection de tension mais au bout de la ligne l'effet de la longueur et de la configuration sont bien illustrées. Ceci nous amène à affirmer que la méthode des rampes des courants est largement suffisante pour l'évaluation de régime transitoire dans le réseau électrique qui est l'objectif de notre travail.

Conclusion

La quantification par calcul de régime transitoire de manœuvre n'est pas une tâche aisée. L'effet de la longueur, configuration et niveau de tension, spécifique à la structure de chacune des installations de réseau. Les simulations que nous avons réalisées (ligne aérienne, poste électrique) apportent leurs contribution aux résultats obtenus.

Nous avons montré les capacités de la modélisation numérique des transitoires de manœuvres dans un réseau électrique en traitant la méthode de rampe du courant. Après avoir validé le calcul des paramètres linéiques, nous avons présentés quelques résultats de calcul réalisés en utilisant le logiciel SIMULINK.

Les résultats obtenus sont concordants avec la mesure et quelques fondements théoriques bien connus en théorie des lignes.

CONCLUSION GENERALE

CONCLUSION GENERALE

Le réseau de transport comporte des éléments très importants, très sensibles qui doivent être bien choisis et bien réglés afin d'assurer une protection efficace contre les différents types de défauts qui peuvent survenir sur ce réseau.

Le réseau électrique fonctionné en général en régime établie à une tension nominale. Dans certain cas le réseau porté à une tension supérieure de sa tension nominale suite à un défaut ou bien pour des raisons de fonctionnement normale (enclenchement d'une ligne). Les surtensions sont une des causes possibles de défaillances d'équipements électriques du réseau électrique.

La conduite de réseaux aussi complexes et divers nécessite une grande coordination dans l'exécution des manœuvres d'exploitation. Des incidents se produisent à tout moment et il faut constamment faire face à des problèmes très variés, qui peuvent survenir sur des installations électriques (postes et réseau) géographiquement très dispersées.

Pour protéger les équipements du réseau électrique contre le phénomène de surtension des méthodologies expérimentales ont été développées. Pour réaliser ces essais, différents types de génératrices électriques hautes tensions sont utilisés selon la forme de la tension souhaitée. Par ailleurs, la mesure de la tension produite nécessite des appareils spécifiques. Leurs validités reposent sur la répétitivité et la cohérence des résultats.

En plus du fait que la mesure en laboratoire soit très coûteuse, le caractère aléatoire de certains paramètres qui interviennent in situ a poussé les ingénieurs à compléter la caractérisation des surtensions en faisant appel à la modélisation.

L'importance des études des phénomènes transitoires dans la conception technologique des réseaux à très hautes tension n'est plus à démontrer. C'est pourquoi, depuis plusieurs années, de nombreuses équipes de recherches travaillent à la mise au point et à l'application de diverses méthodes de simulation ou de calcul des régimes transitoires des réseaux de transport d'énergie.

Dans ce travail de PFE (master en électrotechnique industrielle), consacré à simulation des surtensions de manœuvre pour aider à un choix approprié de la coordination des isolements.

Des applications que nous avons réalisées, nous pouvons affirmer que le calcul analytique est un moyen acceptable pour la quantification (déduire l'ordre de grandeur) du transitoires de manœuvres de fermetures dus dans le réseau de transport d'énergie.

Enfin il faut noter qu'un important élément n'est pas pris en compte lors de notre modélisation, il s'agit du caractère non linéaire de la manœuvre de fermeture qui implique

CONCLUSION GENERALE

une résistance de l'arc électrique non linéaire. Notons que notre simulation consiste à représenter la manœuvre non seulement par le tout ou rien de la résistance de contact du disjoncteur, mais nous avons régénéré le phénomène transitoire en temps réel avec des paramètres similaires très importants apparaissant sur les résultats de mesures réalisés par l'EPRI [32].

