

République Algérienne Démocratique et Populaire

**Ministère de l'Enseignement Supérieure et de la
Recherche Scientifique**



Université Echahid Hamma Lakhdar d'El-Oued

FACULTE DE TECHNOLOGIE

DEPARTEMENT DE GENIE ELECTRIQUE

Mémoire de fin d'étude

Présenté pour l'obtention du diplôme de

MASTER ACADEMIQUE

Domaine : Sciences et Technologies

Filière : Génie Electrique

Spécialité : Réseaux Electrique

Thème

**Etude l'impact d'invernement sur les lignes
électriques à haute tension**

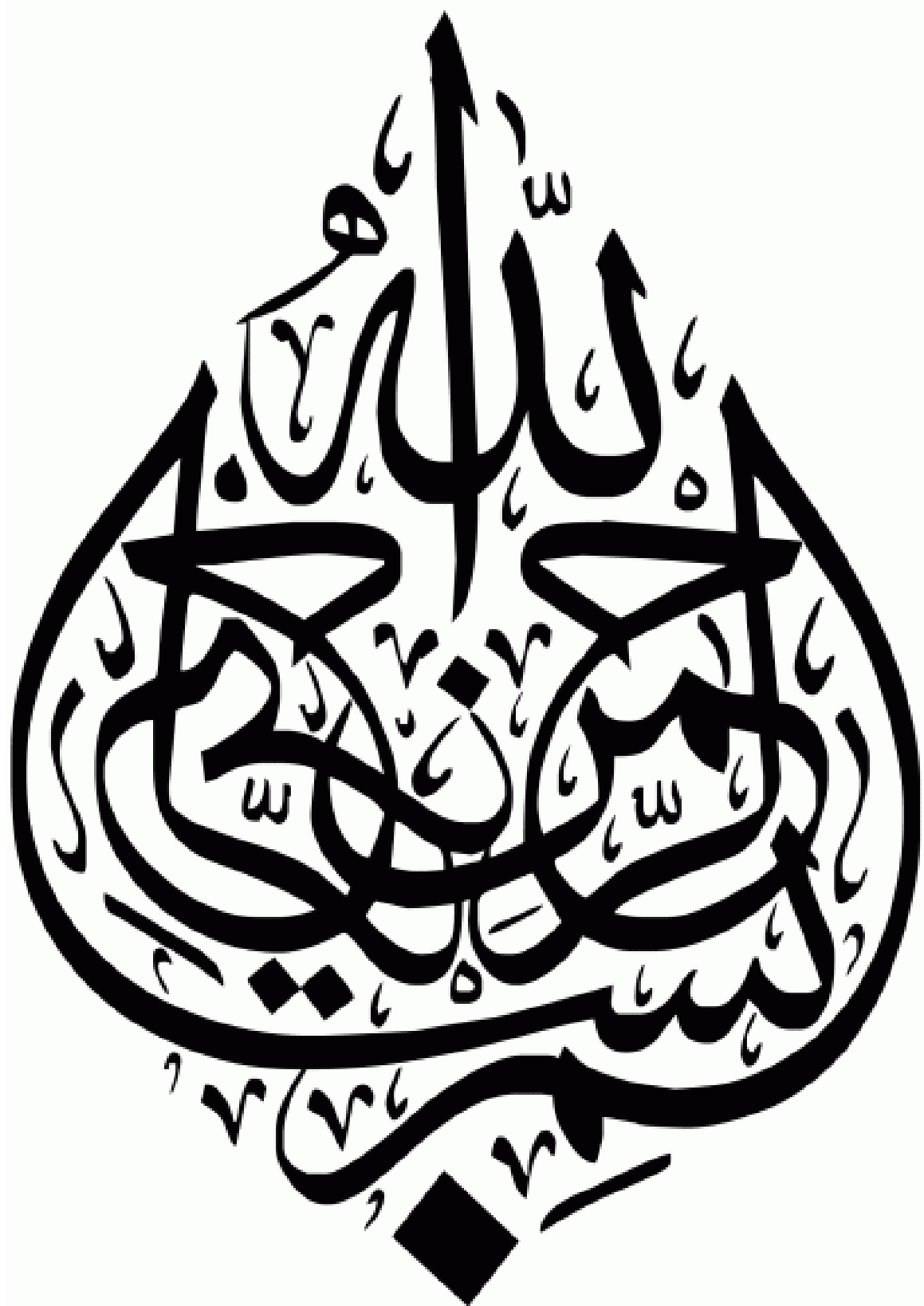
Réalisé par :

- BELLABACI Elmotassem Bellah
- BELLOUM Wissam Ramadhane
- HIMEUR Zakaria

Encadré par :

- Dr. MAMMERI Oussama

Année Universitaire 2022-2023





Remerciements


Tout d'abord, je remercie dieu -ALLAH- de tout puissant de m'avoir donné le courage et la patience durant toutes ces années d'études.

*Je tiens à exprimer toute ma gratitude et mes sincères remerciements à Monsieur **Dr. MAMMERI Oussama**, Professeur à L'Université Echahid Hamma Lakhdar d'El Oued, pour avoir dirigé ce travail.*

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

Nous tenons à remercier vivement toutes personnes qui nous ont aidé à élaborer et réaliser ce mémoire, ainsi à tous ceux qui nous aidés de près ou de loin à accomplir ce travail.

En fin je remercie tout particulièrement mes parents, pour leur soutien inconditionnel tout au long de ces longues années d'études.





Dédicaces

Je dédie ce modeste travail :

À mes très chers parents qui m'ont soutenu durant toute la durée de mes études.

À mes très chères sœurs et à ma grande famille.

À tous mes amis.

À tous ceux qui m'aiment et que j'aime

À vous.





المخلص
Résumé
Abstract

Résumé

Les réseaux de transport jouent un rôle primordial dans l'acheminement de l'énergie électrique des centres de production vers les centres de consommation. Ils sont en général en haute et très haute tension et de type aérien L'étude d'une ligne aérienne permet d'optimiser son fonctionnement.

Sa modélisation et calcul les caractéristiques électriques nous permettent d'obtenir des indicateurs assez précis afin d'évaluer transportées son Comportement vis-à-vis des puissances.

Mots-clés : Lignes électriques -Haute tension – Caractéristiques électrique

Abstract

Transmission networks play a key role in transporting electrical energy from production centres to consumption centres. They are generally in high and very high voltage and overhead type The study of an overhead line makes it possible to optimize its operation.

Its modeling and calculation of electrical characteristics allow us to obtain fairly accurate indicators in order to evaluate its behavior vis-à-vis the powers.

Keywords: Power lines -High voltage – Electrical characteristics.

الملخص

تلعب شبكات النقل دورا رئيسيا في نقل الطاقة الكهربائية من مراكز الإنتاج إلى مراكز الاستهلاك. وهي بشكل عام ذات جهد عالي وعالي جدا ومن النوع العلوي تتيح دراسة الخط العلوي تحسين تشغيله. تسمح لنا نمذجتها وحساب الخصائص الكهربائية بالحصول على مؤشرات دقيقة إلى حد ما من أجل تقييم سلوكها فيما يتعلق بالقوى الناقلية.

الكلمات الرئيسية: خطوط الكهرباء - الجهد العالي - الخصائص الكهربائية.



Sommaire

Dédicace

Remerciement

Résumé

Table des matières

Liste des figures

Liste des tableaux

Introduction générale

a

CHAPITRE I : Généralités sur les réseaux électriques	
I.1. Introduction	3
I.2. Définition des lignes électriques	3
I.3. Types des lignes	3
I.4. Utilisation des lignes selon le type de réseau électrique	3
I.4.1. Lignes de distribution à basse tension (BT)	4
I.4.2. Lignes de distribution à moyenne tension (MT)	4
I.4.3. Lignes de transport à haute tension (HT)	4
I.5.L'utilité de la haute tension	4
I.6.La ligne à haute tension	4
I.7. Composants d'une ligne	5
I.7.1. Conducteurs	5
I.7.2. Isolateurs	6
I.7.3. Supports	7
I.7.4. Câbles de garde	8
I.8. Classification de la ligne électrique en termes de qualité	9
I.8.1 Tension électrique	9
I.8.1.1. Basse tension	9
I.8.1.2 Effort moyen	9
I.8.1.3. Haute tension	10
I.8.2. Conducteurs	11
I.8.2.1. Conducteurs en cuivre	11
I.8.2.2. Conducteurs en aluminium	11
I.8.2.3. Comparaison	12
I.9. Construction d'une ligne	12
I.9.1.Lignes galopantes	13

I.9.2. Effet couronne - interférences radiophoniques	13
I.9.3. Pollution	13
I.9.4. Mise à la terre des pylônes	13
I.10. Modes d'utilisation des lignes électriques	14
I.10.1. Réseaux HTA aériennes	14
I.10.2 Réseaux HTA souterrains	14
I.11. Avantages et inconvénients respectifs des lignes aériennes et câbles souterraines	15
I.11.1. Lignes aériennes	16
I.11.2. Câbles souterraines	16
I.12. Conclusion	17
CHAPITRE II : Etude électrique et modélisation de la ligne	
II.1. Introduction	19
II.2. Exigences d'une ligne de transport	19
II.3. Paramètres de la ligne	19
II.3.1. Circuit équivalent d'une ligne	19
II.3.2. Résistance de la ligne	20
II.3.3. Inductance de la ligne	21
II.3.3.1. Inductance d'un seul conducteur	21
II.3.3.2. Inductance interne	22
II.3.3.3. Inductance d'une ligne de transport triphasée	23
II.3.4. Réactance de la ligne	24
II.3.5. Capacité de la ligne	24
II.3.5.1. Capacité d'une ligne monophasée	24
II.3.5.2. Capacité d'une ligne triphasée	25
II.3.6. Susceptance de la ligne	25
II.3.7. Impédance caractéristique	25
II.3.8. Calcul du champ électrique superficiel des conducteurs	26
II.4. Circuits équivalents des lignes électriques	27
II.4.1. Equations générales de fonctionnement des lignes électriques	27
II.4.2. Circuits équivalents des lignes	30
II.4.2.1. Lignes de très grandes longueurs ($l > 240$ km), $\gamma l > 0.5$	30
II.4.2.2. Lignes de moyennes longueurs ($80 \text{ km} < l < 240 \text{ km}$) $0.1 < \gamma l < 0.5$	32
II.4.2.3. Lignes de courtes longueurs ($l < 80$ km) $\gamma l < 0.1$	32

II.4.3. Calcul de la chute de tension dans les lignes (HT, MT, BT de longueur < 300km)	33
II.4.3.1. Ligne du 3 ^{ème} ordre HT ($G' \approx 0$)	33
II.4.3.2. Ligne du 2 ^{ème} ordre MT ($G' \approx 0, C' \approx 0$)	35
II.4.3.3. Ligne du 1 ^{ère} ordre BT ($G' \approx C' \approx L' \approx 0$)	36
II.4.4. Effet FERRANTI dans les lignes HT	38
II.5. Puissance transmises et compensation du facteur de puissance dans les lignes	38
II.5.1. Puissance transmise par une ligne	38
II.5.1.1. Puissances active et réactive	38
II.5.1.2. Application aux différents types de lignes	39
II.5.2. Calcul du nombre de branches m et nombre de condensateurs par branches n	41
II.6. Synthèse	42
CHAPITRE III : Simulation d'une ligne de transport	
III.1. Introduction	44
III.2. Caractéristiques de la ligne	44
III.3. Variation de la température	45
III.3.1. Organigramme de calcul	45
III.3.2. Résultats	46
III.3.3 Interprétation des résultats	47
III.3.3.1 Tension d'entrée en fonction de la température	47
III.3.3.2 courant d'entrée en fonction de la température	47
III.4. Variation de la distance	47
III.4.1. Organigramme de calcul	47
III.4.2. Résultats	48
III.4.3. Interprétation des résultats	50
III.4.3.1. Tension d'entrée en fonction de la distance	50
III.4.3.2. Courant d'entrée en fonction de la distance	50
III.5. Modélisation et simulation d'un Parafoudre	50
III.6. Conclusions	54
Conclusion générale	56
Bibliographique	



Liste des figures

LISTE DES FIGURES

Page

Chapitre I : Généralités sur les réseaux électriques		
Figure 1	<i>conducteurs en faisceau : a) à 2 conducteurs. b) à 3. c) à 4.</i>	5
Figure 2	<i>Conducteur conventionnel sur la gauche et à âme en fibre composite à droite</i>	6
Figure 3	<i>Types usuels de pylônes en treillis pour lignes à deux ou plusieurs ternes</i>	8
Figure 4	<i>Réseau HTA aérienne en Simple dérivation.</i>	14
Figure 5	<i>Réseaux HTA souterrains en Double dérivation</i>	15
Figure 6	<i>Réseaux HTA souterrains en Coupure d'artère</i>	15
Chapitre II : Etude électrique et modélisation de la ligne		
Figure 1	<i>Circuit équivalent d'une ligne</i>	19
Figure 2	<i>Circuit équivalent d'une ligne simplifié</i>	20
Figure 3	<i>Flux de liaison d'un conducteur cylindrique long</i>	21
Figure 4	<i>Flux de liaison entre D1 et D2</i>	23
Figure 5	<i>Ligne triphasé arrangée symétriquement</i>	23
Figure 6	<i>Ligne monophasé à deux fils</i>	25
Figure 7	<i>Schéma unifilaire en π d'une ligne électrique</i>	27
Figure 8	<i>Schéma unifilaire d'une ligne longue</i>	30
Figure 9	<i>Schéma unifilaire d'une ligne moyenne</i>	32
Figure 10	<i>Schéma unifilaire d'une ligne courte</i>	33
Figure 11	<i>Représentation vectorielle des tensions et courants de la ligne HT</i>	34
Figure 12	<i>Représentation vectorielle des tensions et courants de la ligne MT</i>	35
Figure 13	<i>Paramètres linéiques de la ligne BT</i>	36
Figure 14	<i>Représentation vectorielle des tensions et courants de la ligne BT</i>	37
Figure 15	<i>Diagramme vectoriel complexe RL pour machine synchrone</i>	40
Figure 16	<i>Représentation des branches m et condensateurs par branches n</i>	41
Chapitre III : Simulation d'une ligne de transport		
Figure 1	<i>Organigramme de calcul de tension et courant d'entrée en fonction de la température</i>	45
Figure 2	<i>Tension d'entrée en fonction de la température</i>	46
Figure 3	<i>Courant d'entrée en fonction de la température</i>	46
Figure 4	<i>Organigramme de calcul de tension et courant d'entrée en fonction de la distance</i>	47
Figure 5	<i>Tension d'entrée de la ligne en fonction de la distance</i>	48

Figure 6	<i>Courant d'entrée de la ligne en fonction de la distance</i>	48
Figure 7	<i>Chute de tension en fonction de la distance</i>	49
Figure 8	<i>Chute de courant en fonction de la distance</i>	49
Figure 9	<i>Le bloc schématique de SIMULINK d'une ligne de transmission protégé par un parafoudre</i>	51
Figure 10	<i>La tension de parafoudre en fonction du temps</i>	51
Figure 11	<i>L'intensité du courant de parafoudre en fonction du temps</i>	52
Figure 12	<i>L'intensité de la tension de parafoudre en fonction du temps</i>	53
Figure 13	<i>L'intensité du courant de parafoudre en fonction du temps.</i>	53



Liste des tableaux

LISTE DES TABLEAUX

Page

CHAPITRE I : Généralités sur les réseaux électriques		
Tableau 1	<i>Isolateurs utilisés pour les différentes lignes</i>	7
Tableau 2	<i>Comparaison entre l'aluminium et le cuivre</i>	12
CHAPITRE II : Etude électrique et modélisation de la ligne		
Tableau 1	<i>Effet Ferranti sur une ligne à 380 kV à 50 Hz (avec $L=1,01$ mH/km et $C=11,48$ nF/km)</i>	38



Liste des symboles

Abréviations

T.H.T : Très Haute Tension

H.T : Haute Tension

HTA : Haute Tension A

HTB : Haute Tension B

BTA : Basse Tension A

BTB : Basse Tension B

RMG : Rayon moyen géométrique

Symboles

R' : résistance linéique (Ω/km)

C' : capacité linéique (F/km)

L' : inductance linéique (H/km)

ρ : résistivité du matériau ($\Omega \cdot \text{mm}^2 / \text{m}$)

S : Section des conducteurs (mm^2)

l : Longueur de la ligne ou câble (km)

t_1, t_2 : les températures en $^\circ\text{C}$ à l'Etat initiale et à l'état final du conducteur.

R_1, R_2 : les résistances du conducteur respectivement aux températures t_1 et t_2 .

T : température paramétrique ($^\circ\text{C}$).

K : le coefficient du spiralage du conducteur.

q : facteur de Kelvin

f : fréquence du réseau (Hz).

B : induction magnétique (wb/m^2) H : champ magnétique (At/m)

ψ : Flux ($\text{Wb.t}/\text{m}$)

μ_0 : La permittivité du vide ou de l'air ($\mu_0 = \mu_0 = 4\pi \times 10^{-7} \text{ H}/\text{m}$)

G_{11} : Rayon moyen géométrique du faisceau.
 g_{11} : Rayon moyen géométrique d'une corde.
 n : Nombre de corde dans un faisceau.
 r_t : Rayon du cercle passant par les centres des cordes.
 D_{eq} : Distance géométrique moyenne (GMD)
 Y : Admittance de la ligne (Ω)
 Z : Impédance de la ligne (Ω)
 \overline{Z}_c : Impédance caractéristique (Ω)
 γ : Coefficient de propagation
 θ : Angle propagation
 V_R : Tension au récepteur (kV)
 I_R : Courant au récepteur (A)
 $\cos(\varphi_R)$: facteur de puissance au récepteur
 V_S : Tension a la source (kV)
 I_S : Courant a la source (A)
 S_S : Puissance apparente a la source
 P_S : Puissance active a la source (MW)
 Q_S : Puissance réactive a la source (MVAR)
 Q_C : Puissance réactive fournie par une capacité (MVAR)
 $\cos(\varphi_S)$: Facteur de puissance a la source
 η : Le rendement de la ligne (%)
 $\Delta \overline{U}$: La chute de tension dans la ligne



**Introduction
générale**

Introduction générale

Il y'a peine un siècle que l'électricité a cessé d'être seulement une science pour devenir aussi une technique et la place qu'elle occupe dans le monde est telle qu'on imagine mal, déjà comment l'on a pu vivre sans elle.

Un réseau électrique est un ensemble d'infrastructures énergétiques plus ou moins disponibles permettant d'acheminer l'électricité des centres de production vers les consommateurs.

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

Un réseau électrique doit aussi assurer la gestion dynamique de l'ensemble de production, transport et consommation, mettant en œuvre des réglages ayant pour but d'assurer la stabilité de l'ensemble. Un réseau électrique étant composé de machines de production et de consommation, ainsi que de structures (lignes, transformateurs) pour les relier, les réseaux électriques ne sont apparus que vers la fin xix^e siècle, lorsque chaque élément avait atteint une maturité technologique suffisante.

Le présent mémoire est structuré comme suit :

Le premier chapitre présente des généralités sur la ligne électrique.

Le deuxième chapitre définit la ligne de transport et ces paramètres.

Dans le dernier chapitre, on présente les résultats de notre simulation et leur évaluation.

Ce travail se termine par une conclusion générale dans laquelle on résume les principaux résultats obtenus et on énumérera les perspectives à ce travail.

Chapitre I

**Généralités sur les
réseaux électriques**

I.1. Introduction

A notre époque sans électricité, la vie quotidienne serait difficilement envisageable. Il est donc nécessaire de savoir la produire de manière efficace et continue. Pour répondre à la consommation croissante d'électricité, il a fallu construire des centrales électriques capables de produire de l'électricité en grande quantité. Une fois le courant produit, il doit être amené jusqu'au consommateur. En Algérie, ce service est assuré par la SONELGAZ qui est une société nationalisée à cet effet, SONELGAZ a une triple mission :

- Produire l'énergie dans des centrales (thermiques).
- Transporter cette énergie par des lignes à haute tension ou très haute tension.
- Distribuer cette énergie aux usagers en basse tension.

I.2. Définition des lignes électriques

Une ligne électrique est un ensemble de conducteurs, d'isolants et d'éléments accessoires destinés au transport de l'énergie électrique. [1]

I.3. Types des lignes

Elles peuvent être classées selon plusieurs critères :

- Suivant les fonctions qu'elles assurent dans le réseau:
 - Lignes de grand transport;
 - Lignes d'interconnexion;
 - Lignes de répartition;
 - Lignes de distribution.
- Suivant la situation dans l'espace:
 - Lignes aériennes.
 - Lignes souterraines (câble). [1]

I.4. Utilisation des lignes selon le type de réseau électrique

Le genre de ligne utilisée est imposé par les facteurs suivants :

- Puissance active à transporter
- Distance de transport.
- Coût
- Esthétique, encombrement et facilité d'installation.