En perspective, il serait certainement intéressant de compléter ce travail en tenant compte des couplages entre surtension interne et externe (manœuvre et foudre, ...) présents dans le réseau et généralement responsable du renforcement du régime transitoire.

BIBLIOGRAPHIE

- [1] B.Nekhoul and R. Feuillet, “Current and Voltage Computations for the Prediction of Transient Electromagnetic Environment in Power Networks, Part I: Analytical Formulation for Current and Voltage”; First European Conference on Power System Transient. pp. 199-203. Lisbon, June 17-18, 1993.
- [2] Guide Technique « Plan de protection des réseaux HTA », EDF B61-21, B61-22, B61-25 ultérieure, février 1994.
- [3] « Power Engineering Guide - Transmission and Distribution », Rapport SIEMENS, 4th Edition, 2005
- [4] ZELLAGUI Mohamed, «étude des protections des réseaux électrique MT (30 & 10 kV) » mémoire de magistère, université « Mentouri Constantine »Année 2010.
- [5] Techniques_ing-D 4 424 - Supports-Jean-François DIDIERLAURENT.
- [6] Georges THOMASSET, Cahier Technique Merlin Gerin n° 169 « la conception des Réseaux industriels en haute tension » CT169 édition octobre 1993
- [07] Jean-Michel Delbarre, « Poste à Haute et Très Haute Tension », Technique de l'Ingénieur, D4570-2, pp. 1-17.
- [08] A. MELLAL, M. HADIM « Présentation d'un poste d'interconnexion » Mémoire de fin d'études DEUA en électrotechnique. UMMTO, 1997.
- [09] M. Virlogeux, «Systèmes de Téléconduite des Postes Electriques », Technique de l'Ingénieur, d4850, pp. 1-11, 1999.
- [10] FRANÇOIS GIRARD « Généralités sur la foudre et les surtensions ». ADEE Electronic. Édition octobre 2008.
- [11] KAHLAT Mohamed ElHady, AMIRA Mourad «Protections des postes THT/HT opté par SONALGAZ/GRTE » mémoire de magistère, Université de Jijel, 2020.
- [12] Abdallah Medjdoub «Régimes transitoires des systèmes électriques» mémoire de mastère, Université Abderahmane MIRA - BEJAIA –2015.

BIBLIOGRAPHIE

- [13] chikeur Hadjer «Modélisation Réaliste des Transitoires Électromagnétiques de Foudre dans le Réseau Électrique. » mémoire de Master, Université Mohamed Seddik Ben Yahia-JIJEL, 2019.
- [14] A. Sabot et J. Michaud, Lignes et Postes Choix et Coordination des Isolements, techniques de l'ingénieur, vol D4750-4.
- [15] A. Schmitt et T. Deflande, « Les Surtensions et les Transitoires Rapides de Tension, en Milieux Industriel et Tertiaire » Eddition Eyrolles 1997.
- [16] Tian LIU, "Manœuvre contrôlée des transformateurs de puissance avec flux rémanent", Thèse de Doctorat, Ecole Doctorale « Sciences et Technologies de l'Information des Télécommunications et des Systèmes », Juillet 2011.
- [17] E. Thuries, G. Ebersohl, J. P. Dupraz, O. Chetay, J. P. Montcorgé, "Introduction de l'électronique numérique dans les auxiliaires de l'appareillage et amélioration de la fiabilité", 1994, CIGRE session 1994, rapport 23/13-09.
- [18] Denis Dufournet, "Disjoncteurs SF6 - Évolution de 1959 à 1994", Revue générale de l'électricité n° 5, pp. 1-28, 1994.
- [19] C. R.Paul, "Analysis of multiconductor Transmission Lines", Wiley Interscience, 1994.
- [20] G. Riquel, Etude du Rayonnement Electromagnétique Emis par les Postes Sous Enveloppe Métallique lors des Manœuvres de Sectionneurs : Mesures en laboratoire, Colloque CEM Lyon(France), 1992.
- [21] D. Fulchiron « surtensions et coordination de l'isolement » Merlin Gerin décembre 1992.
- [22] N. Ikhlef, "Environnement Electromagnétique du Réseau de Transport d'Énergie, Couplage avec les Structures Filaires, Réduction du Champ Magnétique", Thèse de magistère en Electrotechnique, Université de Jijel, Promotion 2002.
- [23] M .Aguet et J. J. Morf, "Energie Electrique", Traité d'Electricité, vol. XII.
- [24] J. R. Carson, "Wave Propagation in Overhead Wires with Ground Return", Bell system Techno Journal. Vol. 5, pp. 539-554, 1926.

BIBLIOGRAPHIE

- [25] C. Gary, "Approche Complète de la propagation Multifilaire en Haute Fréquence par Utilisation des Matrices Complexes", EDF Bulletin de la Direction des Etudes et Recherches, série BN° ¾, pp. 5-20, 1976.
- [26] R. S. Shi, "Rayonnement Electromagnétique des Réseaux Electriques à Topologie Complexe", Thèse de doctorat de l'INPG. Grenoble 1992.
- [27] M. Najmouddine, "Contribution à l'Etude Théorique et Expérimentale des Perturbations Electromagnétiques Provoquées par des Câbles de Transport d'Energie soumis à des Régimes Transitoires sur des Câbles de Contrôle Bas Niveau ayant un Cheminement Parallèle», Thèse de doctorat en électronique, Université de Colermont Ferrand U. E. R. 7Juillet 1982.
- [38] Senaa Kaouche, "Analyse de défauts dans un Réseau de lignes ou de câbles», université de Jijel, juin, thèse de doctorat, 2007.
- [29] F. Gardiol, "Electromagnétisme". Traité d'Electricité, Vol III.
- [30] J.Liu, W.Ruan, S.Fortin, and F.P.Dawalibi, "electromagnetic field near high voltage electric power line: a parametric analyses ", IEEE, 2002.
- [31] B.Nekhoul and R. Feuillet, "Current and Voltage Computations for the Prediction of Transient Electromagnetic Environment in Power Networks, Part I: Analytical Formulation for Current and Voltage"; First European Conference on Power System Transient. pp. 199-203. Lisbon, June 17-18, 1993.
- [32] C.M.Wiggins, and al, "Measurement of switching Transients in a 115kV Substation", IEEE Trans. On PWRD, Vol. 4, No.1, pp.756-769, January 1989.
- [33] V. Costa, S. Caniggia, L. Catello, "On the Computation of Electromagnetic Field Components from a Transmission Line: Theory and Application", IEEE, 1990.
- [34] C.M.Wiggins, S. E. Wright, "Switching Transient Fields in a 115 kV Substation", IEEE Trans. on PWRD, Vol. 4. 6, No. 2, pp. 791-769, January 1989.
- [35] R.S.Shi, J.C. Sabonnadière, A. Darcherif, "An Exact Analytical Model for Predicting Electromagnetic Fields Produced by Current Transients", Journal of Physics, France, N° 2, Vol. 8, Aug. 1992.

BIBLIOGRAPHIE

- [36] B.Nekhoul, N. Minh and R. Feuillet, “Transient Current and Voltage Switching Computation ” UPEC’93, Vol. 1, pp. 474-477.
- [37] A. Sommerfeld, “Über die Ausbreitung der Wellen in der Drahtlosen Telegraphie”, Annalen der Physik, (4th Folge), Vol. 28, 665-736, 1909.
- [38] B.Nekhoul and R. Feuillet, “A New Method for Calculating the Transient Electromagnetic Field Radiated by a Power Transmission Line”, IEE Conference, Ninth International Conference on Electromagnetic Compatibility, Manchester, UK 5-7 September 1994.
- [39] Groupe Sonelgaz, XD « Guide Technique de Distribution », Document technique de Groupe SONELGAZ, 1984.