Nous distinguons quatre types de lignes :

I.4.1. Lignes de distribution à basse tension (BT)

Ce sont des lignes basses tension qui acheminent l'électricité vers les consommateurs BT. Avec une tension comprise entre 230 et 400 volts, pour alimenter les moteurs, cuisinières, lampes, etc. [2]

I.4.2. Lignes de distribution à moyenne tension (MT)

Ce sont des lignes qui relient les clients MT aux postes de transformation HT/MT de la compagnie d'électricité. Leur tension est comprise entre 1 kV et 50 kV. [2]

I.4.3. Lignes de transport à haute tension (HT)

Les lignes haute tension acheminent l'électricité sur des distances plus courtes et relient les régions et les agglomérations entre elles, à des tensions comprises entre 50 et 150 kV. [2]

I.4.4. Lignes de transport à très haute tension (THT)

Les lignes THT permettent de transporter des quantités d'électricité très importantes sur de longues distances avec des pertes minimales. Elles relient les régions et les pays entre eux et alimentent directement certaines grandes zones industrielles. Elles fonctionnent à des tensions allant jusqu'à 765 kV. [2]

I.5.L'utilité de la haute tension

L'énergie électrique n'est généralement pas produite à proximité immédiate des lieux d'utilisation massive. Il faut donc la transporter par des lignes ou des câbles. Pour une puissance donnée, le courant à transporter sera inversement proportionnel à la tension de transport. Par exemple, pour évacuer l'énergie d'un groupe de 100MVA, le courant sera de 260 A sous 220 kV mais de 4 000 A sous 15 kV. Le transport de 4 000 A sous 15 KV entraînerait des coûts d'équipement et surtout de pertes par effet Joule inadmissibles. Les courants de court-circuit et leurs effets seraient aussi considérablement augmentés. C'est pour ces raisons-là, qu'on est conduit à augmenter la tension des réseaux de transport. Evidemment, il y a une limite supérieure principalement constituée par le coût des isollements [3].

I.6.La ligne à haute tension

La ligne à haute tension constitue l'élément essentiel dans les infrastructures énergétiques de transport d'électricité. Elle permet l'acheminement de l'électricité des centrales électriques vers les centres de consommation. Les lignes peuvent être aériennes, souterraines, et parfois sous-marines. Dans notre étude, nous nous intéressons exclusivement à la ligne à haute tension aérienne.

Les lignes à haute tension aériennes sont composées de câbles conducteurs, généralement en alliage d'aluminium, suspendus à des supports, pylônes ou poteaux. Ces supports peuvent être faits de bois, d'acier, de béton, d'aluminium ou parfois en matière plastique renforcée.

Aujourd'hui, certaines lignes sont régulièrement exploitées à des tensions supérieures à 765kV. Les lignes à courant continu haute tension permettent de transporter l'énergie avec moins de pertes sur de très grandes distances et éventuellement sous l'eau.

I.7. Composants d'une ligne

Une ligne de transport se compose de conducteurs, d'isolateurs, de supports et de câbles de garde.

I.7.1. Conducteurs

Les conducteurs des lignes aériennes à très haute tension sont toujours nus. On emploie presque exclusivement des câbles en cuivre et des câbles en aluminium avec âme en acier, ces derniers sont généralement les plus économiques. Pour le domaine de la THT, le mode d'utilisation des conducteurs est identifié selon des causes technico-économiques pour remédier à plusieurs phénomènes, qu'ils sont souvent rencontrés en vue le transport de l'énergie électrique, comme les pertes par effet couronne, les pertes réactives de la ligne, les pertes par effet Joules...etc. Afin de réduire l'effet couronne par exemple, il est préférable d'utiliser la technologie des lignes en faisceau de conducteurs. Le faisceau est composé de 2, 3 ou 4 conducteurs (figure I-1). Parmi les effets de l'utilisation des faisceaux, l'augmentation de rayon équivalent de la phase et la réduction de l'intensité du champ électrique aux alentours du conducteur. « L'avantage le plus important de l'utilisation du faisceau de conducteurs est la réduction de la réactance de la ligne et des pertes par effet couronne » [4].

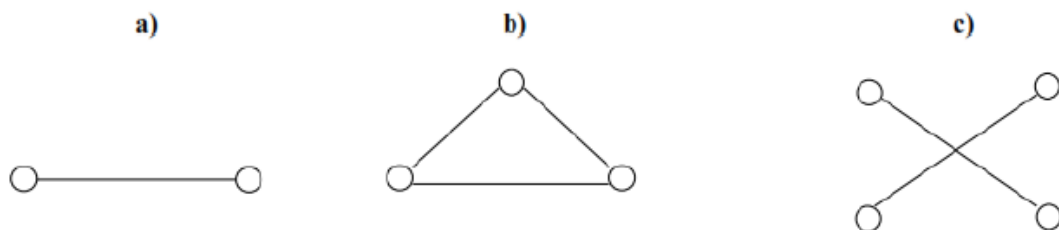


Figure I.1 : conducteurs en faisceau : a) à 2 conducteurs. b) à 3. c) à 4.

Les conducteurs hautes tensions sont aériens ou souterrains (et parfois-marins). Les conducteurs aériens sont soumis à l'action des facteurs atmosphériques : température, vent, pluie, verglas etc. Ces facteurs interviennent de façon importante dans le choix des paramètres d'une

ligne haute-tension : type de conducteur, hauteur et distance des pylônes, tension mécanique maximale sur le conducteur afin de maintenir une garde au sol suffisante, etc. Le choix de ces paramètres a une grande influence sur les coûts de construction et d'entretien d'une ligne de transport, ainsi que sur sa fiabilité et sur sa longévité. Pour toutes choses égales par ailleurs la position des conducteurs influe sur l'intensité et la disposition du champ électromagnétique. [5]

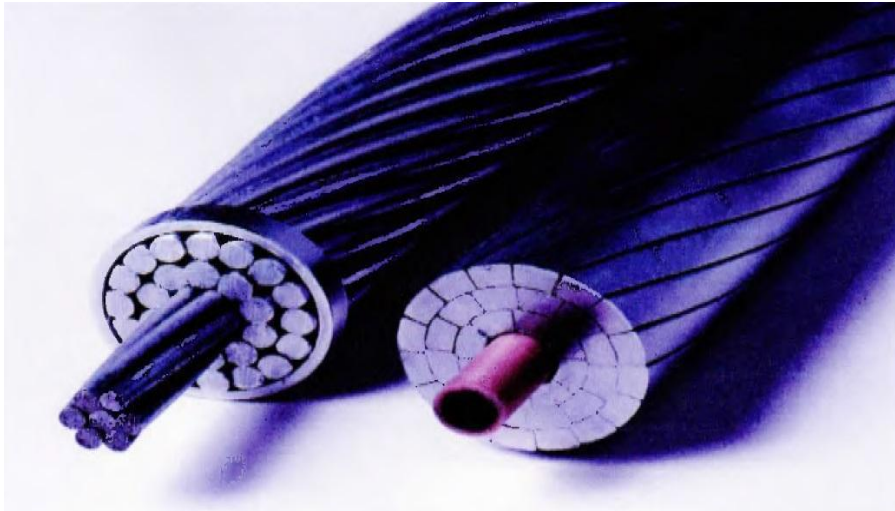


Figure 1.2: Conducteur conventionnel sur la gauche et à âme en fibre composite à droite

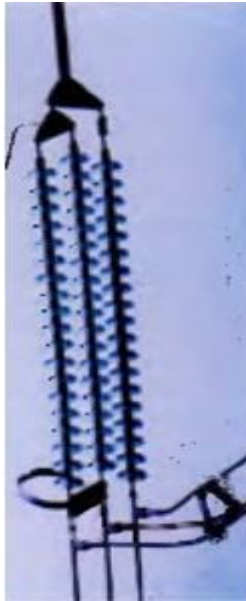
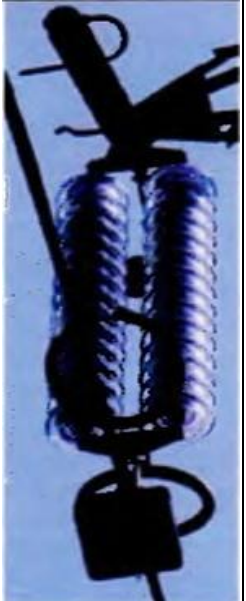




Conducteur conventionnel sur la gauche et à âme en fibre composite à droite, l'âme au centre assure les propriétés mécaniques, l'aluminium à l'extérieur les propriétés électriques du conducteur.

I.7.2. Isolateurs

Les isolateurs servent à supporter et à amarrer les conducteurs et à les isoler entre eux et de la terre. Ils sont presque toujours en porcelaine. Au point de vue électrique, les isolateurs doivent offrir une grande résistance d'isolement afin qu'ils ne soient ni contournés en surface, ni perforés à travers leur masse par les tensions élevées qu'ils ont à supporter normalement. Afin d'augmenter leur distance de contournement, on leur donne une forme de jupe. Au point de vue mécanique, ils doivent être assez résistants pour supporter les forces énormes dues au poids et à la tension mécanique des conducteurs. Les isolateurs sont de deux types principaux : rigides et à chaîne. La partie supérieure des isolateurs rigides sur laquelle est fixé le conducteur est constituée d'une ou de plusieurs jupes en porcelaine. Une tige vissée à l'intérieur des isolateurs permet de les fixer à un support. Pour des tensions supérieures à 70 kV, on emploie toujours des chaînes d'isolateurs constituées d'un certain nombre d'éléments en porcelaine réunis par des pièces métalliques. Le nombre d'éléments varie avec la tension : pour une tension de 110 (kV), on en admet de 4 à 7, pour

une tension de 230 (kV), de 13 à 16, comme il le montre le tableau I.1. En porcelaine réunis par des pièces métalliques. Le nombre d'éléments varie avec la tension : pour une tension de 110 (kV), on en admet de 4 à 7, pour une tension de 230 (kV), de 13 à 16, comme il le montre le tableau I.1. [1].

Tableau. I.1: Isolateurs utilisés pour les différentes lignes [1]

Type de Ligne	230/400 (420) kV	130/225 (245) kV	52/90 (100) kV	36/63 (72,5) kV	12/20 (24) kV	230/400 V
Appellation	400 kV	225 kV	90 kV	63 kV	20 kV	400 V
Classification	THT (HTB transport national)		HT (HTB transport régional)		MT (HTA Distribu-tion)	BT (consom-mation)
Nombre d'isolateurs	19	12 à 14	9	4 à 6	2 à 3	1
						

I.7.3. Supports

Pour les lignes aériennes, des pylônes, généralement réalisés en treillis d'acier supportent et maintiennent les conducteurs à une distance suffisante du sol et des obstacles : ceci permet de garantir la sécurité et l'isolement par rapport à la terre, les câbles étant nus (non isolés) pour en limiter le poids et le cout. L'inconvénient est leur exposition aux intempéries (embruns salés,

tempêtes, poids de la glace qui peut les endommager). La distance entre les fils conducteurs doit être suffisante pour empêcher leur contact, même sous l'action d'un vent violent. L'écartement entre les fils doit être d'autant plus grand que la distance entre les pylônes est plus grande et que la tension de la ligne est plus élevée. Par exemple, l'écartement entre les phases est habituellement de 12 m sur les lignes à 735 kV. [6]

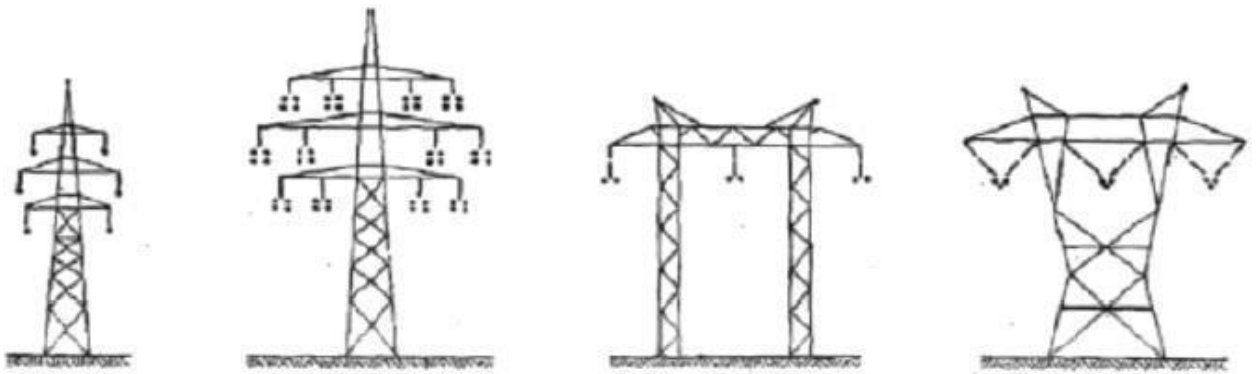


Figure I.3 : Types usuels de pylônes en treillis pour lignes à deux ou plusieurs ternes

I.7.4. Câbles de garde

Les câbles de garde sont posés au sommet des pylônes en treillis. Ces câbles de gardes protègent les conducteurs d'électricité de la foudre. Ils relient en outre les pylônes isolés les uns avec les autres et améliorent ainsi la mise à la terre globale de l'ensemble des lignes aériennes. Malgré leur faible section, ils doivent présenter une sécurité mécanique équivalente à celle des conducteurs en cas de vent violent ou de surcharge de givre ou de neige. Il est donc impératif qu'ils soient calculés avec les mêmes hypothèses climatiques que les conducteurs et que les efforts qu'ils génèrent dans les supports soient pris en compte dans leur totalité. Cette condition est contraignante car la faible longueur des suspensions sur les supports d'alignement ne permet qu'un faible amortissement, dans les portées adjacentes, d'une surtension mécanique provoquée par une surcharge localisée. Électriquement, ils doivent assurer l'interconnexion des mises à terre des supports et tolérer les échauffements provoqués par les courants de court-circuit et les courants générés par la foudre. Pour satisfaire à ces conditions, les câbles de garde comportent toujours une section importante d'acier et, autour de l'âme d'acier, une couche ou exceptionnellement deux couches de fils d'aluméc. Deux types de câbles de garde sont utilisés : — des câbles aluméc-acier normaux ; — des câbles aluméc-acier comportant à l'intérieur des circuits de télécommunication [3].

I.8. Classification de la ligne électrique en termes de qualité

I.8.1. Tension électrique

La tension d'un circuit est désignée selon les principes suivants :

I.8.1.1. Basse tension

Les câbles d'alimentation et de commande basse tension sont utilisés pour l'alimentation électrique des systèmes d'installation basse tension. Ils sont généralement utilisés dans diverses applications intérieures et extérieures dans les centrales électriques, les projets industriels et d'infrastructure, et dans la distribution d'électricité à diverses charges résidentielles et commerciales.

L'objectif de ce catalogue est de fournir une vue détaillée des informations techniques de la basse tension d'Alfanar.

Câbles d'alimentation et de contrôle. Ce catalogue couvre les gammes de produits suivantes[7]:

- Gamme de câbles CEI 60502-1.
- Gamme de câbles BS 7889 et BS 5467.
- Gamme de câbles pour applications spéciales.

➤ Désignation de tension :

Câbles normalement désignés par les tensions U_0 , U & U_m exprimées sous la forme $U_0/U(U_m)$.

U_0 : La tension assignée à fréquence industrielle entre le conducteur et la terre ou l'écran métallique pour laquelle le câble est conçu.

U : La tension à fréquence industrielle nominale entre les conducteurs pour laquelle le câble est conçu.

U_m : La valeur maximale de la "tension de réseau la plus élevée" pour laquelle l'équipement peut être utilisé.

Les produits spécifiés dans ce catalogue sont destinés à être utilisés pour la fourniture d'énergie électrique jusqu'à la tension nominale de 0,6/1 (1,2) kV, dans une plage de fréquence industrielle nominale de 49 Hz à 61 Hz. Ces cotes ne doivent pas être dépassées. [3]

I.8.1.2 Effort moyen

Les câbles moyenne tension ont des caractéristiques de conception communes indépendantes de la tension nominale et de la fréquence de fonctionnement.

Les composants qui déterminent essentiellement le comportement électrique et thermique du câble sont le conducteur, l'isolation avec des couches semi-conductrices intérieures et extérieures et l'écran métallique.

Câbles moyenne tension de tensions nominales de 6 kV à 30 kV (la tension nominale de 35 kV est définie et incluse dans certains pays, comme l'Arabie saoudite) sont conçus comme des câbles dits de champ radial.

L'isolation principale en XLPE d'un câble moyenne tension peut être considérée comme un cylindre homogène. Sa distribution sur le terrain ou gradient de tension est donc représenté par un champ radial homogène. La valeur du gradient de tension à un le point x à l'intérieur de l'isolant peut donc être calculé comme suit [8]:

$$E_x = \frac{U_0}{r_x \cdot \ln\left(\frac{r_a}{r_i}\right)} \text{ (KV/mm)} \quad (\text{I.1})$$

U_0 : Tension de fonctionnement (kV).

r_x : Rayon à la position x.

r_a : Rayon extérieur sur isolation.

r_i : Rayon de la couche semi-conductrice interne

L'intensité du champ électrique est maximale à l'intérieur couche semi-conductrice et minimum au-dessus de l'isolant (sous la couche semi-conductrice externe, où $r_x = r_a$). [4]

I.8.1.3. Haute tension

Ce catalogue traite des circuits de puissance souterrains comportant un câble triphasé isolé en tension alternative avec une tension nominale entre 66 et 230 kV. Ces lignes sont principalement utilisées dans les lignes de transmission entre deux unités d'un réseau de distribution d'électricité, un groupe électrogène et un groupe de distribution ou à l'intérieur d'une station ou d'une sous-station. Celles-ci des circuits de.

➤ Exemple:

$U_0 / U (U_m)$: 127/220 (245) Où

$U_0 = 127$ kV tension phase-terre,

$U =$ tension entre phases assignée de 220 kV,

$U_m = 245$ kV tension la plus élevée autorisée du réseau câbles isolés peuvent également être utilisées en conjonction avec des lignes aériennes.

- La tension phase-terre, notée U_0 , est la valeur efficace de la tension entre le conducteur et le sol ou l'écran métallique.
- La tension nominale, désignée U , est la tension efficace entre phases.
- La tension maximale, désignée U_m , est la tension la plus élevée autorisée pour laquelle l'équipement est spécifié. [5]

I.8.2. Conducteurs

Les conducteurs sont constitués de matériaux qui conduisent un courant électrique ou un flux d'électrons. Les métaux non magnétiques sont généralement considérés comme des conducteurs d'électricité idéaux. L'industrie du fil et câble utilise une variété de conducteurs métalliques, mais les deux plus courantes sont en cuivre et en aluminium. Les conducteurs se distinguent par des propriétés telles que la conductivité, la résistance à la traction, le poids et l'exposition environnementale.

I.8.2.1. Conducteurs en cuivre

Le cuivre est un des plus anciens matériaux connus. Sa ductilité et sa conductivité électrique ont été exploitées par les premiers expérimentateurs de l'électricité, comme Benjamin Franklin et Michael Faraday. Le cuivre était le conducteur utilisé dans les inventions telles que le télégraphe, le téléphone et le moteur électrique. [6]

I.8.2.2. Conducteurs en aluminium

Même si le cuivre est un conducteur d'électricité de choix depuis longtemps, l'aluminium présente certains avantages qui le rendent attrayant pour certaines applications. La conductivité de l'aluminium par rapport au cuivre est de 61 %, mais le poids de l'aluminium est 30 % inférieur. Cela signifie qu'un fil d'aluminium nu ne pèse que la moitié d'un fil de cuivre nu avec la même résistance électrique. L'aluminium est généralement moins coûteux, comparativement aux conducteurs en cuivre. Les conducteurs en aluminium se composent de différents alliages connus sous le nom de série AA-1350 et série AA-8000 La série AA-1350 contient, au minimum, 99,5 % d'aluminium. Dans les années 1960 et 1970, en raison du prix élevé du cuivre par rapport à celui de l'aluminium, ce calibre d'aluminium a commencé à être utilisé pour le câblage domestique. En raison de la faible qualité de fabrication des connexions et des différences physiques entre l'aluminium et le cuivre, des connexions à haute résistance se sont formées et ont présenté des risques d'incendie. Par conséquent, des alliages en aluminium ont été développés pour que les propriétés de fluage et d'allongement soient plus semblables à celles du cuivre. Les alliages de série AA-8000 sont les seuls conducteurs en aluminium monobrin ou multibrin autorisés

conformément à l'Article 310 du 2014 National Electric Code*. Les alliages de série AA-8000 répondent aux normes ASTM B800, Standard Specification for 8000 Series Aluminum Alloy Wire for Electrical Purposes-Annealed and Intermediate Tempers. [6]

I.8.2.3. Comparaison

Si l'aluminium est utilisé dans une application où le cuivre a été auparavant utilisé, il est généralement suffisant d'utiliser des conducteurs en aluminium de deux tailles AWG au-dessus à ceux en cuivre.

Vous trouverez ci-dessous une comparaison entre l'aluminium et le cuivre pour la même application.