ANNEXE

A.1 Les équations télégraphistes

➤ **En fréquentielle :**

$$\frac{\partial[U(x,\omega)]}{\partial x} = -[Z][I(x,\omega)] \quad (\text{A.1})$$

$$\frac{\partial[I(x,\omega)]}{\partial x} = -[Y][U(x,\omega)] \quad (\text{A.2})$$

Notons que x représente la variable d'espace qui indique la direction de propagation et ω est la fréquence. $[I(x,\omega)]$, $[U(x,\omega)]$ les inconnus qui représentent la distribution du courant et de la tension, respectivement. Dans les équations (A.1) et (A.2), $[Z] = [R] + j\omega [L]$ est l'impédance longitudinale, et $[Y] = [G] + j\omega [C]$ est l'admittance transversale de la ligne.

➤ **En temporel**, pour des paramètres linéiques indépendants de la fréquence :

$$\frac{\partial[u(x,t)]}{\partial x} + [R][i(x,t)] + [L] \frac{\partial[i(x,t)]}{\partial t} = [0] \quad (\text{A.3})$$

$$\frac{\partial[i(x,t)]}{\partial x} + [G][u(x,t)] + [C] \frac{\partial[u(x,t)]}{\partial t} = [0] \quad (\text{A.4})$$

Où : $[u(x,t)]$ et $[i(x,t)]$: sont respectivement la tension et le courant distribués le long de la ligne, est ce sont les inconnues.

Pour une ligne bi-filaire (conducteur aller conducteur de retour), les équations (A.3) et (A.4) deviennent :

$$\frac{\partial u(x,t)}{\partial x} + Ri(x,t) + L \frac{\partial i(x,t)}{\partial t} = 0 \quad (\text{A.5})$$

$$\frac{\partial i(x,t)}{\partial x} + Gu(x,t) + C \frac{\partial u(x,t)}{\partial t} = 0 \quad (\text{A.6})$$

ANNEXE

A.2 Ligne de transport

A.2.1 Ligne courte

La capacité peut être ignorée sans beaucoup d'erreur si les lignes sont de moins de 80 kilomètres de long ou si le niveau de tension ne dépasse pas 66 kV. Le modèle de ligne courte par phase est illustré par la (figure A.1).

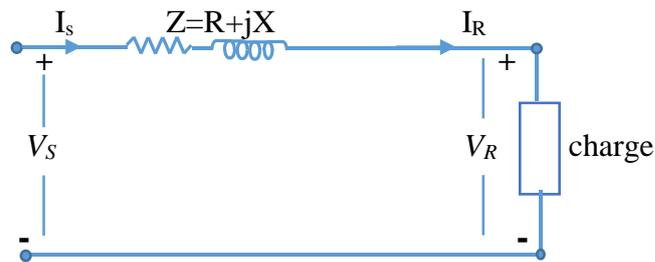


Figure.A.1. Représentation de la ligne courte.

C'est un circuit série simple. Le rapport entre les courants et les tensions de chaque extrémité de la ligne (entre la source et la charge) peut être écrit comme

$$\begin{bmatrix} V_S \\ I_S \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & Z \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_R \\ I_R \end{bmatrix} \quad (\text{A.7})$$

En comparant (3.4) et (3.3), les paramètres ABCD pour une ligne courte sont :

Par conséquent, les paramètres ABCD sont donnés par

$$A = D = 1, B = Z (\Omega) \text{ Et } C = 0$$

A.2.2 Ligne moyenne

L'admittance shunt, habituellement la capacité pure, est incluse dans les calculs pour une ligne de longueur moyenne ($80\text{km} < l < 250\text{km}$). Si l'admittance totale de la ligne est divisée en deux parties égales placées aux extrémités émettrice et réceptrice de la ligne, le circuit est appelé un π nominal. Nous nous référons à la Figure.A.2.