Tableau I.2. Comparaison entre l'aluminium et le cuivre

Comparaison des propriétés XHHW-2	Aluminium de série AA-8000	cuivre
Taille AGW pour 60A à 75°C	6	8
Poids par 1000 pi	39 Ib	65Ib
Diamètre nominal	0.26 po	0.23po
Tension de traction maximale	157Ib	Ib 132

Les connecteurs doivent être conçus pour être utilisés avec de l'aluminium. Les connexions homologuées pour l'aluminium peuvent souvent être utilisées avec du cuivre, et sont marquées comme telles, comme le AL7CU, un connecteur utilisable avec des conducteurs en cuivre et en aluminium à 75°C. Dans les applications où les connexions doivent être soudées, il est préférable d'utiliser du cuivre ou du cuivre étamé, car l'aluminium est difficile à souder. [9]

I.9. Construction d'une ligne

Une fois que la section des conducteurs, la hauteur des pylônes et la distance entre les pylônes (portée) ont été déterminées, on peut procéder à la pose des conducteurs. Un fil supporté et tendu entre deux pylônes n'est pas horizontal ; il prend plutôt une forme d'une chaînette. La distance verticale entre la droite qui joint les deux points de support et le point le plus bas d'un fil porte le nom de flèche. Plus le fil est tendu, plus la flèche est courte. Avant d'entreprendre la construction d'une ligne, il importe d'en faire le calcul mécanique pour déterminer la flèche et la tension mécanique admissibles. Entre autres, on doit tenir compte de la température maximale d'été. D'une part, la flèche ne doit pas être trop longue à ce moment, car autrement, le fil s'allongera

durant les chaleurs d'été et la distance entre son point le plus bas et le sol ne sera plus suffisante au point de vue sécuritaire. D'autre part, la tension mécanique ne doit pas être trop grande, car autrement, le fil peut se contracter pendant les froids d'hiver et devenir dangereusement tendu. De plus, le vent et le verglas peuvent créer des efforts supplémentaires qui risquent d'entraîner sa rupture. [7]

I.9.1. Lignes galopantes

Lorsqu'une couche de verglas se dépose sur une ligne en présence de vent, la ligne se met à osciller. Si les conditions sont favorables, ces oscillations peuvent devenir très grandes ; on dit alors que la ligne se met à « galoper ». Ce phénomène peut produire des courts circuits entre les phases ou la rupture des conducteurs. Pour éviter ces problèmes, on pose parfois sur les conducteurs des amortisseurs qui empêchent les oscillations de se développer. [7]

I.9.2. Effet couronne - interférences radiophoniques

Les très hautes tensions électriques créent des décharges importantes autour des conducteurs (effet couronne). Ces décharges produisent des pertes le long de la ligne et, de plus, elles possèdent un spectre de fréquences radiophoniques qui brouille la réception sur les postes de radio et les téléviseurs situés dans le voisinage de la ligne. Pour réduire l'effet couronne, on diminue le champ électrique créé par les conducteurs en grossissant leur diamètre ou en les arrangeant en faisceaux de deux, trois ou quatre conducteurs par phase.

Comme cet arrangement diminue aussi l'inductance de la ligne, on augmente du même coup la puissance qu'elle peut transporter. [7]

I.9.3. Pollution

La poussière, les acides, le sel et les autres polluants qu'on retrouve dans l'atmosphère se déposent sur les isolateurs et diminuent leurs propriétés isolantes. Cette pollution des isolateurs risque de produire du court-circuit pendant les orages ou lors de surtensions momentanées.

L'interruption du service et la nécessité de nettoyer ou de remplacer les isolateurs sont donc un souci constant créé par la pollution. [7]

I.9.4. Mise à la terre des pylônes

On relie les pylônes des lignes de transport à des prises de terre exécutées avec grande précaution afin de leur assurer une faible résistance. En effet, si la foudre frappe un pylône, il ne faut pas que la chute de tension provoquée par le courant dans la prise de terre dépasse la tension de contournement des isolateurs. [7]

I.10. Modes d'utilisation des lignes électriques

Nous prendrons deux positions, la position des lignes aériennes et câbles souterrains.

I.10.1. Réseaux HTA aériennes

Les zones rurales à faible densité de charge sont alimentées par des lignes HTA aériennes en simple dérivation (figure I.4), traditionnellement moins coûteuses que les câbles souterrains.

Le dimensionnement de ces ouvrages est lié aux chutes de tension maximales admissibles en raison de l'éloignement des charges à desservir. [8]

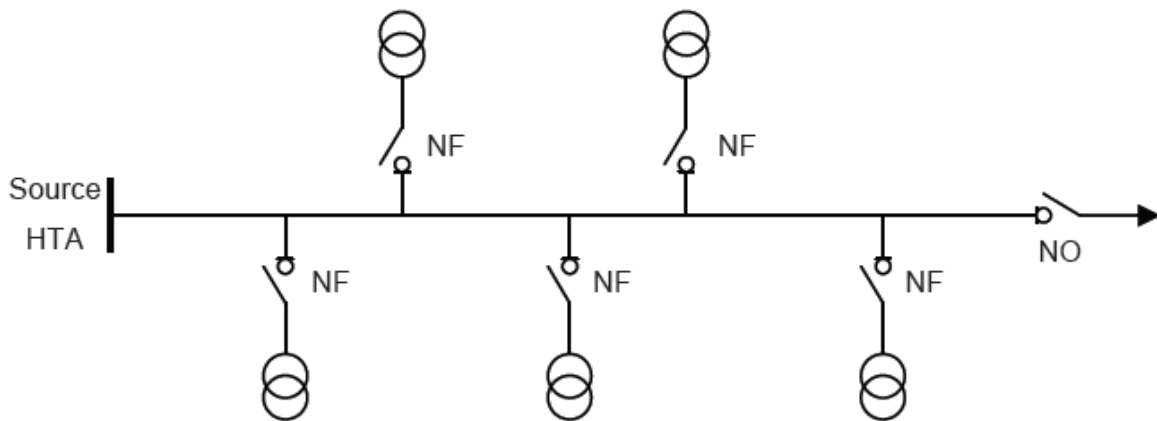


Figure I.4 : Réseau HTA aérienne en Simple dérivation.

NF désigne un interrupteur normalement fermé, et NO un interrupteur normalement ouvert.

I.10.2 Réseaux HTA souterrains

Les zones urbaines ou mixtes à forte densité de charge sont alimentées par des câbles HTA enterrés en double dérivation (figure I.5) ou en coupure d'artère (figure I.6). En double dérivation, les postes HTA/BT sont normalement alimentés par le câble de travail (CT), le câble de secours (CS) permet de garantir une bonne continuité de service en cas de défaut. La technique en coupure d'artère est moins coûteuse que la précédente et permet une isolation rapide des défauts, mais nécessite un temps d'intervention plus long.

Le dimensionnement des ouvrages souterrains est principalement lié aux courants admissibles dans les câbles en raison de la densité des charges à desservir. [8]

Les ouvrages de distribution neufs ou les rénovations en zones rurales sont également réalisés en câble enterré depuis les années 1990, en raison de la baisse notable du surcôt lié à cette technique.

De plus, une volonté politique croissante de qualité environnementale tend à la réduction de l'impact visuel des ouvrages. [8]

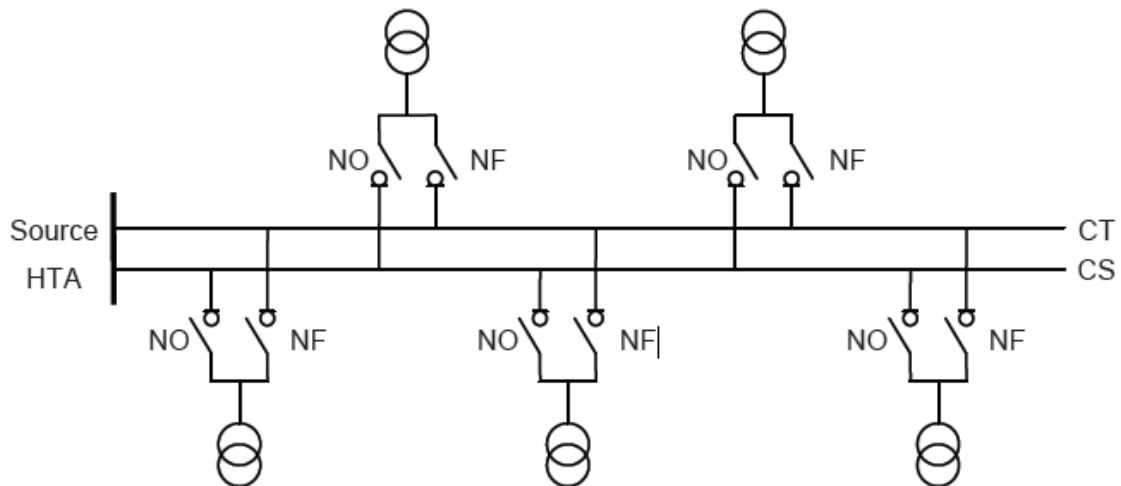


Figure I.5 : Réseaux HTA souterrains en Double dérivation

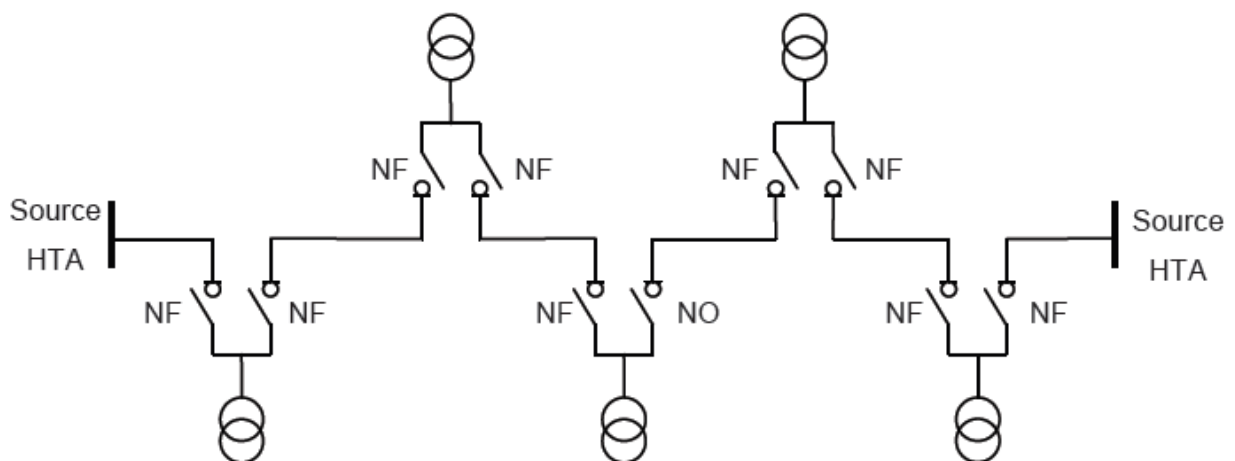


Figure I.6 : Réseaux HTA souterrains en Coupure d'artère

I.11. Avantages et inconvénients respectifs des lignes aériennes et câbles souterraines

Les lignes aériennes et les câbles souterrains présentent des avantages et des inconvénients dans l'exploitation et la maintenance du réseau. L'expérience en matière d'exploitation de lignes câblées souterraines à très haute tension est minime dans le monde entier. Les problèmes techniques, comme le maintien de la tension, augmentent proportionnellement au nombre de tronçons enterrés du réseau de transport. En effet, les deux technologies présentent différentes

caractéristiques électriques qui ont des répercussions sur la stabilité et la disponibilité du réseau de transport. [9]

I.11.1. Lignes aériennes

a. Avantages

- Sont moins coûteuses que les câbles souterrains au point de vue des frais d'installation et de réparation ;
- Permettent une surveillance aisée de leur état et un repérage facile des accidents et défauts ; peuvent être réparées très rapidement en cas d'accident ou de défaut.
- Peuvent être surchargées en intensité de courant sans trop de danger. [9]

b. Inconvénients

- Sont exposées aux surtensions d'origine atmosphérique ;
- Leur installation donne lieu à de difficiles discussions avec les propriétaires des terrains surplombés ;
- Soulèvent des problèmes d'esthétique et de respect des sites ;
- Sont susceptibles d'induire des forces électromotrices perturbatrices ou dangereuses dans les circuits de télécommunication ;
- Sont susceptibles de produire des perturbations radioélectriques gênant les réceptions de radiodiffusion et de télévision ;
- La rupture de leurs conducteurs est susceptible de présenter des dangers pour les personnes, les animaux.
- Selon certains scientifiques, les champs électriques et magnétiques peuvent exercer une influence néfaste sur la santé. [9]

I.11.2. Câbles souterraines

a. Avantages

- Constituent la seule solution possible dans les agglomérations denses ;
- Sont soustraites aux surtensions d'origine atmosphérique ;
- Ne causent pas d'interférences avec les circuits de télécommunications et les réceptions de radiodiffusion et télévision ;
- Seule solution possible pour traverser de larges fleuves ou des bras de mer lorsque la distance franchir dépasse 3 km. [10]

b. Inconvénients

- Sont d'un coût beaucoup plus élevé que celui des lignes aériennes. La différence est d'autant plus grande que la tension est plus élevée ;
- Le repérage des défauts y est délicat et lent,
- Les réparations sont coûteuses et parfois malaisées ;
- Leurs armures et gaines doivent être protégées contre les effets de corrosion dus aux courants vagabonds,
- Risquent d'être détériorés en cas de mouvements de terrains (particulièrement à craindre dans les régions minières),
- Leur isolement est susceptible d'être détérioré par élévation de température des conducteurs en cas de surcharge. [10]

I.12. Conclusion

Les lignes de transport aériennes sont constituées de conducteurs en aluminium (ACSR), d'isolateurs sur les lignes HT. On utilise généralement, pour chaque phase, des conducteurs en faisceaux afin de diminuer les pertes d'énergie et les interférences radiophoniques dues à l'effet couronnement. Des fils de garde en acier protègent la ligne contre la foudre. De plus, afin d'éviter les surtensions résultantes des courants de décharges de foudre, chaque pylône est solidement mis à la terre.

Chapitre II

**Etude électrique et
modélisation de la ligne**

II.1. Introduction

Le rôle fondamental d'une ligne est de transporter une puissance active. Si elle doit également transporter une puissance réactive, celle-ci doit être faible par rapport à la puissance active.

II.2. Exigences d'une ligne de transport

Une ligne de transport doit posséder les caractéristiques de base suivantes :

- La tension doit demeurer assez constante sur toute la longueur de la ligne et pour toutes les charges comprises entre zéro et la charge nominale.
- Les pertes doivent être faibles afin que la ligne possède un bon rendement
- Les pertes Joule ne doivent pas faire surchauffer les conducteurs
- Si la ligne ne peut d'elle-même répondre à ces exigences, on doit alors ajouter de l'équipement supplémentaire afin de réaliser toutes ces conditions.

II.3. Paramètres de la ligne

II.3.1. Circuit équivalent d'une ligne

Malgré leur grande diversité, les lignes possèdent des propriétés électriques communes.

En effet, toute ligne possède une résistance, une réactance inductive et une réactance capacitive. Ces impédances sont réparties uniformément sur toute la longueur de la ligne si bien qu'on peut représenter la ligne par une série de sections R, L, C identiques (Figure II.1).

Chaque section représente un tronçon de ligne d'une longueur donnée (1 km, par exemple) et les éléments r , X_L , X_C représentent les impédances correspondantes pour cette longueur.[11]

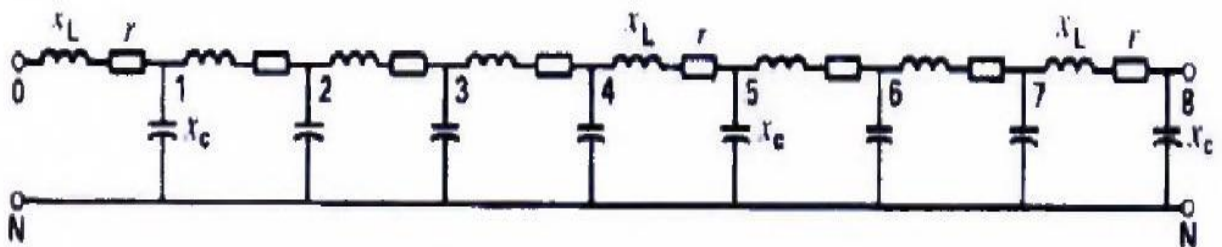


Figure II.1 : Circuit équivalent d'une ligne.

On peut simplifier le circuit de la Figure II.1 en additionnant les résistances individuelles pour former une résistance totale R . De la même façon, on obtient une réactance inductive totale X_L et une réactance capacitive totale X_C (en dérivation). On divise la réactance capacitive X_{Cen} deux éléments de valeurs $2 X_C$ localisés aux deux extrémités de la ligne.

Parfois, on peut simplifier le circuit davantage en éliminant un, deux ou tous les éléments de la Figure II.1. On obtient alors un circuit en π simplifié (circuit à paramètres concentrés). La validité de cette simplification dépend de l'importance relative des puissances P_J , Q_L , Q_C associées à chacun des éléments par rapport à la puissance active P fournie à la charge. En se référant à la Figure II.2, ces puissances sont [12] :

P = puissance active absorbée par la charge.

$P_J = R \cdot i^2$, puissance active dissipée dans la ligne par effet Joule.

$Q_L = X_L \cdot i \cdot z$, puissance réactive absorbée par la ligne.

$Q_C = E_2^2 / X_C$, puissance réactive générée par la ligne.

Si l'une de ces puissances est négligeable par rapport à la puissance active (P) transportée, on peut négliger l'élément de circuit correspondant.

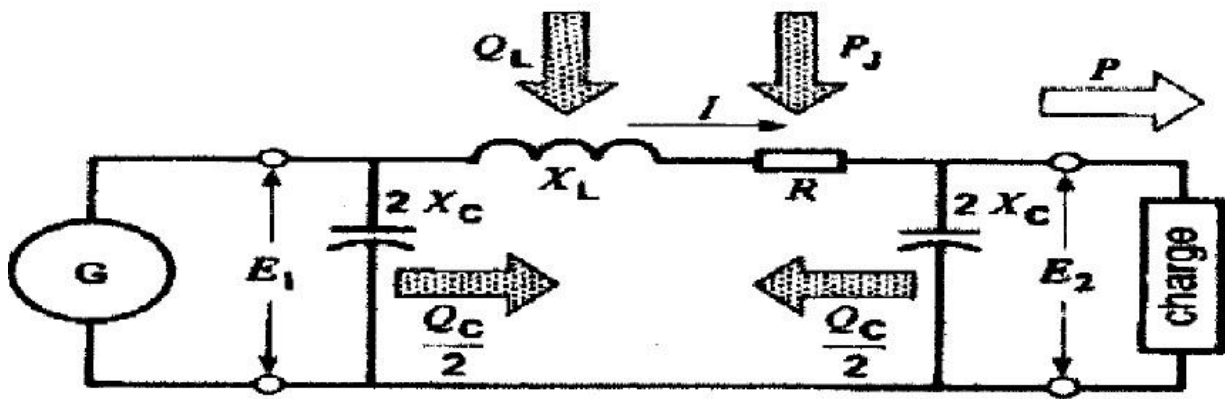


Figure II.2: Circuit équivalent d'une ligne simplifié.

II.3.2. Résistance de la ligne

La résistance linéique des conducteurs est habituellement fournie par les fabricants à 20°C en courant continu, et doit être déterminée à la température d'exploitation et à la fréquence utilisée. La résistance linéique à courant continu à la température d'exploitation (θ) s'exprime par: [13]

$$R_{\theta} = R_{20}[1 + \alpha(\theta - 20)] \quad (\text{II.1})$$

$$R_{20} = \left| \frac{\xi \cdot p \cdot l}{S} \right| = \frac{p}{k \left(\pi \frac{d^2}{4} n \right)} \quad (\text{II.2})$$

p : résistivité des matériaux utilisés pour les lignes ($\Omega \cdot m$)

n : nombre de brins dans le conducteur (mm)

k: facteur donné par le constructeur.

d: diamètre de chaque brin (m).

Afin de limiter les pertes par effet Joule, on souhaite que la résistance R soit la plus faible. La longueur l de la ligne étant imposée, on ne peut jouer que sur la résistivité ρ du matériau conducteur et sur sa section S. Le cuivre, dont la résistivité vaut $1.72.10^{-8}(\Omega.m)$, n'est pas utilisé car trop coûteux, mais surtout trop lourd pour les lignes aériennes. On lui préfère des ensembles aluminium-acier ou des alliages aluminium, magnésium et silicium dont la résistivité est de l'ordre de $3.10^{-8}(\Omega.m)$.

II.3.3. Inductance de la ligne

II.3.3.1. Inductance d'un seul conducteur

Tout mouvement d'électrons (courant) dans un conducteur (fil) donne la naissance d'un champ magnétique au tour de fil, formant des cercles concentriques proportionnels à l'intensité du courant qui traverse le conducteur.

La direction donnée par la règle de la main droite ~ avec le pouce se dirigeant dans la direction du courant, les doigts de la main indiquant la direction du champ magnétique.

Quand le courant change, le flux change ainsi que la tension induite dans le circuit. Par définition, pour un matériau non magnétique, l'inductance L est le rapport de flux magnétique de liaison totale Φ et le courant I, donné par [14]:

$$L = \frac{\Phi}{I} \quad (\text{II.3})$$

Φ : Est le flux de liaison, en weber. Tours

Considérer un conducteur cylindrique long dont le rayon est (r), dans lequel circule un courant (I) représenté sur la figure II.3 :

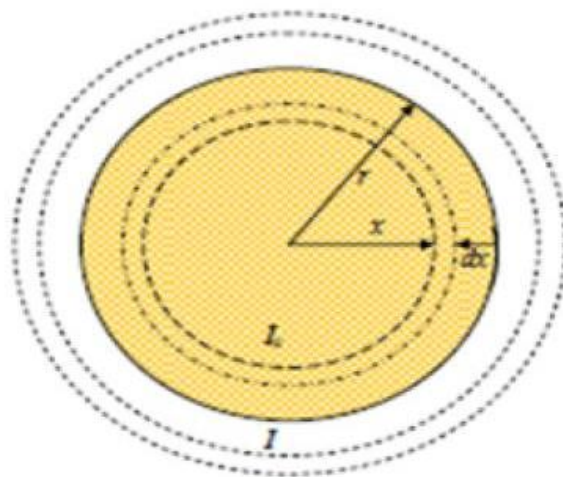


Figure II.3 : Flux de liaison d'un conducteur cylindrique long [13]

L'intensité de champ magnétique H_x . Autour d'un cercle du rayon x , est constante et tangent à ce cercle, la loi d'ampère reliant H , au courant I_x est donnée près :

$$\int_0^{2\pi x} H_x dI = I_x \quad (\text{II.4})$$

Ou bien:

$$H_x = \frac{I_x}{2 \cdot \pi \cdot x} \quad (\text{II.5})$$

I_x : est le courant cerné à l'intérieur de cylindre de rayon x .

L'inductance d'un conducteur peut être définie comme la somme des contributions du flux de liaison intérieur et extérieur du conducteur.

II.3.3.2. Inductance interne

Si on néglige l'effet de peau et en supposant une densité de courant uniforme dans toute la section du conducteur, on aura une simple expression pour le flux de liaison intérieur [6] :

$$\frac{I}{\pi r^2} = \frac{I_x}{\pi x^2} \quad (\text{II.6})$$

En remplaçant I_x dans l'équation (II.5), on trouve :

$$H_x = \frac{I}{2\pi r^2} x \quad (\text{II.7})$$

Pour un conducteur non magnétique d'une perméabilité constante μ_0 ; l'induction magnétique est donné par la relation:

$$B_x = \mu_0 \cdot H_x \quad (\text{II.8})$$

Ou bien:

$$B_x = \frac{\mu_0 \cdot I}{2\pi r^2} x \quad (\text{II.9})$$

μ_0 est la perméabilité de vide (ou de l'air) et est égal à $4\pi \cdot 10^{-7}$ H/m.

L'inductance due au flux de liaison intérieur est donné par:

$$L_{int} = \frac{\mu_0}{8\pi} = \frac{1}{2} 10^{-7} \quad (\text{II.10})$$

Il est à noter que l'inductance interne L_{int} est indépendante du rayon r de conducteur.

L'inductance entre deux points à l'extérieur de conducteur (voir la figure II.4) est donnée par [11] :

$$L_{int} = 2 \cdot 10^{-7} \ln \frac{D_2}{D_1} \quad (\text{II.11})$$

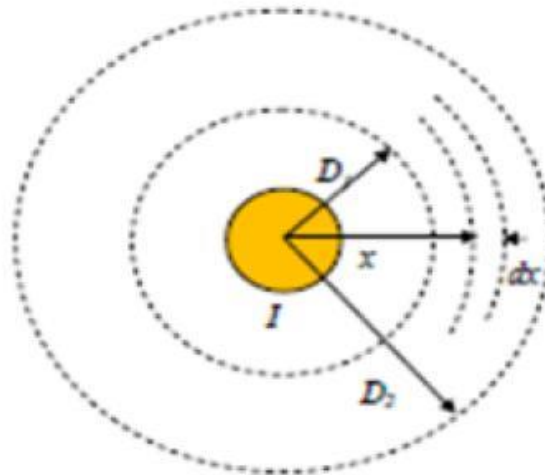


Figure II.4 : Flux de liaison entre D_1 et D_2 [13]

II.3.3.3. Inductance d'une ligne de transport triphasée

Dans une ligne de transport triphasée il y a une interaction entre les phases et une interaction entre chaque phase et la terre.

Si on considère une ligne triphasée d'une longueur d'un mètre, composée de trois conducteurs chacun a un rayon r , ces conducteurs sont arrangés symétriquement (triangle équilatéral) ou bien en forme plane comme montrée dans la figure II.5:

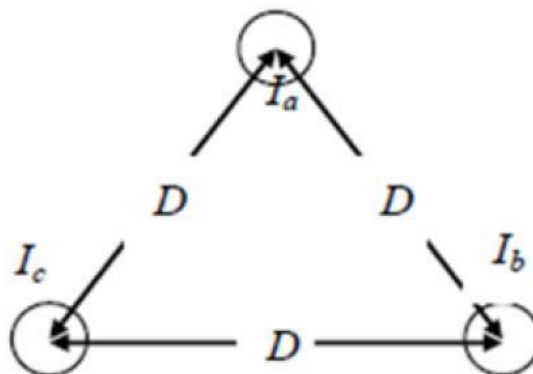


Figure II.5 : Ligne triphasé arrangée symétriquement [13]

L'inductance par phase par pour 1 kilomètre de longueur est :

$$L = 0.2 \ln \frac{D}{GMR} \quad (\text{II.12})$$

$$GMD = \sqrt[3]{D_{12}D_{13}D_{23}} \quad (\text{II.13})$$

II.3.4. Réactance de la ligne

Dans notre travail, l'inductance de la ligne est notée par X (appelée aussi la réactance de la ligne) ainsi que la réactance linéique est notée par x_0 . [15]

D'où : $X = x_0 l$; (l : la longueur de la ligne)

$$GMD = 0.1445 \log \frac{DMG}{r_{eq}} + \frac{0.0157}{n} \quad (\text{II.14})$$

$$r_{eq} = \sqrt{a \cdot r_c} \quad (\text{II.14})$$

DMG: la distance moyenne géométrique (m)

n: nombre de conducteur par faisceaux

a: Le pas du faisceau (cm)

r_c : Le rayon du conducteur (cm)

r_{eq} : le rayon équivalent du faisceau (cm)

II.3.5. Capacité de la ligne

On peut assimiler les lignes aériennes à un condensateur qui est constitué de deux conducteurs (les conducteurs de phase et la terre). A cause de la présence des charges, sur ces deux conducteurs, le potentiel a des valeurs différentes. Si on prend comme valeur du potentiel de la terre la valeur zéro (la référence), la valeur de la tension du conducteur de phase représente la différence de potentiel. [6]

La relation linéaire qui lie la charge électrique (q_1, q_2) sur les deux conducteurs et la différence de potentiel entre ceux-ci est donnée par :

$$C = q/u \quad (\text{II.16})$$

II.3.5.1. Capacité d'une ligne monophasée

On considère une ligne monophasée d'un mètre de longueur composée de deux conducteurs cylindriques pleins qui ont un rayon r (voir la figure II.6) :

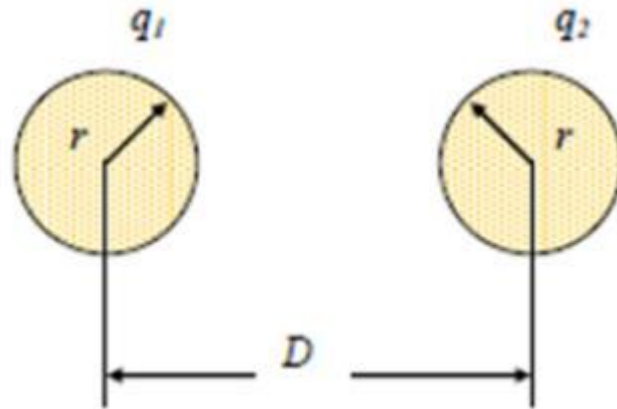


Figure II.6 : Ligne monophasé à deux fils [13]

II.3.5.2. Capacité d'une ligne triphasée

C'est la même forme que l'expression de la capacité d'une phase dans une ligne monophasée. Le DMG est la distance équivalente entre conducteurs. Pour une ligne triphasée le DMG est la racine cubique des produits des trois distances de phases.

II.3.6. Susceptance de la ligne

La susceptance de la ligne due à l'effet capacitive entre chaque phase et la terre est déterminée par l'expression [15]:

$$b_0 = \frac{7.58}{\log \frac{DMG}{r_{eq}}} \quad (\text{II.17})$$

II.3.7. Impédance caractéristique

L'impédance caractéristique de la ligne sera calculée par la relation :

$$Z_c = \sqrt{\frac{r_0 + jx_0}{g_0 + jb_0}} \quad (\text{II.18})$$

La résistance r_0 et la conductance g_0 peuvent être négligées dans les lignes courtes (<80km) par ce que $r_0 \ll x_0$ et $g_0 \ll b_0$ donc [15] :

$$Z_c = \sqrt{\frac{x_0}{b_0}} \quad (\text{II.19})$$

II.3.8. Calcul du champ électrique superficiel des conducteurs

En haute tension, le diamètre du conducteur doit être suffisamment grand pour minimiser les pertes d'énergie dues à l'effet « couronne ». [15]

Un faisceau est caractérisé par les grandeurs suivantes :

n : nombre de conducteurs élémentaires.

R : rayon du faisceau.

a : distance entre deux conducteurs consécutifs

R donné par la relation :

$$R = \frac{a}{2 \sin \frac{\pi}{n}} \quad (\text{II.20})$$

a est définie par la relation :

$$a = 2 \cdot R \cdot \sin(\pi/n) \quad (\text{II.21})$$

R_{eq} : rayon équivalent du faisceau qui représente le rayon d'un conducteur cylindrique unique, fictif qui aurait les mêmes capacités que le faisceau réel par rapport à tous autres conducteurs avoisinants. Il est défini par la relation :

$$r_{eq} = \sqrt[n]{R^{(n-1)} \cdot n \cdot r_c} \quad (\text{II.22})$$

Pour le calcul du champ créé à la surface du conducteur d'un faisceau, on détermine d'abord la charge totale Q de celui-ci en introduisant son rayon équivalent dans les expressions des coefficients du potentiel.

La relation du gradient moyen d'un conducteur est donnée par :

$$E_{moy} = \frac{Q}{2 \cdot \pi \cdot n \cdot r_c \cdot \epsilon_0} \quad (\text{II.23})$$

Ou :

$$Q = C \cdot U_n \quad (\text{II.24})$$

D'après les équations (II.17) et (II.23), on introduit la notion du champ moyen :

$$E_{moy} = \frac{0.354 \cdot U_n}{n \cdot r_c \cdot \log \frac{DMG}{r_{eq}}} \quad (\text{II.25})$$

Avec :

C : la capacité linéique de fonctionnement de la ligne (F/m).

U_n : La tension nominale de la ligne (kV)

ϵ_0 : la permittivité dans le vide (F/m)

Puisque la charge totale du faisceau se répartie uniformément sur les n conducteurs du faisceau, sous l'effet de blindage mutuel, le gradient réel est plus important vers l'extérieur et la relation du champ maximal des conducteurs est donnée par [16] :

$$E_{max} = E_{moy} \left(1 + \frac{(n-1) \cdot r_c}{R} \right) \quad (\text{II.26})$$

L'expression devient :

$$E_{max} = E_{moy} * k \quad (\text{II.27})$$

Avec :

$$k = 1 + \beta \frac{r_c}{a} \quad (\text{II.28})$$

$$\beta = 2(n-1) \sin\left(\frac{\pi}{n}\right) \quad (\text{II.29})$$

II.4. Circuits équivalents des lignes électriques

Dans une ligne électrique, quel que soit la portion prise, on enregistre une différence de tension ΔV et de courant Δi (entre l'entrée et la sortie de cette portion). $\Delta V = VM' - VM$ est dû aux paramètres longitudinaux de la ligne (R', L') et $\Delta i = i' - i$ est dû aux paramètres transversaux (C', G'). Il en résulte qu'une ligne d'énergie électrique est un circuit à constante uniformément réparties et que par conséquent ses équations de fonctionnement doivent être établies, en considérant des éléments de longueurs infiniment petites à l'aide d'équations différentielles par rapport à la variable x .

II.4.1. Equations générales de fonctionnement des lignes électriques

Soit une ligne de longueur l de paramètres linéiques R', L', G' et C' , montré sur la figure II.7.

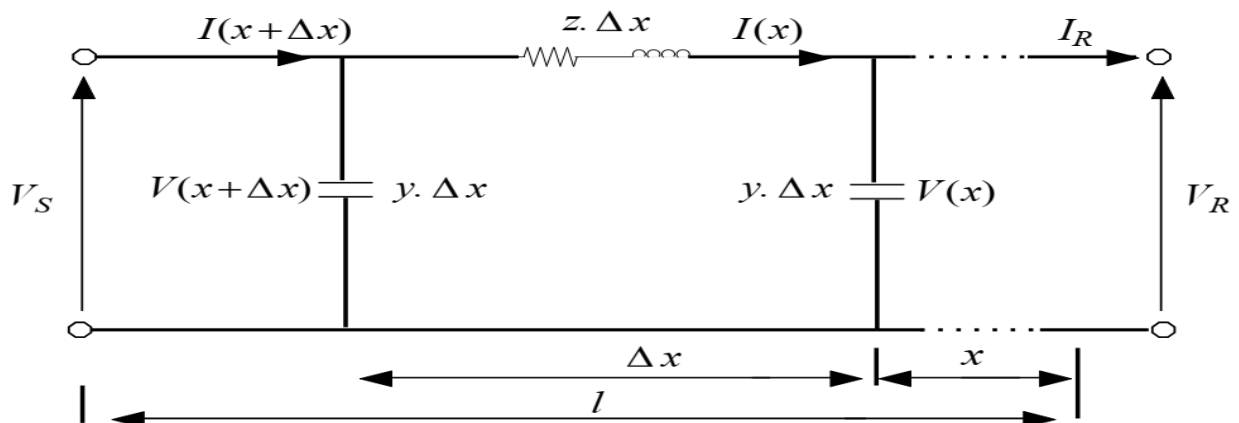


Figure II.7 : Schéma unifilaire en π d'une ligne électrique.[17]

En notant Z' l'impédance longitudinale par unité de longueur, et Y' l'admittance transversale par unité de longueur,

$$\begin{cases} Z' = R' + jL'\omega \\ Y' = G' + jC'\omega \end{cases} \quad (\text{II.30})$$

Les équations aux dérivées partielles sont obtenues comme suit :

✓ **Pour les tensions**

$$V(x + \Delta x) = Z' \cdot \Delta x \cdot I(x) + V(x) \quad (\text{II.31})$$

$$\frac{V(x + \Delta x) - V(x)}{\Delta x} = Z' \cdot I(x) \quad (\text{II.32})$$

Comme $\Delta x \rightarrow 0$

$$\frac{dV(x)}{dx} = Z' \cdot I(x) \quad (\text{II.33})$$

✓ **Pour les courants**

$$I(x + \Delta x) = I(x) + Y' \cdot \Delta x \cdot V(x + \Delta x) \quad (\text{II.34})$$

$$\frac{I(x + \Delta x) - I(x)}{\Delta x} = Y' \cdot V(x + \Delta x) \quad (\text{II.35})$$

Comme $\Delta x \rightarrow 0$

$$\frac{dI(x)}{dx} = Y' \cdot V(x) \quad (\text{II.36})$$

Par séparation des variables, nous obtenons deux équations différentielles du second ordre indépendantes [17]:

$$\frac{d^2V(x)}{dx^2} = Z' \cdot \frac{dI(x)}{dx} = Z' \cdot Y' \cdot V(x) \quad (\text{II.37})$$

$$\frac{d^2V(x)}{dx^2} - Z' \cdot Y' \cdot V(x) = 0 \quad (\text{II.38})$$

Notons la constante de propagation $\bar{\gamma}$ définie par les expressions suivantes :

$$\bar{\gamma} = \sqrt{Z' \cdot Y'} = \alpha + j\beta \quad (\text{II.39})$$

Où :

α : Constante d'atténuation (Neper/m) ;

β : Constante de phase (rad/m).

$$\frac{d^2V(x)}{dx^2} - \gamma^2 \cdot V(x) = 0 \quad (\text{II.40})$$

La solution de cette équation est donnée par :

$$V(x) = C_1 \cdot e^{\gamma x} + C_2 \cdot e^{-\gamma x} \quad (\text{II.41})$$

En remplaçant dans l'expression du courant, on trouve :

$$I(x) = \frac{1}{Z'} \frac{dV(x)}{dx} \quad (\text{II.42})$$

$$I(x) = \frac{\gamma}{Z'} C_1 \cdot e^{\gamma x} + C_2 \cdot e^{-\gamma x} \quad (\text{II.43})$$

Alors,

$$I(x) = \sqrt{\frac{Y'}{Z'}} C_1 \cdot e^{\gamma x} + C_2 \cdot e^{-\gamma x} \quad (\text{II.45})$$

Notons par \bar{Z}_c l'impédance caractéristique telle que :

$$\bar{Z}_c = \sqrt{\frac{Z'}{Y'}} = \sqrt{\frac{R' + jL'\omega}{G' + jC'\omega}} \quad (\text{II.46})$$

Les solutions sont :

$$\begin{cases} \bar{V}(x) = \cosh(\bar{\gamma}x) \cdot \bar{V}_R + \bar{Z}_c \cdot \sinh(\bar{\gamma}x) \cdot \bar{I}_R \\ \bar{I}(x) = \frac{1}{\bar{Z}_c} \sinh(\bar{\gamma}x) \cdot \bar{V}_R + \cosh(\bar{\gamma}x) \cdot \bar{I}_R \end{cases} \quad (\text{II.47})$$

✓ Si $x=l$ longueur de la ligne $\bar{V}(l) = \bar{V}_s$ et $\bar{I}(l) = \bar{I}_s$

$$\begin{cases} \bar{V}_s = \cosh(\bar{\gamma}l) \cdot \bar{V}_R + \bar{Z}_c \cdot \sinh(\bar{\gamma}l) \cdot \bar{I}_R \\ \bar{I}_s = \frac{1}{\bar{Z}_c} \sinh(\bar{\gamma}l) \cdot \bar{V}_R + \cosh(\bar{\gamma}l) \cdot \bar{I}_R \end{cases} \quad (\text{II.48})$$

Nous obtenons une matrice où tous les termes sont positifs, appelée matrice de transfert du quadripôle.