ANNEXE

Pour dériver des équations.

$Z = (r + j\omega L) \cdot l$ Et $Y = (g + j\omega C) \cdot l$ sont l'impédance et l'admittance shunt totales de la ligne.

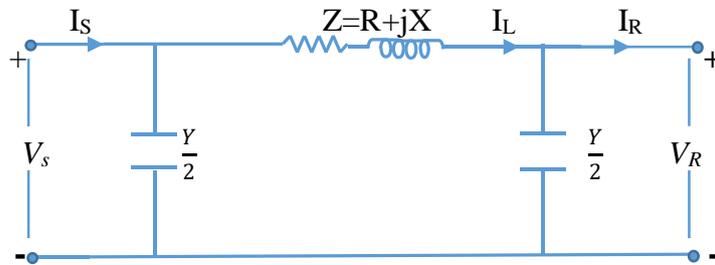


Figure.A.2 Modèle en π nominal d'une ligne de longueur moyenne.

La tension et le courant à l'extrémité source sont obtenus comme suit :

A partir de la (FigureA.2), le courant dans l'impédance série désigné par I_L , est :

$$I_L = I_R + \frac{Y}{2} V_R \quad (\text{A.8})$$

La tension à la source est exprimée comme :

$$V_S = V_R + Z I_L \quad (\text{A.9})$$

Des équations (A.8) et (A.9), on trouve,

$$V_S = \left(1 + \frac{YZ}{2}\right) v_R + Z I_R \quad (\text{A.10})$$

Le courant à la source est,

$$I_S = I_R + V_R \frac{Y}{2} + V_S \frac{Y}{2} \quad (\text{A.11})$$

Des équations (A.8), (A.10) et (A.11), on trouve,

ANNEXE

$$\begin{aligned}
 I_S &= I_R + \frac{V_R Y}{2} + \left[\left(1 + \frac{YZ}{2} \right) V_R + Z I_R \right] \frac{Y}{2} \\
 &= Y \left(1 + \frac{YZ}{4} \right) V_R + \left(1 + \frac{YZ}{2} \right) I_R
 \end{aligned}
 \tag{A.12}$$

Les équations (A.10) et (A.11) peuvent être écrites sous la forme matricielle

$$\begin{bmatrix} V_S \\ I_S \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \left(1 + \frac{YZ}{2} \right) & Z \\ Y \left(1 + \frac{YZ}{4} \right) & \left(1 + \frac{YZ}{2} \right) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_R \\ I_R \end{bmatrix}
 \tag{A.13}$$

$$A = D = 1 + \frac{YZ}{2} \text{ Sans unité}$$

$$B = Z \text{ } (\Omega)$$

$$C = Y \left(1 + \frac{YZ}{4} \right) \text{ } (S)$$

A.2.3 Ligne longue

Pour les longueurs de lignes courtes et moyennes, les modèles ont été obtenus en supposant que les paramètres de la ligne sont des valeurs exactes. Dans le cas où la longueur de la ligne est supérieure à 250km, pour des solutions plus précises, les paramètres doivent être donnés comme une distribution uniformément répartie le long de la longueur. Dans ce cas, les tensions et les courants varient d'un point à l'autre sur la ligne. La (figureA.3) illustre un schéma unifilaire en π d'une ligne par unité de longueur.