Sous la forme matricielle

$$\begin{bmatrix} \bar{V}_S \\ \bar{I}_S \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cosh(\bar{\gamma}l) & \bar{Z}_c \cdot \sinh(\bar{\gamma}l) \\ \frac{1}{\bar{Z}_c} \sinh(\bar{\gamma}l) & \cosh(\bar{\gamma}l) \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \bar{V}_R \\ \bar{I}_R \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} A & B \\ C & D \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \bar{V}_R \\ \bar{I}_R \end{bmatrix} \quad (\text{II.49})$$

Avec :

$$A = D = \cosh(\bar{\gamma}l) \quad ; \quad B = \bar{Z}_c \cdot \sinh(\bar{\gamma}l) \quad ; \quad C = \frac{1}{\bar{Z}_c} \sinh(\bar{\gamma}l)$$

II.4.2. Circuits équivalents des lignes

II.4.2.1. Lignes de très grandes longueurs ($l > 240$ km), $\gamma l > 0.5$

Le système matriciel précédent correspond au schéma en Π de la figure II.8 :

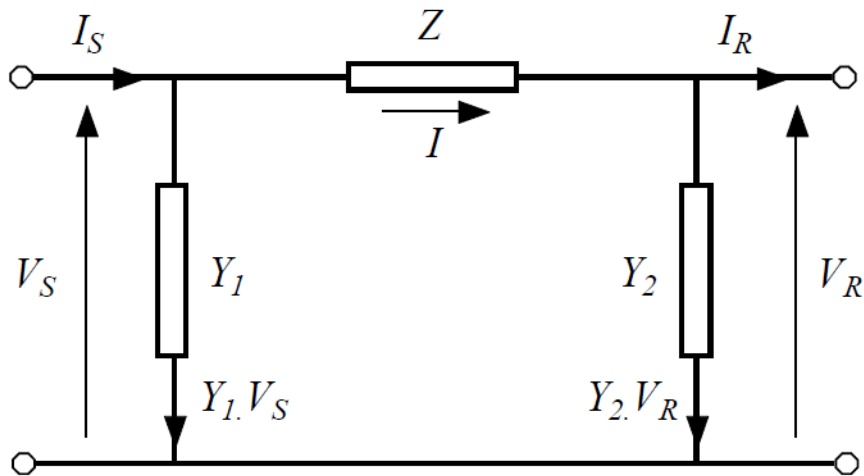


Figure.II.8 : Schéma unifilaire d'une ligne longue.[18]

A partir de ce schéma, nous pouvons écrire les équations suivantes :

$$\bar{V}_S = \bar{V}_R + \bar{Z} \cdot \bar{I} = \bar{V}_R + \bar{Z} \cdot (\bar{V}_R \cdot \bar{Y}_2 + \bar{I}_R) = (1 + \bar{Z} \cdot \bar{Y}_2) \bar{V}_R + \bar{Z} \cdot \bar{I}_R \quad (\text{II.50})$$

$$\bar{I}_S = \bar{Y}_1 \bar{V}_S + \bar{Y}_2 \bar{V}_R + \bar{I}_R \quad (\text{II.51})$$

En remplaçant (1) dans (2), nous obtenons :

$$\bar{I}_S = \bar{Y}_1 (1 + \bar{Z} \cdot \bar{Y}_2) \bar{V}_R + \bar{Z} \cdot \bar{Y}_1 \cdot \bar{I}_R + \bar{Y}_2 \cdot \bar{V}_R + \bar{I}_R \quad (\text{II.52})$$

Ou,

$$\bar{I}_S = (\bar{Y}_1 + \bar{Y}_2 + \bar{Z} \cdot \bar{Y}_1 \cdot \bar{Y}_2) \bar{V}_R + (\bar{Z} \cdot \bar{Y}_1 + 1) \bar{I}_R \quad (\text{II.53})$$

Avec,

$$\begin{cases} 1 + \bar{Z} \cdot \bar{Y}_2 = \bar{Z} \cdot \bar{Y}_1 + 1 = \cosh(\bar{\gamma}l) \\ \bar{Z} = \bar{Z}_c \cdot \sinh(\bar{\gamma}l) \\ \bar{Y}_1 + \bar{Y}_2 + \bar{Z} \cdot \bar{Y}_1 \cdot \bar{Y}_2 = \frac{1}{\bar{Z}_c} \sinh(\bar{\gamma}l) \end{cases} \quad (\text{II.54})$$

Finalement,

$$\begin{cases} \bar{Z}_\pi = \bar{Z}_c \cdot \sinh(\bar{\gamma}l) \\ \bar{Y}_\pi = \bar{Y}_2 = \bar{Y}_1 = \frac{1}{\bar{Z}_c} \tanh\left(\frac{\bar{\gamma}l}{2}\right) \end{cases} \quad (\text{II.55})$$

✓ **Cas de lignes sans pertes actives** : $R' \approx 0$, $G' \approx 0$ (très faibles)

✓ L'impédance de la ligne $Z' = jL'\omega$

✓ L'admittance de la ligne $Y' = jC'\omega$

✓ La constante de propagation $\bar{\gamma} = \sqrt{Z' \cdot Y'} = \sqrt{jL'\omega \cdot jC'\omega} = j\omega \sqrt{L'C'} = j\beta$ imaginaire pure

✓ L'impédance caractéristique $\bar{Z}_c = \sqrt{\frac{Z'}{Y'}} = \sqrt{\frac{jL'\omega}{jC'\omega}} = \sqrt{\frac{L'}{C'}} = R_c$ réel pure

Les équations suivantes donnent les expressions des sinus et cosinus hyperbolique sous forme complexe :

$$\begin{cases} \cosh(\alpha x + j\beta x) = \cosh(\alpha x) \cdot \cosh(\beta x) + j \sinh(\alpha x) \cdot \sinh(\beta x) \\ \sinh(\alpha x + j\beta x) = \sinh(\alpha x) \cdot \cosh(\beta x) + j \cosh(\alpha x) \cdot \sinh(\beta x) \end{cases} \quad (\text{II.56})$$

Sachant que $\alpha=0$, le système d'équations précédent devient :

$$\begin{cases} \cosh(j\beta x) = 1 \cdot \cosh(\beta x) + j0 \cdot \sinh(\beta x) \\ \sinh(j\beta x) = 0 \cosh(\beta x) + j1 \cdot \sinh(\beta x) \end{cases} \Rightarrow \begin{cases} \cosh(j\beta x) = \cosh(\beta x) \\ \sinh(j\beta x) = j \sinh(\beta x) \end{cases}$$

D'après ces deux dernières expressions \bar{V}_s et \bar{I}_s vont devenir comme suit :

$$\begin{cases} \bar{V}_s = \cosh(\beta l) \cdot V_R + \bar{Z}_c \cdot \sinh(\beta l) \cdot I_R \\ \bar{I}_s = j \frac{1}{R_c} \sinh(\beta l) \cdot V_R + \cosh(\beta l) \cdot I_R \end{cases} \quad (\text{II.57})$$

La notion de longueur d'onde λ est donnée par :

$$\lambda = \frac{2\pi}{\beta} = \frac{2\pi}{\omega \sqrt{LC}} \quad (\text{II.58})$$

✓ Cas d'une ligne sans pertes et à vide

Ligne à vide $\bar{I}_R = 0$, les équations deviennent :

$$\bar{V}_s = V_R \cdot \cosh(\beta l) \Rightarrow \bar{V}_R = \frac{\bar{V}_s}{\cos(\beta l)} \tag{II.58}$$

II.4.2.2. Lignes de moyennes longueurs (80 km < l < 240 km) 0.1 < γl < 0.5

Dans le cas où la distance l n'est pas élevée : $\sinh(\bar{\gamma}l) \approx \bar{\gamma}l$ et $\tanh\left(\frac{\bar{\gamma}l}{2}\right) \approx \frac{\bar{\gamma}l}{2}$

✓ L'impédance du quadripôle sera égale à :

$$\begin{aligned} \bar{Z}_\pi &= \bar{Z}_C \cdot \bar{\gamma}l = \sqrt{\frac{Z'}{Y'}} \cdot \sqrt{Z' \cdot Y'} \cdot l = Z' \cdot l \\ \bar{Z}_\pi &= Z' \cdot l \end{aligned} \tag{II.59}$$

✓ L'admittance du quadripôle sera égale à :

$$\begin{aligned} \bar{Y}_\pi &= \frac{1}{\bar{Z}_C} \cdot \tanh\left(\frac{\bar{\gamma}l}{2}\right) = \frac{1}{\sqrt{\frac{Z'}{Y'}}} \cdot \frac{\bar{\gamma}l}{2} = \frac{1}{\sqrt{\frac{Z'}{Y'}}} \cdot \frac{\sqrt{Z' \cdot Y'} \cdot l}{2} = \frac{Y' \cdot l}{2} \\ \bar{Y}_\pi &= \frac{Y' \cdot l}{2} \end{aligned} \tag{II.60}$$

Le schéma équivalent devient celui montré sur la figure II.09 :

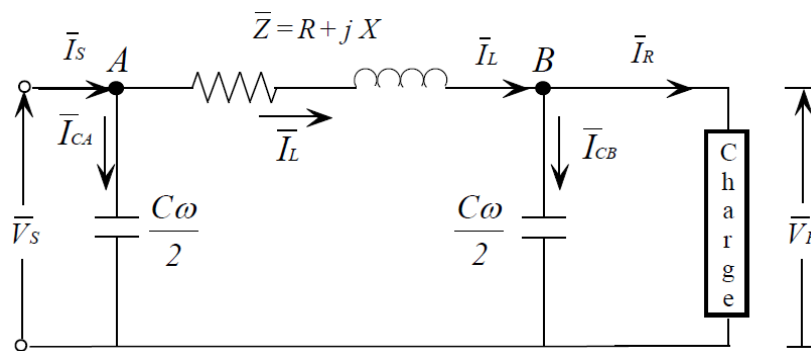


Figure II.9 : Schéma unifilaire d'une ligne moyenne.[18]

II.4.2.3. Lignes de courtes longueurs (l < 80 km) γl < 0.1

$$\begin{cases} \bar{Z}_\pi = \bar{Z} \cdot l \\ \bar{Y}_\pi = 0 \end{cases} \tag{II.61}$$

Le schéma équivalent de la ligne est alors :

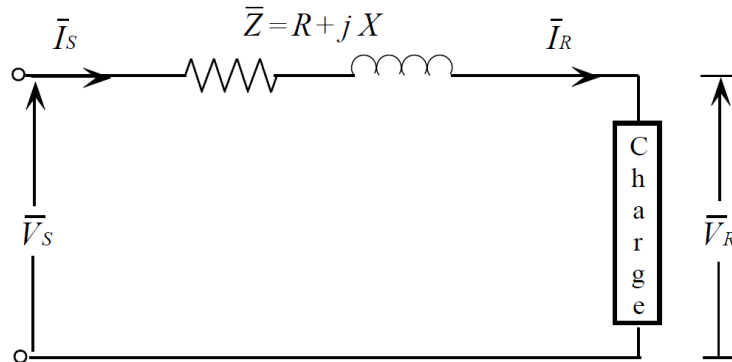


Figure II.10 : Schéma unifilaire d'une ligne courte.[18]

II.4.3. Calcul de la chute de tension dans les lignes (HT, MT, BT de longueur < 300km)

Quelques simplifications peuvent être introduites dans le schéma équivalent de la ligne dans les cas suivants [19] :

- $G \approx 0$ pour une tension $U_S < 225$ kV (HT)
- $C \approx 0$ pour une tension $U_S < 60$ kV (MT)
- $L \approx 0$ pour une tension $U_S < 1$ kV (BT)

II.4.3.1. Ligne du 3^{ème} ordre HT ($G \approx 0$)

En se basant sur le circuit équivalent représenté sur la figure II.9, on trace le diagramme vectoriel des tensions et courants (figure II.11).

✓ Diagramme vectoriel

Développons l'équation générale comme suit :

$$\bar{V}_S = \bar{V}_R + \bar{Z} \cdot \bar{I}_L = \bar{V}_R + \bar{Z} \cdot (\bar{I}_R + \bar{I}_{CB}) = \bar{V}_R + \bar{Z} \cdot \bar{I}_R + \bar{Z} \cdot \bar{I}_{CB} \quad \text{où} \quad \begin{cases} \bar{I}_{CB} = j \frac{C\omega}{2} \cdot \bar{V}_R \\ \bar{I}_{CA} = j \frac{C\omega}{2} \cdot \bar{V}_S \\ \bar{Z} = R + jL\omega \end{cases}$$

$$\begin{cases} \bar{V}_S = \bar{V}_R + \bar{R} \cdot \bar{I}_R + jL\omega \cdot \bar{I}_R + \bar{R} \cdot \bar{I}_{CB} + jL\omega \cdot \bar{I}_{CB} \\ X_L = L\omega \\ \bar{I}_S = \bar{I}_R + \bar{I}_{CA} + \bar{I}_{CB} \end{cases}$$

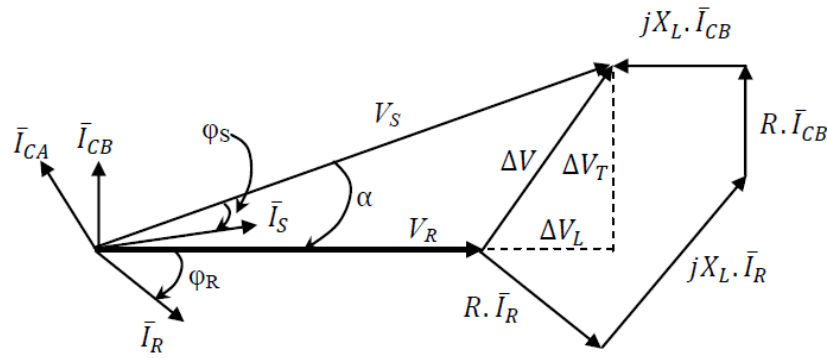


Figure II.11 : Représentation vectorielle des tensions et courants de la ligne HT

✓ Chute de tension

En faisant la projection sur l'axe des réels, l'expression de la chute de tension longitudinale est donnée comme suit :

$$\Delta V_L = R \cdot \bar{I}_R \cos \varphi_R + X_L \cdot \bar{I}_R \sin \varphi_R - X_L \cdot \bar{I}_{CB} \quad (\text{II.62})$$

En remplaçant \bar{I}_{CB} par son expression $\frac{C\omega}{2} \cdot \bar{V}_R$ et en multipliant de part et d'autre l'égalité par $\sqrt{3}$, on obtient :

$$\Delta U_L = \sqrt{3} \cdot V_R \cdot \cos \varphi_R + \sqrt{3} \cdot X_L \cdot \bar{I}_R \sin \varphi_R - \sqrt{3} \cdot X_L \cdot \frac{C\omega}{2} \cdot \bar{V}_R \quad (\text{II.63})$$

Ou bien,

$$\Delta U_L = \sqrt{3} \cdot R \cdot \bar{I}_R \cdot \cos \varphi_R \frac{U_R}{U_R} + \sqrt{3} \cdot X_L \cdot \bar{I}_R \sin \varphi_R \frac{U_R}{U_R} - \sqrt{3} \cdot X_L \cdot \frac{C\omega}{2} \cdot \frac{U_R}{U_R} \bar{V}_R \quad (\text{II.65})$$

Sachant que $Q_{CB} = C\omega \cdot U^2$

Finalement,

$$\Delta U_L = \frac{R \cdot P_R X_L \cdot \left(Q_R \frac{Q_{CB}}{2} \right)}{U_R} \quad (\text{II.66})$$

De la même manière, en faisant la projection sur l'axe des imaginaires, l'expression de la chute de tension transversale est donnée comme suit :

$$\Delta V_T = X_L \cdot \bar{I}_R \cos \varphi_R - R \cdot \bar{I}_R \sin \varphi_R + R \cdot \bar{I}_{CB} \quad (\text{II.67})$$

En suivant les mêmes étapes que précédemment, on obtient :

$$\Delta U_T = \frac{X_L \cdot P_R - R \cdot \left(Q_R \frac{Q_{CB}}{2} \right)}{U_R} \quad (\text{II.68})$$

La tension à la source est alors donnée par :

$$U_S = \sqrt{(U_R + \Delta U_L)^2 + \Delta U_T^2} \quad (\text{II.69})$$

On peut aussi écrire

$$\Delta U = \Delta U_L + j\Delta U_T \quad (\text{II.70})$$

La régulation de la tension est donnée comme suit :

$$\text{Regulation}\% = \frac{|U_S| - |U_R|}{|U_R|} \cdot 100 \quad (\text{II.71})$$

✓ Angle électrique

$$\alpha = \text{arctg} \left(\frac{\Delta U_T}{U_R + \Delta U_L} \right) \quad (\text{II.72})$$

$$\bar{I}_S = \bar{I}_R + \bar{I}_{CA} + \bar{I}_{CB} = \bar{I}_R \cos \varphi_R - R \cdot I_{CA} \sin \alpha + j(I_{CA} \cos \alpha + I_{CB} - I_R \sin \varphi_R) \quad (\text{II.73})$$

Enfin,

$$\varphi_S = \alpha - \text{arctg} \frac{I_{S\text{réactif}}}{I_{S\text{actif}}} \quad (\text{II.74})$$

II.4.3.2. Ligne du 2^{ème} ordre MT ($G' \approx 0$, $C' \approx 0$)

En se basant sur le circuit équivalent représenté sur la figure II.10, on trace le diagramme vectoriel des tensions et courants (figure II.12) [20].

✓ Diagramme vectoriel

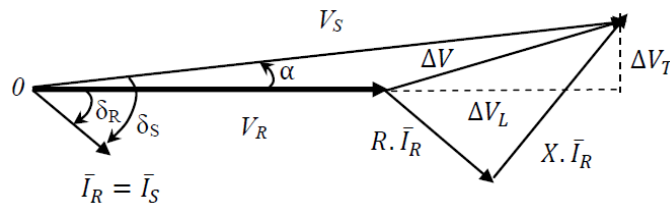


Figure II.12 : Représentation vectorielle des tensions et courants de la ligne MT

$$\begin{cases} \bar{V}_S = \bar{V}_R + \bar{R} \cdot \bar{I}_R + jL\omega \cdot \bar{I}_R \\ \bar{I}_S = \bar{I}_R \end{cases} \quad (\text{II.75})$$

En suivant le même raisonnement que dans le cas d'une ligne de 3^{ème} ordre, nous obtenons:

- ✓ La chute de tension longitudinale

$$\Delta U_L = \sqrt{3} \cdot R \cdot I_R \cdot \cos\varphi_R + \sqrt{3} \cdot X_L \cdot I_R \sin\varphi_R \quad (\text{II.76})$$

$$\Delta U_L = \frac{R \cdot P_R + X_L \cdot Q_R}{U_R} \quad (\text{II.77})$$

- ✓ La chute de tension transversale

$$\Delta U_L = \sqrt{3} \cdot X_L \cdot I_R \cdot \cos\varphi_R - \sqrt{3} \cdot R \cdot I_R \sin\varphi_R \quad (\text{II.78})$$

$$\Delta U_L = \frac{X_L \cdot P_R + R \cdot Q_R}{U_R} \quad (\text{II.79})$$

- ✓ La tension à la source est alors donnée par :

$$U_S = \sqrt{(U_R + \Delta U_L)^2 + \Delta U_T^2} \quad (\text{II.80})$$

- ✓ *Angle électrique*

$$\alpha = \arctg\left(\frac{\Delta U_T}{U_R + \Delta U_L}\right) \quad (\text{II.81})$$

Et

$$\varphi_S = \varphi_R + \alpha \quad (\text{II.82})$$

II.4.3.3. Ligne du 1^{ère} ordre BT ($G' \approx C' \approx L' \approx 0$)

- ✓ *Schéma équivalent*

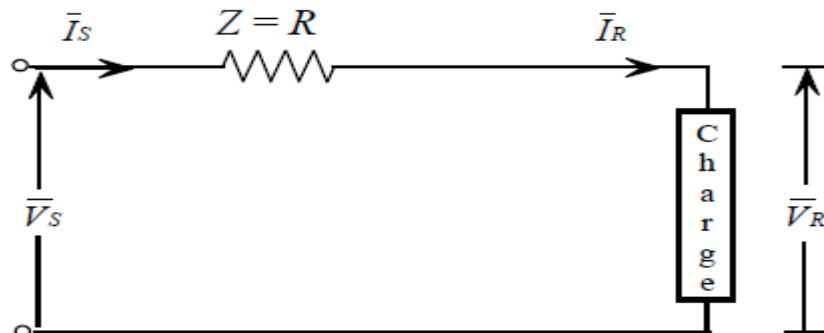


Figure II.13: Paramètres linéiques de la ligne BT.[20]

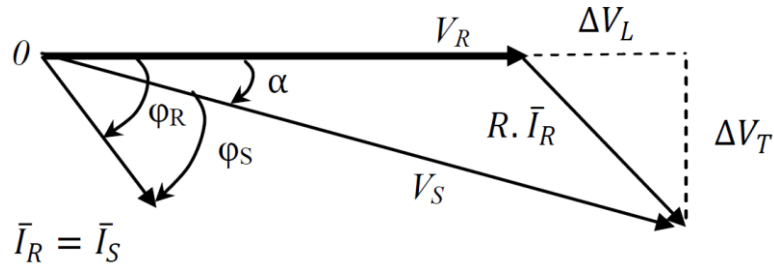
✓ **Diagramme vectoriel**

Figure II.14 : Représentation vectorielle des tensions et courants de la ligne BT

$$\begin{cases} \vec{V}_S = \vec{V}_R + \vec{R} \cdot \vec{I}_R \\ \vec{I}_S = \vec{I}_R \end{cases} \quad (\text{II.83})$$

✓ **Chute de tension**

En procédant de la même manière que précédemment, on obtient :

- ✓ Les chutes de tension longitudinale et transversale sont :

$$\Delta U_L = \frac{R \cdot P_R}{U_R} \quad (\text{II.84})$$

$$\Delta U_T = \frac{R \cdot Q_R}{U_R} \quad (\text{II.85})$$

- ✓ La tension à la source est alors donnée par :

$$U_S = \sqrt{(U_R + \Delta U_L)^2 + \Delta U_T^2} \quad \text{ou} \quad V_S = \sqrt{(V_R + \Delta V_L)^2 + \Delta V_T^2} \quad (\text{II.86})$$

✓ **Angle électrique**

$$\alpha = \arctg\left(\frac{\Delta U_T}{U_R + \Delta U_L}\right) \quad (\text{II.87})$$

Et

$$\varphi_S = \varphi_R + \alpha \quad (\text{II.88})$$

II.4.4. Effet FERRANTI dans les lignes HT

L'effet Ferranti désigne l'apparition d'une surtension lorsqu'une longue ligne électrique est alimentée à une extrémité et sans charge à l'autre extrémité $IR=0$. En négligeant les pertes, cette surtension est donnée par :

$$\frac{U_R}{U_S} = \frac{1}{\cos(\sqrt{LC}\omega)} \quad (\text{II.89})$$

Pour des longueurs courtes de ligne (quelques centaines de km à 50 Hz), on peut aussi approximer par :

$$\frac{U_R}{U_S} = \frac{1}{1 - \frac{LC\omega^2}{2}} \Rightarrow U_R > U_S \quad (\text{II.90})$$

Peut-être aussi donné par : $V_R = \frac{1}{1+\bar{Z}\bar{Y}}$ avec $|\bar{Z}\bar{Y}| < 1$ pour les lignes HT

Tableau II.1: Effet Ferranti sur une ligne à 380 kV à 50 Hz (avec $L=1,01$ mH/km et $C=11,48$ nF/km) .[21]

Longueur	Surtension
100 km	0,6 %
200 km	2,3 %
300 km	5,4 %
400 km	9,9 %

II.5. Puissance transmises et compensation du facteur de puissance dans les lignes

II.5.1. Puissance transmise par une ligne

II.5.1.1. Puissances active et réactive

A partir du schéma équivalent de la figure II.9, les expressions des puissances active et réactive transportées à travers la ligne seront développées dans cette partie.