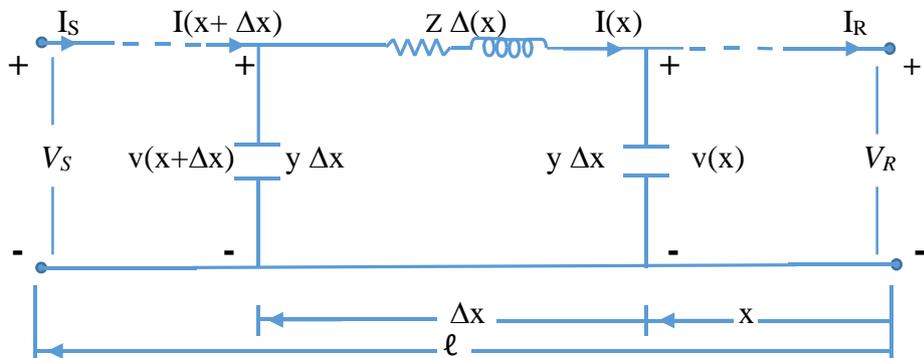


Figure.A.3. Schéma unifilaire d'une ligne longue avec les paramètres par unité de longueur.

ANNEXE

Les expressions de la tension et le courant en un point x de la ligne sont :

$$\begin{cases} V(x) = \cosh(\gamma x)V_R + Z_c \sinh(\gamma x)I_R \\ I(x) = \frac{1}{Z_c} \sinh(\gamma x)V_R + \cosh(\gamma x)I_R \end{cases} \quad (\text{A.14})$$

Cependant, quand $x = l$, l'expression (A.14) permet de trouver les grandeurs courant et tension à la source, avec

$v_s = v(l)$ Et $I_s = I(l)$; le résultat est :

$$\begin{cases} V(l) = \cosh(\gamma l)V_R + Z_c \sinh(\gamma l)I_R \\ I(l) = \frac{1}{Z_c} \sinh(\gamma l)V_R + \cosh(\gamma l)I_R \end{cases} \quad (\text{A.15})$$

Cependant, les constantes ABCD sont :

$$A = D = \cosh(\gamma l), B = Z_c \sinh(\gamma l), C = \frac{1}{Z_c} \sinh(\gamma l),$$

C'est possible maintenant de trouver le modèle équivalent en π très précis pour une ligne de transmission longue. D'une manière similaire aux expressions (A.10) et (A.12) obtenues pour modèle équivalent en π , nous avons,

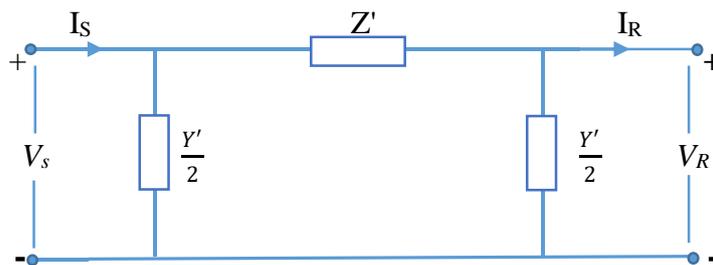


Figure.A.4. Schéma en π d'une ligne longue.

La tension et le courant à l'extrémité source sont obtenus comme suit :

A partir de la (Figure A.4), le courant dans l'impédance série désigné par, est

ANNEXE

$$\begin{cases} V_S = \left(1 + \frac{Y'Z'}{2}\right) V_R + z' I_R \\ I_S = Y' \left(1 + \frac{Y'Z'}{4}\right) V_R + \left(1 + \frac{Y'Z'}{2}\right) I_R \end{cases} \quad (\text{A.16})$$

Maintenant, en comparant (A.18) avec (A.17) et utilisant l'expression :

$$\tanh\left(\frac{\gamma l}{2}\right) = \frac{\cosh(\gamma l) - 1}{\gamma l}$$

Les paramètres du modèle équivalent en π sont obtenus comme :

$$Z' = Z_c \sinh(\gamma l) = Z F_1 = Z \frac{\sinh(\gamma l)}{\gamma l} \quad (\text{A.17})$$

$$\frac{Y'}{2} = \frac{1}{Z_c} \tanh\left(\frac{\gamma l}{2}\right) = \frac{Y}{2} F_2 = \frac{Y}{2} \frac{\tanh\left(\frac{\gamma l}{2}\right)}{\frac{\gamma l}{2}} \quad (\text{A.18})$$