La puissance à la réception est donnée par : $\bar{S}_R = 3 \cdot \bar{V}_R \cdot \bar{I}_R^*$ ou $\bar{S}_R^* = 3 \cdot \bar{V}_R^* \cdot \bar{I}_R$

Sachant que : $\bar{V}_R = V_R \cdot \angle 0^\circ$, $\bar{Z} = Z \cdot \angle \varphi_Z$ et $\bar{V}_S = V_S \cdot \angle \alpha$

$$\bar{Z} = R + jX \quad \text{et} \quad \bar{Y} = \frac{G}{2} + \frac{B}{2} = j \frac{B}{2} \quad (\text{II.91})$$

$$\bar{I}_R = \bar{I}_L - \bar{I}_Y = \frac{\bar{V}_S - \bar{V}_R}{\bar{Z}} - \bar{Y} \cdot \bar{V}_R \quad (\text{II.92})$$

$$\bar{S}_R^* = 3 \cdot \bar{V}_R = \left(\frac{\bar{V}_S - \bar{V}_R}{Z} \right) - 3 \cdot \bar{Y} \cdot \bar{V}_R^2 = \frac{3 \cdot \bar{V}_S \cdot \bar{V}_R}{Z} - \frac{3 \cdot \bar{V}_R^2}{Z} - 3 \cdot \bar{Y} \cdot \bar{V}_R^2 \quad (\text{II.93})$$

$$\bar{S}_R^* = \frac{3 \cdot V_R \cdot V_S e^{j\alpha}}{Z e^{j\varphi_Z}} - \frac{3 \cdot V_R^2}{Z e^{j\varphi_Z}} - 3 \cdot jY \cdot V_R^2 = \frac{3 \cdot V_R \cdot V_S e^{j(\alpha - \varphi_Z)}}{Z} - \frac{3 \cdot V_R^2 e^{-j\varphi_Z}}{Z} - 3 \cdot jY \cdot V_R^2 = P + jQ \quad (\text{II.94})$$

$$\bar{S}_R^* = \frac{3 \cdot V_R \cdot V_S e^{j\alpha}}{Z e^{j\varphi_Z}} - \frac{3 \cdot V_R^2}{Z e^{j\varphi_Z}} - 3 \cdot jY \cdot V_R^2 = \frac{3 \cdot V_R \cdot V_S e^{j(\alpha - \varphi_Z)}}{Z} - \frac{3 \cdot V_R^2 e^{-j\varphi_Z}}{Z} - 3 \cdot jY \cdot V_R^2 = P + jQ \quad (\text{II.95})$$

Finalement, les puissances active et réactive transmises de la source vers la charge sont :

$$\begin{cases} P_R = \frac{3 \cdot V_R \cdot V_S}{Z} \cos(\alpha - \varphi_Z) - \frac{3 \cdot V_R^2}{Z} \cos \varphi_Z \\ Q_R = \frac{3 \cdot V_R \cdot V_S}{Z} \sin(\alpha - \varphi_Z) + \frac{3 \cdot V_R^2}{Z} \sin \varphi_Z - 3 \cdot jY \cdot V_R^2 \end{cases} \quad (\text{II.96})$$

Avec,

$$\bar{S}_R = P_R - jQ_R \quad (\text{II.97})$$

La puissance obtenue à l'extrémité réceptrice de la ligne de transmission est généralement plus faible que la puissance à l'extrémité source en raison de pertes dans la résistance de la ligne.

Le rapport entre la puissance à l'extrémité réceptrice et la puissance à l'extrémité source est appelé rendement de la ligne, donné par [20] :

$$\eta\% = \frac{P_R}{P_S} \cdot 100 \quad (\text{II.98})$$

II.5.1.2. Application aux différents types de lignes

- **Ligne purement résistive** $\varphi_Z = 0 \Rightarrow \bar{Z} = R$

$$P = \frac{3 \cdot V_R \cdot V_S}{R} \cos \alpha - \frac{3 \cdot V_R^2}{Z} \quad (\text{II.99})$$

La puissance est maximale est obtenue pour $\frac{dP}{dV_R} = 0$

$$\frac{dP}{dV_R} = \frac{3 \cdot V_S}{R} \cos \alpha - \frac{6 \cdot V_R}{Z} = 0 \quad (\text{II.100})$$

$$V_R = \frac{V_S}{2} \cos \alpha \quad (\text{II.101})$$

En remplaçant V_R dans l'expression de P , on obtient :

$$P_{max} = \frac{3 \cdot V_R^2}{4 \cdot R} \cos^2(\alpha) \quad (\text{II.102})$$

Si la charge est résistive $Z_{charge} = R \Rightarrow \alpha = 0$ alors :

$$P_{max} = \frac{3.V_R^2}{4.R} \quad (\text{II.102})$$

- **Ligne purement inductive** $\varphi_Z = \frac{\pi}{2} \Rightarrow \bar{Z} = jK$

$$P = \frac{3.V_R.V_S}{X} \cos\left(\alpha - \frac{\pi}{2}\right) \quad (\text{II.103})$$

$$P = \frac{3.V_R.V_S}{X} \sin \alpha \quad (\text{II.104})$$

A partir du diagramme vectoriel ci-contre,

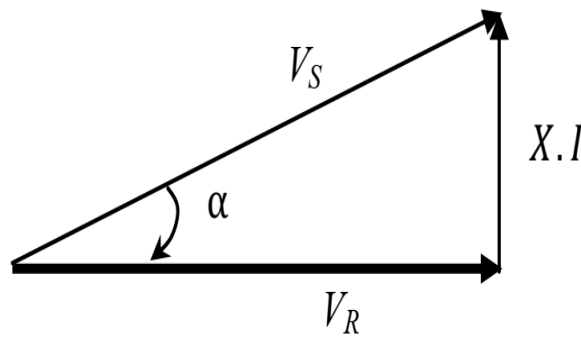


Figure II.15 : Diagramme vectoriel complexe RL pour machine synchrone [8]

On peut écrire :

$$V_S \sin \alpha = X.I = \sqrt{V_S^2 - V_R^2} \quad (\text{II.105})$$

En remplaçant dans l'expression de P

$$P = \frac{3.V_R}{X} \sqrt{V_S^2 - V_R^2} \quad (\text{II.106})$$

Pour une puissance maximale :

$$\frac{dP}{dV_R} = \frac{3}{X} \sqrt{V_S^2 - V_R^2} - \frac{3.V_R}{2.X} (2.V_R)(V_S^2 - V_R^2)^{-\frac{1}{2}} = \frac{3.V_S^2 - 6.V_R^2}{X\sqrt{V_S^2 - V_R^2}} = 0 \quad (\text{II.107})$$

On obtient : $V_R = \frac{V_S}{\sqrt{2}} \Rightarrow \alpha = 45^\circ$

La puissance maximale est donnée par : $P_{max} = \frac{3.V_S.V_S}{X\sqrt{2}} \cdot \frac{\sqrt{2}}{2}$

$$P_{max} = \frac{3.V_S^2}{2.X} \quad (\text{II.108})$$

- **Ligne quelconque (cas général)**

A partir de l'expression générale $P_R = \frac{3.V_R.V_S}{Z} \cos(\alpha - \varphi_Z) - \frac{3.V_R^2}{Z} \cos \varphi_Z$

$$\frac{dP}{dV_R} = \frac{3.V_R}{Z} \cos(\alpha - \varphi_Z) - \frac{6.V_R}{Z} \cos \varphi_Z = 0 \quad \Rightarrow \quad V_R = \frac{V_S \cos(\alpha - \varphi_Z)}{2 \cos \varphi_Z} \quad (\text{II.109})$$

Pour une puissance maximale $\alpha - \varphi_Z = 0 \Rightarrow \alpha = \varphi_Z$ alors :

$$P_{max} = \frac{3.V_S^2}{2.Z \cos \varphi_Z} - \frac{3.V_S^2}{4.Z \cos^2 \varphi_Z} \cos \varphi_Z \quad (\text{II.110})$$

Enfin,

$$P_{max} = \frac{3.V_S^2}{4.Z \cos \varphi_Z} \quad (\text{II.111})$$

II.5.2. Calcul du nombre de branches m et nombre de condensateurs par branches n

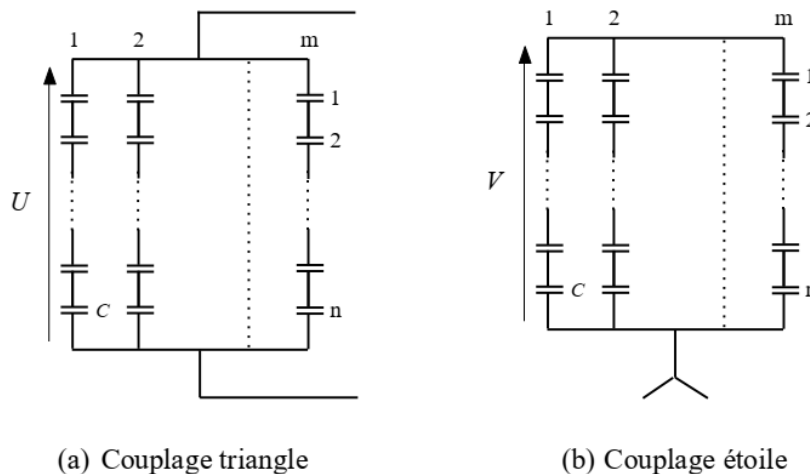


Figure II.16 : Représentation des branches m et condensateurs par branches n.[22]

- **Pour le couplage triangle**

$$Q_{Ctot} = \frac{9.m.C.\omega}{n} V^2 = \frac{3.m.C.\omega}{n} U^2 \quad (\text{II.112})$$

- **Pour le couplage étoile**

$$Q_{Ctot} = \frac{3.m.C.\omega}{n} V^2 \quad (\text{II.113})$$

NB : Les batteries de condensateurs peuvent être fixes (lorsque leur puissance réactive est inférieure à 15% de la puissance du transformateur amont et sur les réseaux de distribution pour des puissances pouvant atteindre 100MVar) et fractionnées ou en gradins (utilisées pour

certaines grosses industries et les distributeurs d'énergie dans les postes sources)

II.6. Synthèse

Les considérations importantes dans la conception et le fonctionnement d'une ligne de transmission sont la détermination de la chute de tension, les pertes de puissance et le rendement de la transmission. Ces valeurs sont fortement influencées par les constantes de ligne R, L et C. Dans ce chapitre, nous avons développé des formules permettant de calculer la chute de tension dans une ligne électrique aérienne, la régulation de tension et la puissance transmissible. Ces formules sont importantes pour deux raisons principales. Premièrement, elles permettent de comprendre les effets des paramètres de la ligne sur les tensions au jeu de barres et le flux de puissances. Deuxièmement, elles aident à développer une compréhension globale de ce qui se passe sur le réseau électrique.

Chapitre III

**Simulation d'une ligne
de transport**

III.1. Introduction

Pour mieux comprendre cette étude de fonctionnement des lignes longues distances, il est nécessaire d'effectuer une simulation numérique par un programme sous Matlab.

Notre choix c'est porté sur une ligne de 200 km et de tension de 220 kV avec une puissance de charge de 300MW.

III.2. Caractéristiques de la ligne

Pour effectuer notre simulation nous avons choisi une ligne électrique dont le câble présente les caractéristiques suivantes :

$s=547.11\text{mm}^2$; $d_c=26.4\text{mm}$; $r_{20^\circ\text{C}}=0.103\Omega/\text{Km}$; $x_0=0.405\Omega/\text{Km}$; $b_0=2.57.10^{-6}$ Siemens/Km;
L=200 Km.

III.3. Variation de la température

III.3.1. Organigramme de calcul

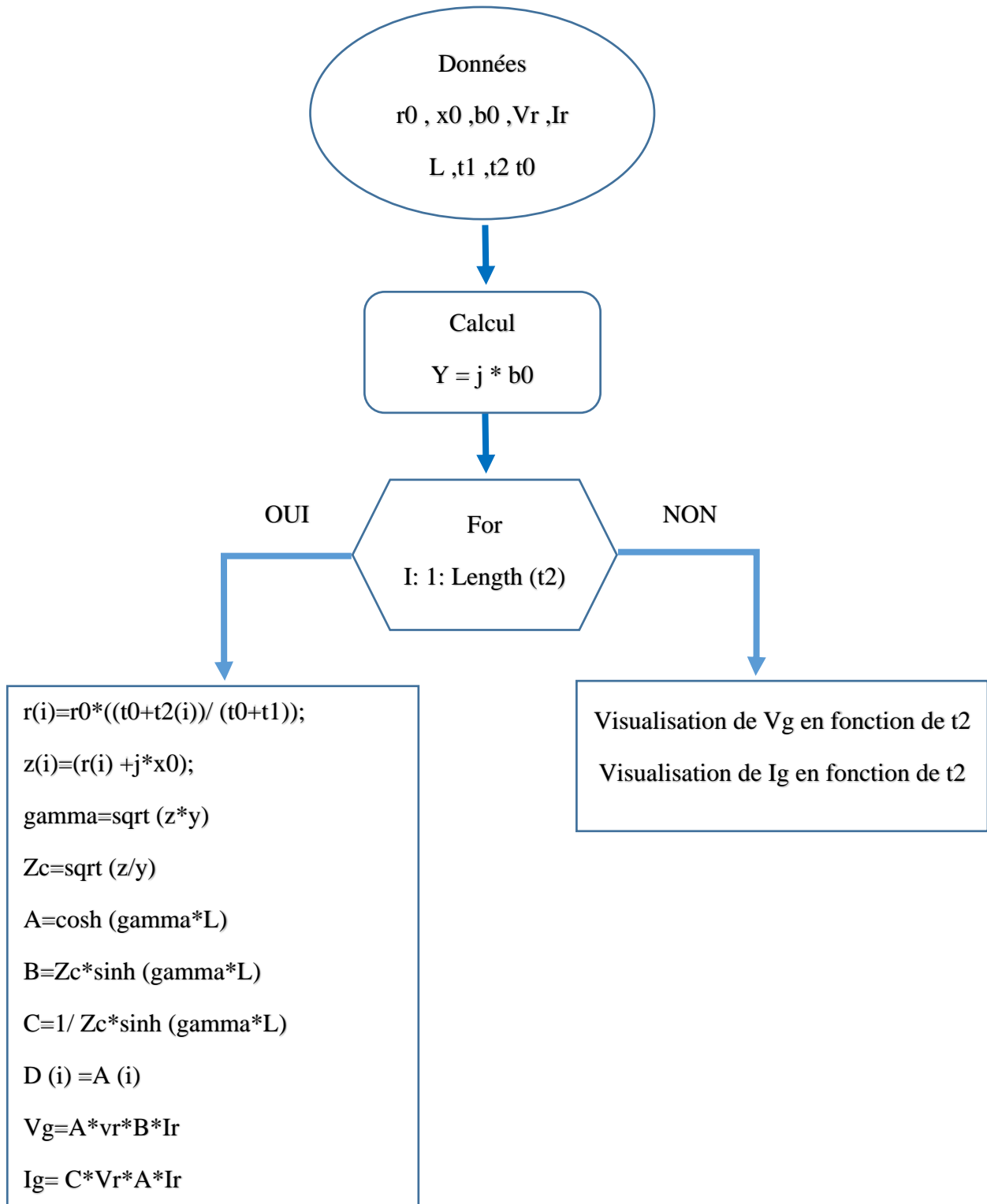


Figure III.1 : Organigramme de calcul de tension et courant d'entrée en fonction de la température

III.3.2.Résultats

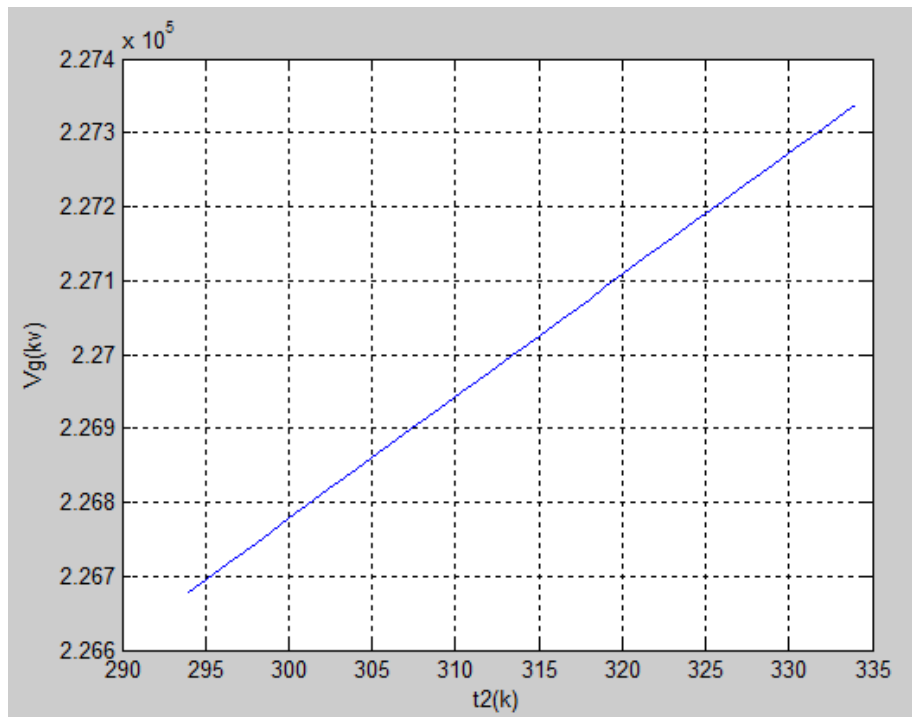


Figure III.2 : Tension d'entrée en fonction de la température

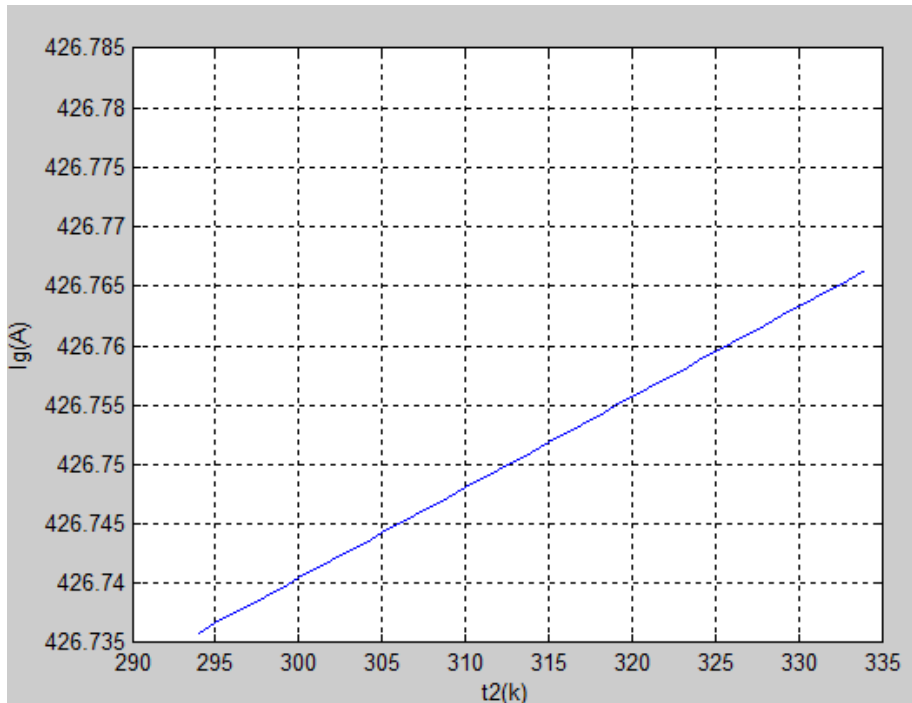


Figure III.3 : Courant d'entrée en fonction de la température

III.3.3 Interprétation des résultats

III.3.3.1 Tension d'entrée en fonction de la température

L'augmentation de la température provoque une diminution de la variation de la tension de 800V, ce qui correspond à un taux de 11.43%.

III.3.3.2 courant d'entrée en fonction de la température

L'augmentation de la température provoque une augmentation très légère de (0.04A) qui peut être due à la variation de la capacité.

III.4. Variation de la distance

III.4.1. Organigramme de calcul

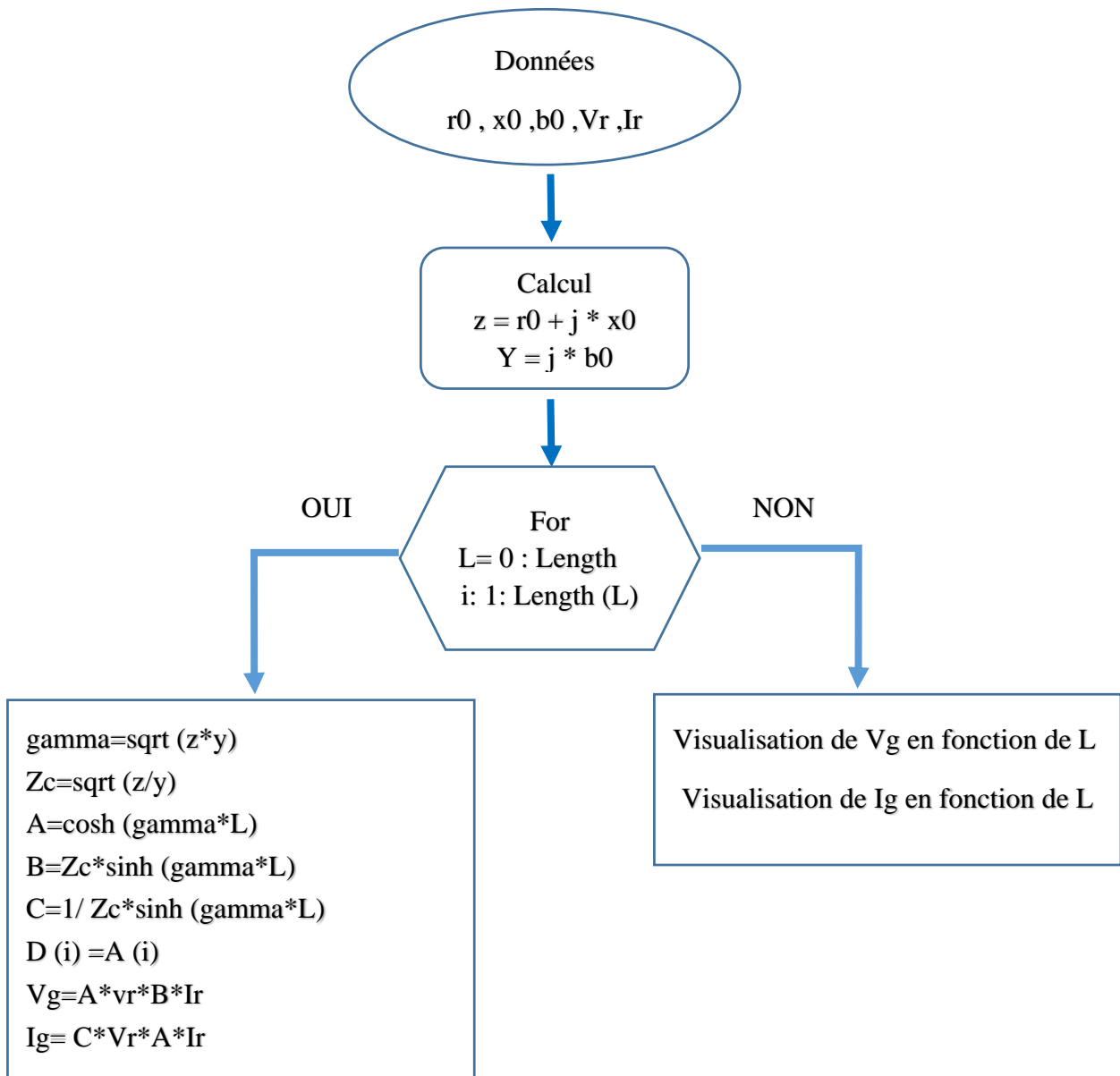


Figure III.4 : Organigramme de calcul de tension et courant d'entrée en fonction de la distance

III.4.2. Résultats

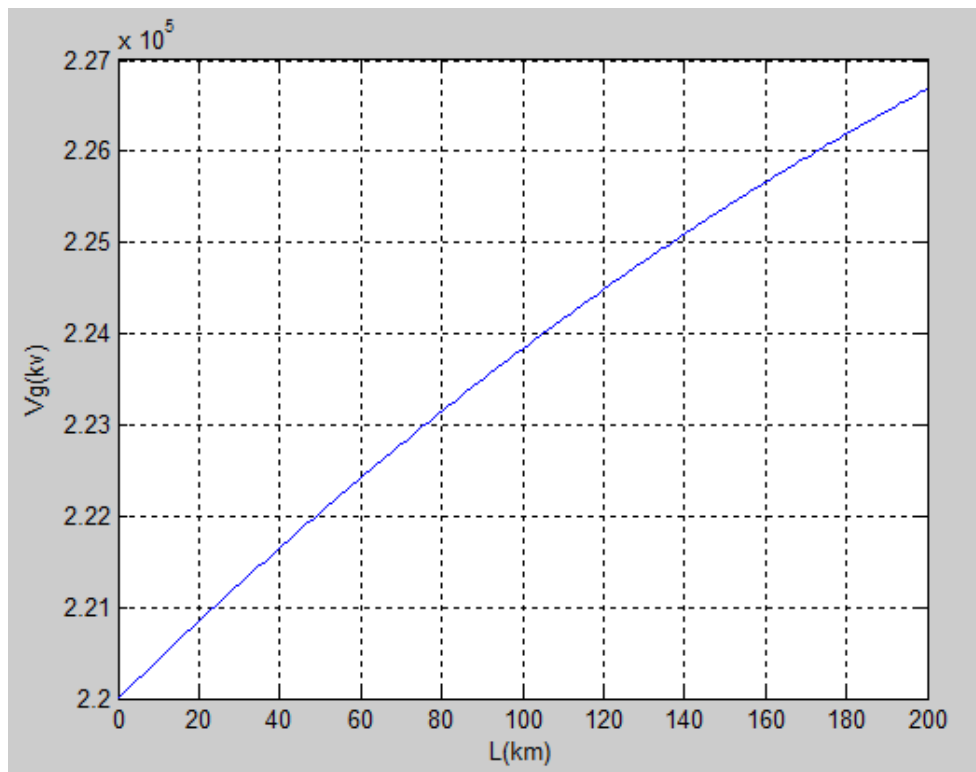


Figure III.5 : Tension d'entrée de la ligne en fonction de la distance

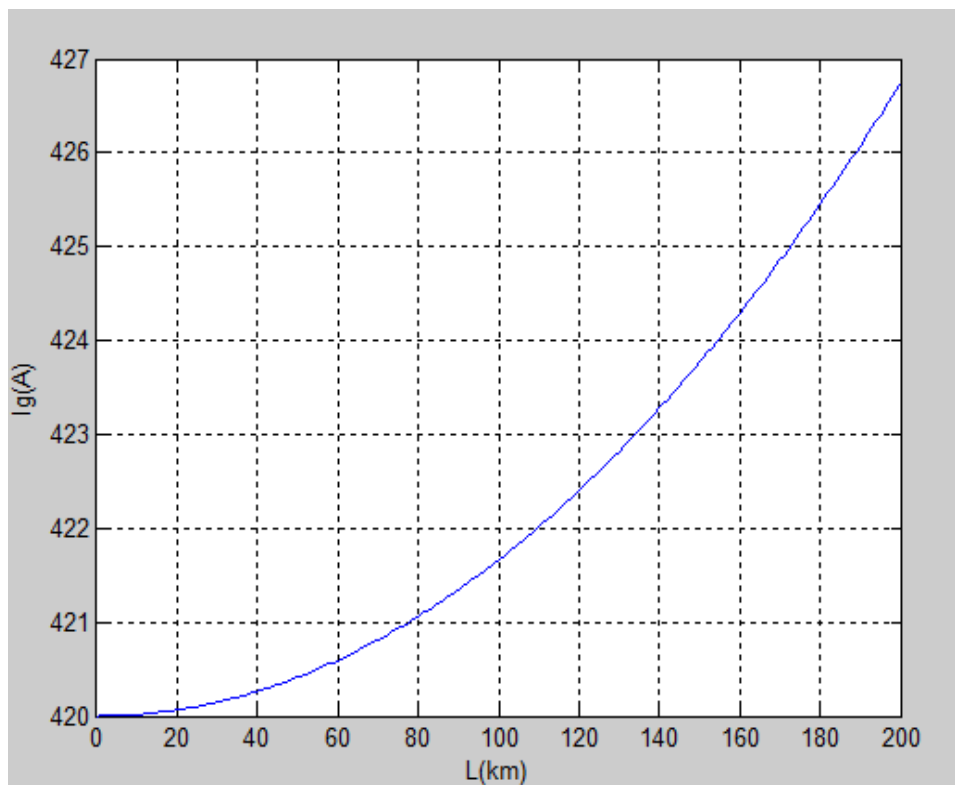


Figure III.6 : Courant d'entrée de la ligne en fonction de la distance

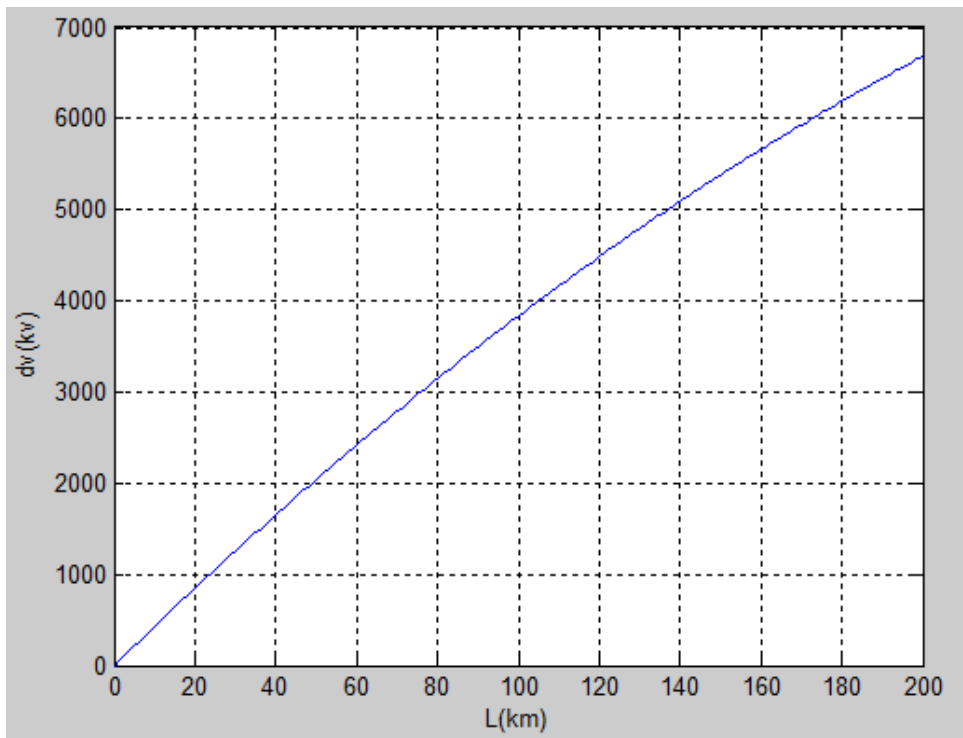


Figure III.7 : Chute de tension en fonction de la distance

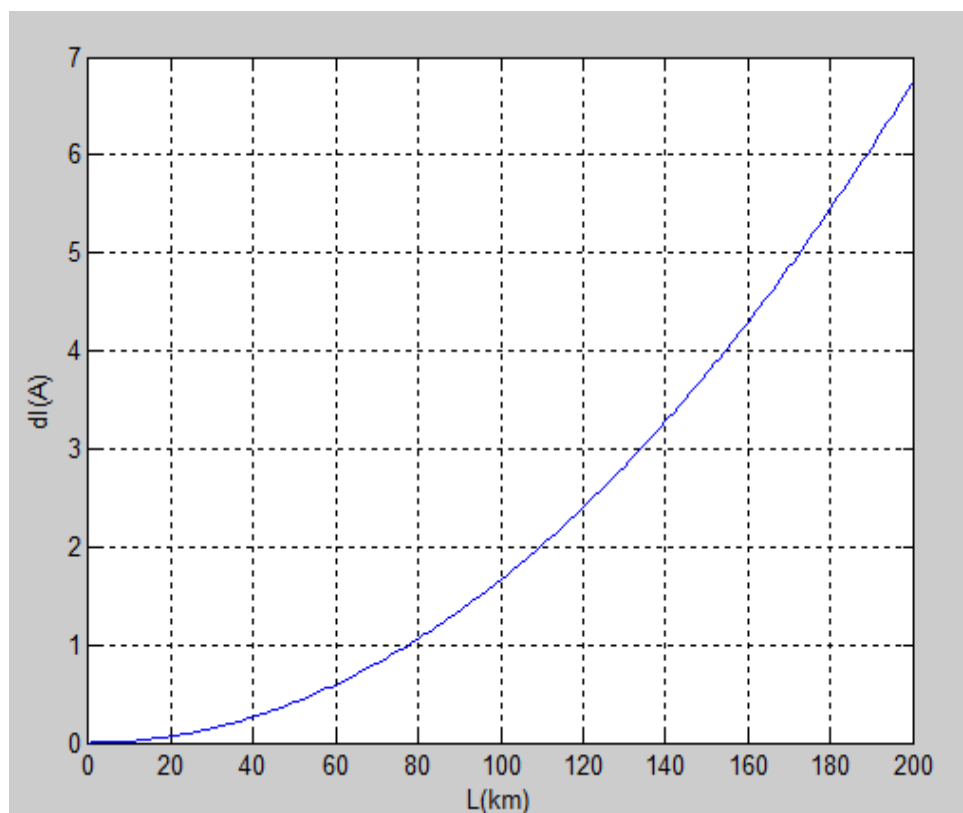


Figure III.8 : Chute de courant en fonction de la distance

III.4.3. Interprétation des résultats

III.4.3.1. Tension d'entrée en fonction de la distance

Nous remarquons que la chute de tension provoquée par la ligne de longueur 200 km est de 7000 V ce qui correspond à un taux de 3.08 % de la tension de départ. Cette chute de tension présente un caractère non linéaire. Ce que nous considérons comme un résultat satisfaisant.

III.4.3.2. Courant d'entrée en fonction de la distance

Nous remarquons que la baisse de courant est de 7A sur un courant de 427A qui nous donne un taux de 1.64%, cette baisse présente une forme parabolique, qui est en concordance avec la chute de tension.

III.5. Modélisation et simulation d'un Parafoudre:

- **La tension de la ligne U = 735 KV**

La Figure III.9 illustre un système de transmission équivalent alimenté à 735 KV une charge à travers une ligne de transmission de 200 Km . La ligne est compensée en série au début et en shunt compensé à son extrémité de réception. Un défaut est appliqué aux bornes de charge. Le défaut est inhibé par l'ouverture du disjoncteur de charge. Pour des raisons de simplification, une seule phase du système de transmission est modélisée.

Le niveau du système de transmission court-circuit triphasé est 15000 MVA. La ligne est en série de 40% compensée par un condensateur (26,2 F à 60 Hz) et de shunt compensée par un inducteur de 330 MVAR (110 MVAR / en phase), à la fin de la charge.

Le condensateur série et l'inductance shunt sont tous protégés par varistances à oxyde métallique (MOV). La varistance MOV1 de condensateur de série se compose de 30 colonnes protégeant le condensateur à 2,5 fois sa tension nominale (tension nominale est obtenue pour une ligne 2000 kA courant nominal). La tension de protection correspondant (défini à 15 KA = 500 A par colonne) est de $2,5 * 26,2 * 2kA * \sqrt{2} = 185 \text{ KV}$

L'inducteur shunt est protégé par deux colonne (MOV2), à 1,8 p.u de la tension nominale phase-sol (424,4 KVrms). La tension de protection correspondant (défini à 1 kA ou 500A/colonne) est de $1,8 * 424,4 * \sqrt{2} = 1080 \text{ KV}$

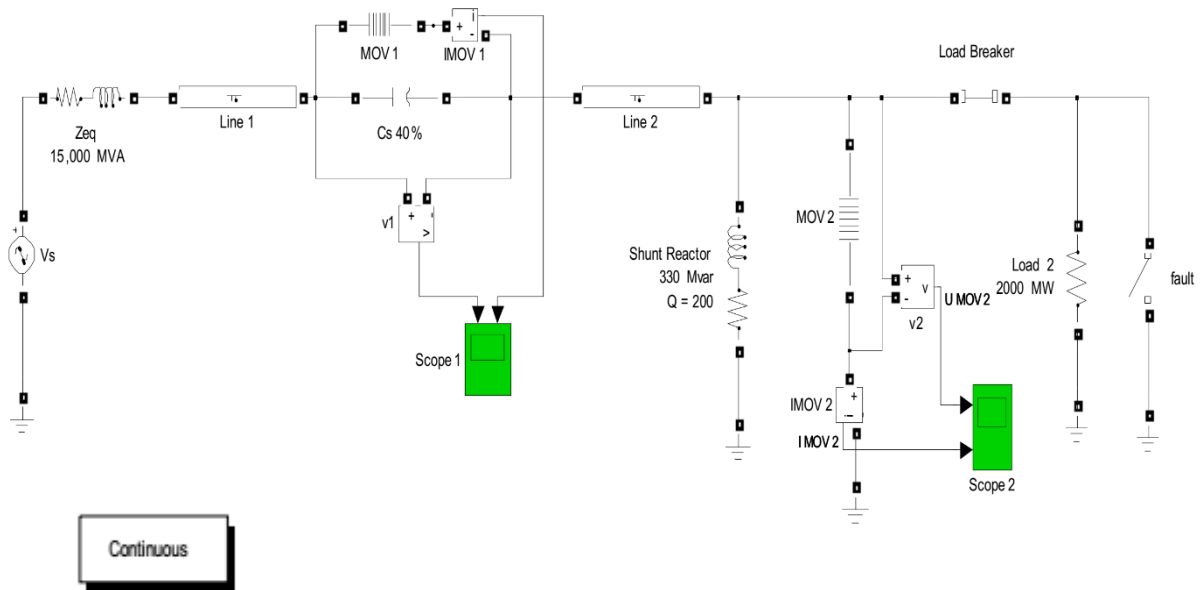


Figure III.9 : Le bloc schématique de SIMULINK d'une ligne de transmission protégé par un parafoudre.

Les résultats de simulation du bloc SIMULINK sont montrés sur la Figure III.10 et Figure III.11, pour une tension $U = 735 \text{ KV}$.

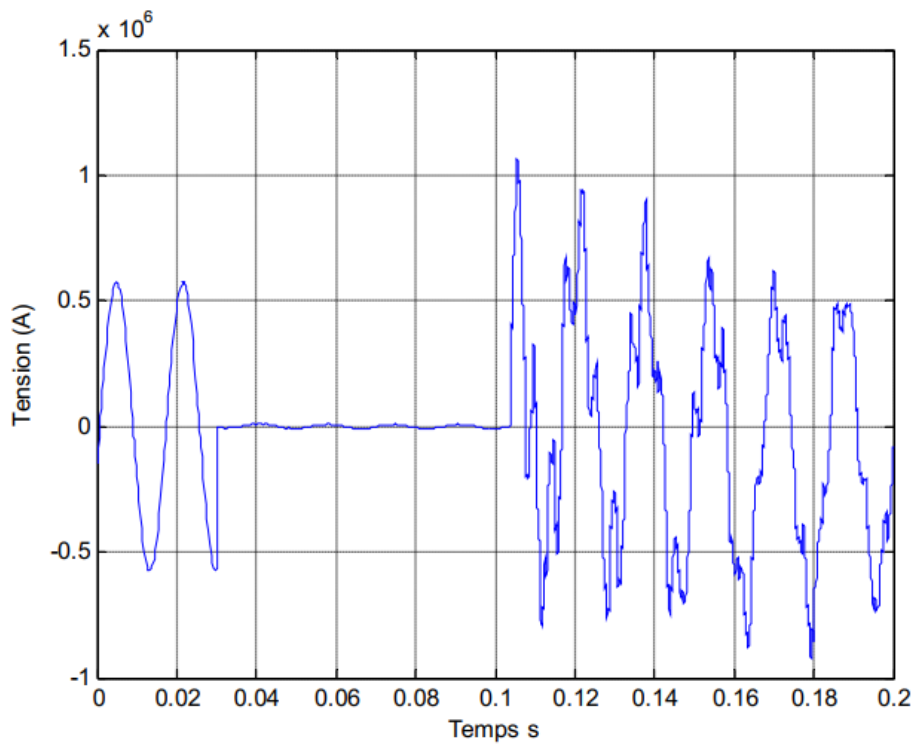


Figure III.10 : La tension de parafoudre en fonction du temps.

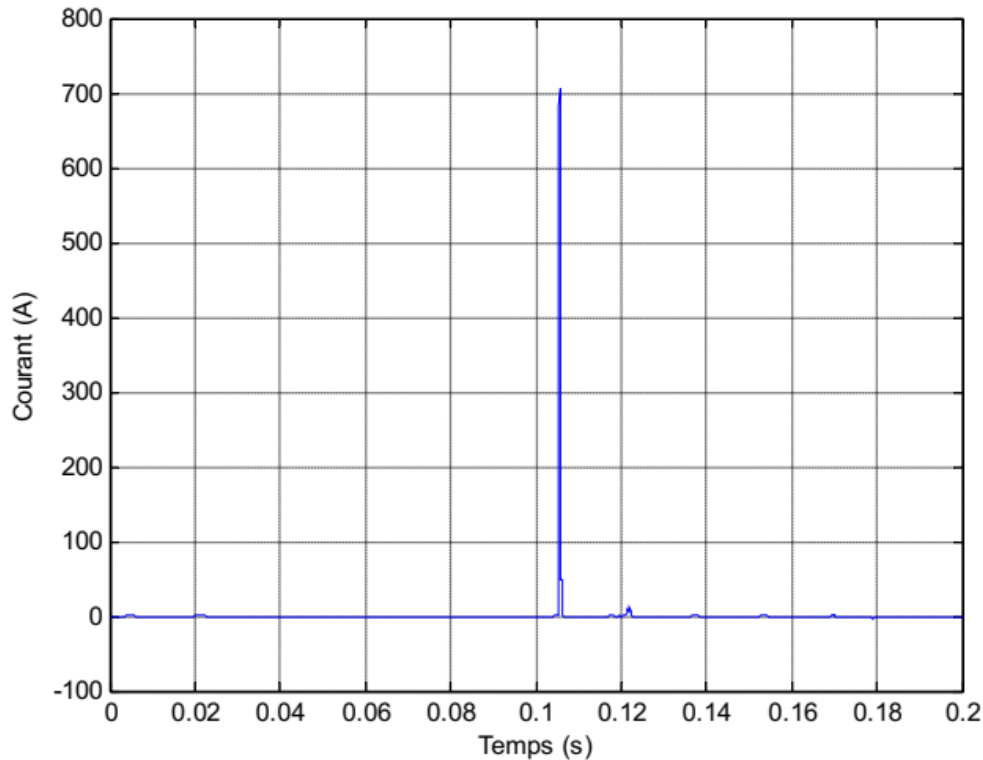


Figure III.11 : L'intensité du courant de parafoudre en fonction du temps.

D'après ces résultats de simulation, on peut remarquer :

- Des perturbations de la tension de parafoudre au moment de défaut sur la ligne de transmission (0.11 s). Figure III.10.
- Depuis la figure III.11 On peut constater que : pendant la condition de défaut, le courant est devenu très élevé (pic) donc il y a surintensité due à la foudre dans le temps (0.11s).
- Après ce temps le courant revient à sa valeur nominale c'est-à-dire le parafoudre conduit la surintensité vers la terre.

Le parafoudre (varistance) comporte une résistance fortement non linéaire.

Dans les conditions normales de service la résistance de plusieurs méga-ohm et le courant reste faible (de l'ordre du mA) limite la puissance dissipée.

Dans des conditions de surtension, la résistance chute de manière importante (jusqu'à environ 5 ou 10 ohms), limitant ainsi la tension aux bornes du parafoudre et donc de l'équipement pendant la durée d'écoulement du courant de foudre vers la terre.

- **La tension de la ligne $U = 220 \text{ KV}$:**

Les résultats de simulation du bloc SIMULINK sont montrés sur (Figure III.12) et (Figure III.13), pour une tension $U=220 \text{ KV}$ et une ligne de 90 Km .

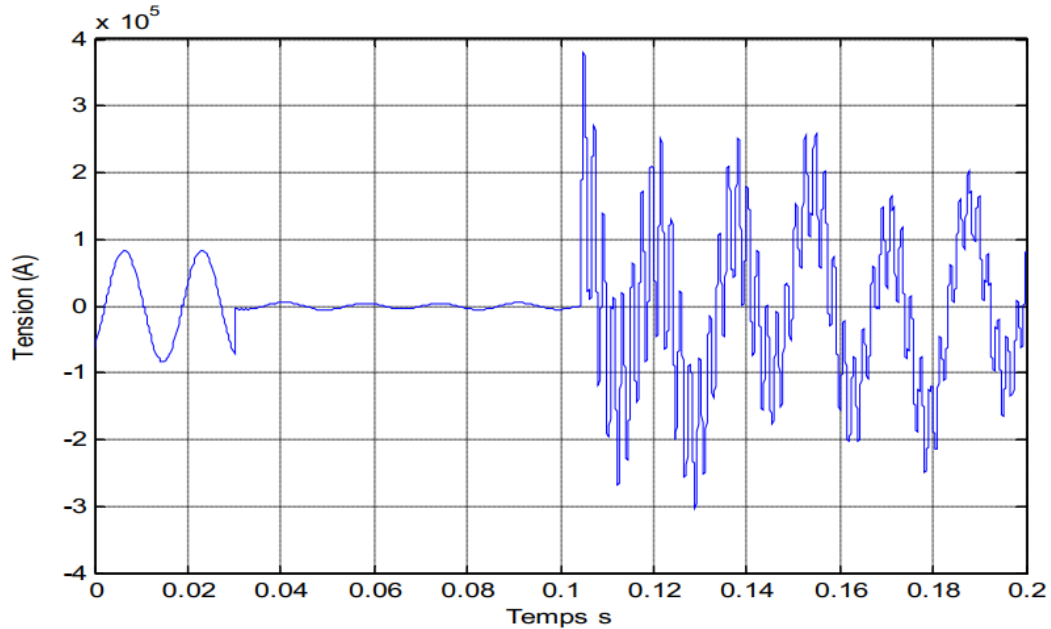


Figure III.12 : L'intensité de la tension de parafoudre en fonction du temps.

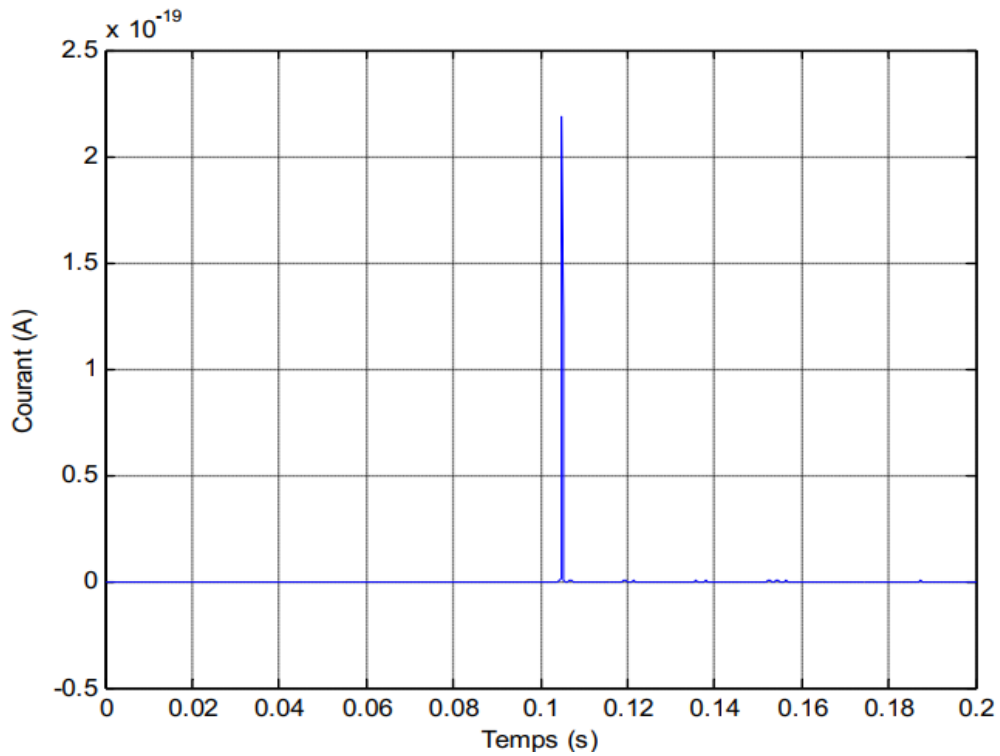


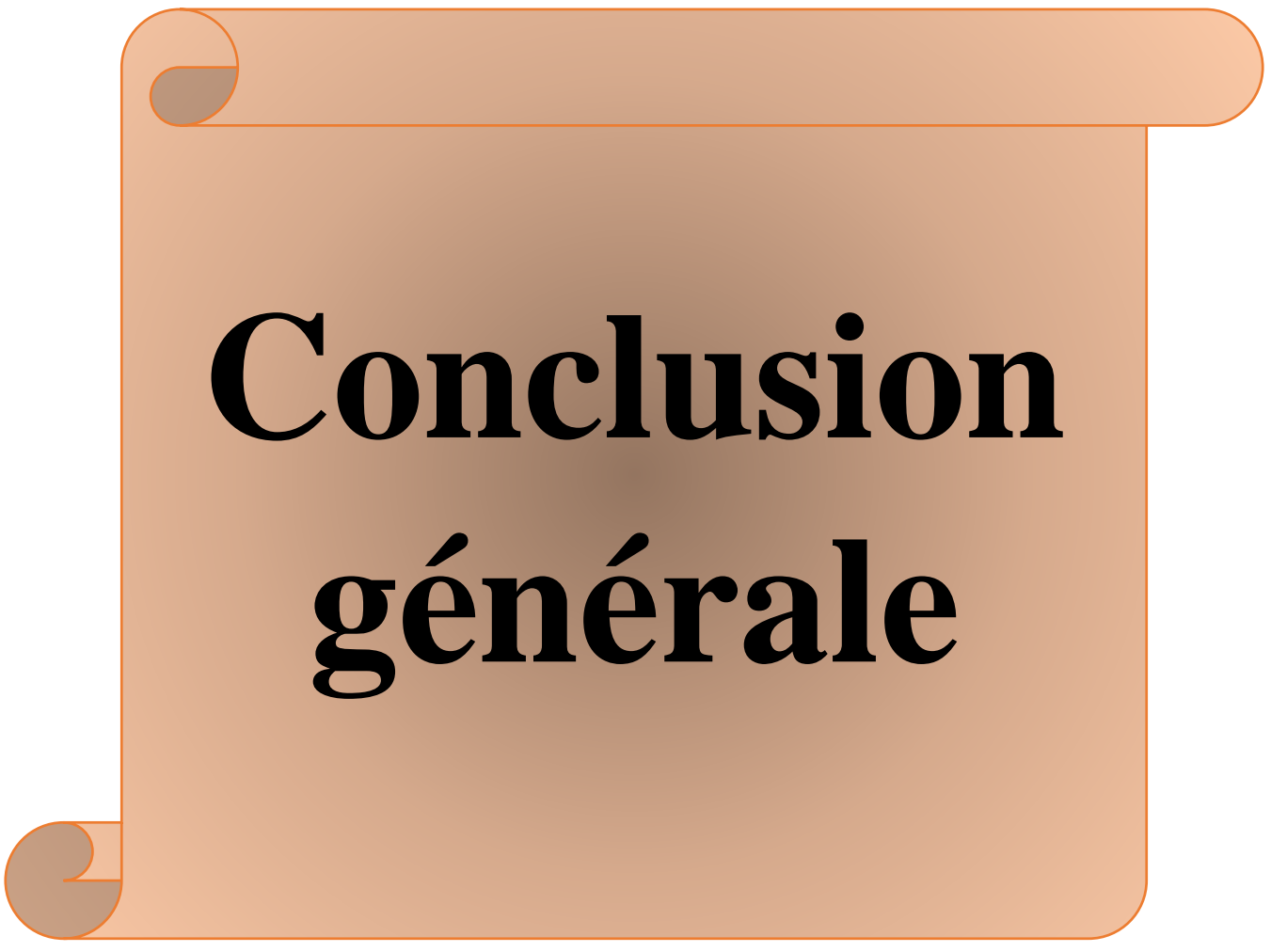
Figure III.13: L'intensité du courant de parafoudre en fonction du temps.

III.6. Conclusion :

Le choix du parafoudre doit se faire en fonction de l'installation monophasée ou triphasée mais aussi de la surtension et l'intensité maximale de décharge estimée.

Un parafoudre doit pouvoir absorber une surtension de plusieurs dizaines de volts, et un surcroît d'intensité de 10KA au minimum.

La plupart des parafoudres standards du marché respectent ce minimum de performance, mais il vaut mieux choisir un parafoudre ayant des performances plus élevées par défaut.



**Conclusion
générale**

Conclusion générale

L'étude d'une ligne aérienne présentée dans ce travail nous a permis de connaître les difficultés que présente le transport de l'énergie électrique.

Le chapitre I nous a permis de connaître les différentes parties composantes la ligne électrique ainsi que toute la chaîne d'appareillages qui entre dans le transport entre les centrales électriques et les lieux de consommation.

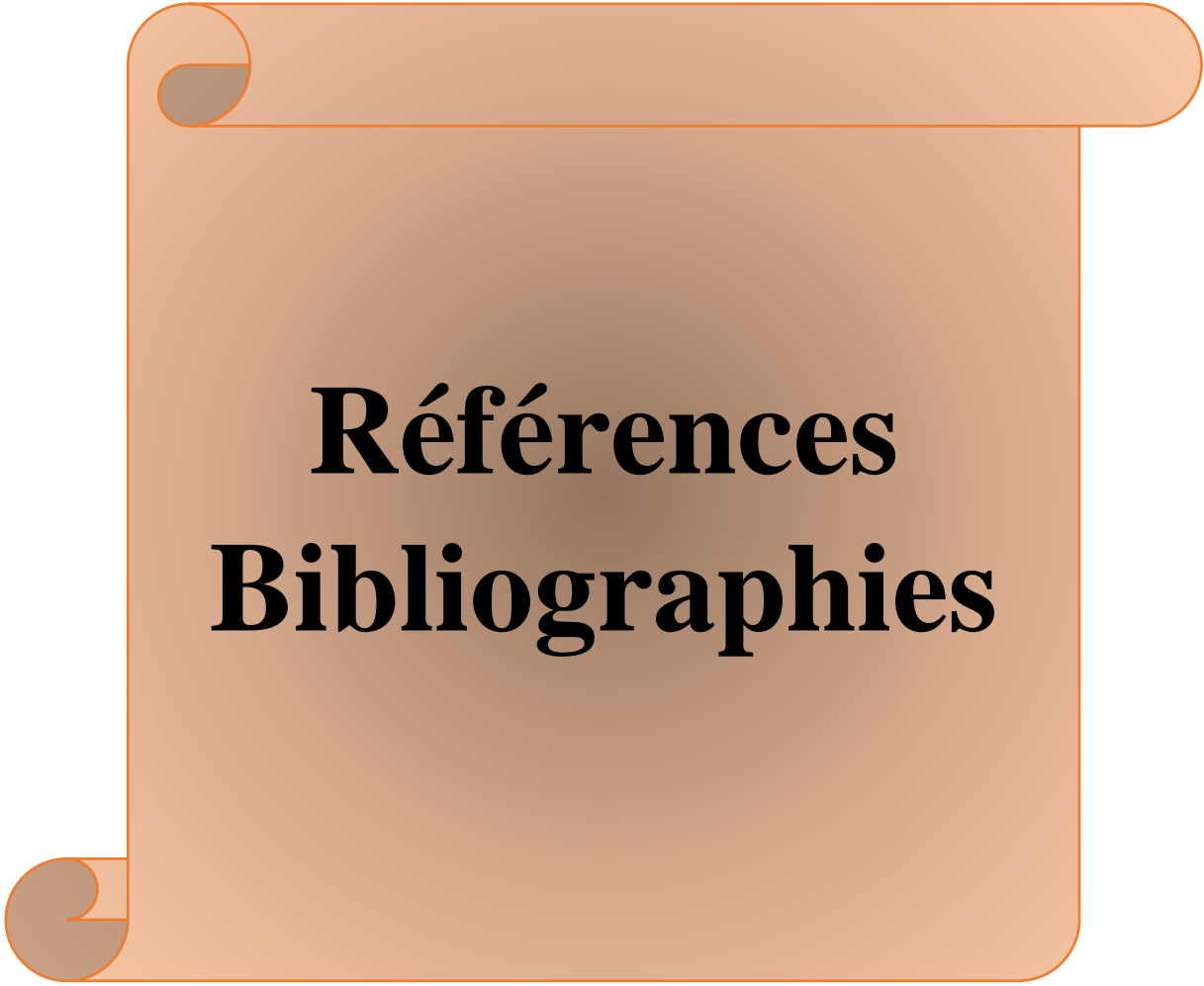
Dans le chapitre II nous avons modélisé une ligne de transport en haute tension.

Cela nous a permis d'obtenir un modèle mathématique qui décrit les relations entre les différents paramètres de la ligne.

Dans le chapitre III nous avons procédé à la simulation d'une ligne dont les paramètres ont été choisis suivant un catalogue de fabricant de câble.

D'après les courbes obtenues en fonction de certains paramètres (distance et température) les résultats de simulation nous paraissent conformes à la réalité sur le terrain.

En perspective on peut proposer un travail similaire mais en fonction de l'humidité et voir le vieillissement de la ligne.



Références
Bibliographies

Références Bibliographies

- [1] KOUADRA FOUED « Etude des Variations Rapides de Tension Pour le Raccordement d'une Production Décentralisée dans un Réseau MT » (Pfe 2003/2004) UNIVERSITE MENTOURI DE CANSTANTINE.
- [2] Ph. CARRIVE « Réseaux de Distribution - Structure et Planification », Techniques de l'Ingénieur, Traité Génie électrique D 4210, 2006.
- [3] Farid BENHAMIDA « Système per unit, Calcul des paramètres des lignes de transport, Modélisation des lignes électriques » polycopie de cours et exercices corrigés, Département d'électrotechnique, Université Djilali LIABES de Sidi Bel Abbès.
- [4] N. AOUZELLAG LAHAÇANI, « Réseaux électriques », Polycopié de cours UEF 3111, Université de A.MIRA-BEJAIA
- [5] Electrical Energy Systems (Mohamed E. El-Hawary Dalhousie University)
- [6] Etude Des Régimes De Fonctionnement Et De L'amélioration Des Performances Des Longues Lignes 400kv Et Plus. (Hassi Ameer-El Affroun) PFE USTO 2010/2011.
- [7] J- LILIEN, « Transport et distribution de l'énergie électrique », Manuel de travaux pratiques destiné au cours, Université de Liège 1999/2000.
- [8] Messad, Oussama, and Nouh Agguini. Calcul des paramètres et caractéristiques des lignes électriques triphasées. Diss. UNIVERSITE MOULOUD MAMMERI TIZI-OUZOU, 2021.
- [9] Ben Haoua, et al. ,Etude et analyse les paramètres électriques et mécaniques d'une ligne à haute tension., (2021).
- [10] Bellamouchi, et al. ,Conception et simulation de lignes électriques à haute tension., (2021).
- [11] J.BERRACHED :«La foudre, Technique de la Haute Tension», polycopie de cours, Avril 2015.
- [12] F.MACIELA : «Parafoudres à moyenne tension HTA et à haute tension HTB», Technique de L'ingénieur D4755 ,10 Mai 2008
- [13] Support de Cours Réseaux Electriques, Centre Universitaire Nour El Bachir El Bayadh, Année universitaire 2017/2018.
- [14] M.BOUDOUR, A.HELLAL, „Réseaux électriques : fondamentaux et concepts de base’, édition : PAGES BLEUES INTERNATIONALES, 2014 ;
- [15] M. BROWN, B.RAMESH, „Practical power systems protection’, édition: Newnes, 2004;
- [16] M.ATAOUA, O. MEHAMMDIA : «Comparaison des Modèles d'Arc en Retour d'un Coup de Foudre en Présence d'une Tour », Mémoire Master, Beskra Juin 2010.

- [17] N. HADJSAID, J.C. SABONNADIÈRE, 'Smart grids : les réseaux électriques intelligents', édition : HERMES - LAVOISIER, 2012 ;
- [18] N. HADJSAID, J.C. SABONNADIÈRE, 'Lignes et réseaux électriques 1 : Lignes d'énergie électrique', édition : HERMES - LAVOISIER, 2007 ;
- [19] N. HADJSAID, J.C. SABONNADIÈRE, 'Lignes et réseaux électriques 2 : méthodes d'analyse des réseaux électriques', édition : HERMES - LAVOISIER , 2007 ;
- [20] M.BOUKANDOURA :« Protection des réseaux électriques de haute tension contre les Surtensions par les parafoudres à varistances ZnO», Mémoire Magister, Annaba 2007.
- [21] M.DIB : «L'impact de la foudre sur les réseaux électriques», Thèse de doctorat, Annaba 2007.
- [22] INERIS. Institut International de l'Environnement et des Risque :« Le risque de foudre et les Installations classés pour la protection de l'environnement », Septembre 2011.