



République Algérienne Démocratique et Populaire  
Ministère de l'Enseignement Supérieur  
et de la Recherche Scientifique



Université Hamma Lakhdar. El Oued  
FACULTE DE LA TECHNOLOGIE  
DEPARTEMENT DE GENIE MECANIQUE

Mémoire de fin d'étude

Présenté pour l'obtention du diplôme de

**MASTER ACADEMIQUE**

Domaine : Sciences et Technologies

Filière : Génie Electrique

Spécialité : Réseau Electrique

Thème

**Simulation et conception de ligne électrique à  
haute tension, (caractéristiques électriques de  
lignes).**

Prénster par :

- Douis Kamel Eddine
- Labreche Bilal
- Melik Zakaria

Encadré par :

Dr. Mammeri Oussama

Devant le jury composé de :

- Barka Noreddin
- Labii Yacin

2021/2022



# *Remerciements*

*On remercie DIEU pour nous avoir donné la santé et le courage pour inspirer la connaissance et le savoir.*

*Au terme de la réalisation de ce mémoire, nous tenons à présenter nos remerciement les plus sincères à notre*

*Encadreur **Mr Maamri Oussama,***

*Ainsi que les membres de jury d'avoir accepté de juger notre travail, enfin nous témoignons notre gratitude à toutes les personnes ayant contribué de près ou de loin à la réalisation de cet humble mémoire.*

# Dédicaces

*Afin d'être reconnaissant envers ceux qui m'ont appuyé  
et encouragé à effectuer ce travail de recherche, je dédie  
ce modeste travail :*

*A mes très chers parents qui m'ont guidé durant les  
moments les plus pénibles de ce long chemin, ma mère  
qui a été à mes côtés et m'a soutenu durant toute ma vie,  
et mon père qui a sacrifié toute sa vie afin de me voir  
devenir ce que je suis, merci mes parents.*

*A ma chère sœurs A mon cher frère  
Sans oublier tous mes amis(e) et tous ceux qui me sont  
Chers kamel et bilal et zakaria*

### 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 son Comportement vis-à-vis des puissances transportées

**Le mot clé :** -lignes électriques -haute tension – caractéristiques électrique.

### المخلص

تلعب شبكات النقل دورا رئيسيا في إيصال 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 نمذجة وحساب الخصائص الكهربائية بالحصول على مؤشرات دقيقة الى حد ما من اجل تقييم سلوكها فيما يتعلق بالقوى المنقولة .

**الكلمات الرئيسية:** خطوط كهربائية -الجهد العالي –الخصائص الكهربائية

# Sommaire

---

---

# Table de Matières

INTRODUCTION GENERALE.....2

## Chapitre I : Générales sur les lignes électriques

I.1.Introduction.....5

I.2. Définition des lignes électriques.....5

I.3. Types des lignes.....5

I.4. Utilisation des lignes selon le type de réseau électrique.....5

I.4.1. Lignes de distribution à basse tension (BT).....6

I.4.2. Lignes de distribution à moyenne tension (MT).....6

I.4.3. Lignes de transport à haute tension (HT).....6

I.4.4. Lignes de transport à très haute tension (THT).....6

I.5. Composantes d'une ligne.....6

I.5.1. Supports.....6

I.5.2. Conducteurs.....7

I.5.3. Câble de garde.....7

I.5.4. Isolateur.....8

I.6. Classification de la ligne électrique en termes de qualité.....8

I.6.1 Tension électrique.....8

I.6.1.1 Basse tension .....8

I.6.1.2 Effort moyen.....9

I.6.1.3 Haute tension.....10

I.6.2 conducteurs.....10

I.6.2.1 Conducteurs en cuivre.....10

I.6.2.2 Conducteurs en aluminium.....10

I.6.2.3 Comparaison.....11

I.7 Construction d'une ligne.....12

I.7.1 Lignes galopantes.....12

I.7.2 Effet couronne - interférences radiophoniques.....12

I.7.3 Pollution.....12

I.7.4 Mise à la terre des pylônes.....13

I.8 Modes d'utilisation des lignes électriques.....13

I.8.1 Réseaux HTA aériennes.....	13
I.8.2 Réseaux HTA souterrains.....	13
I.9 Avantages et inconvénients respectifs des lignes aériennes et câbles souterraines.....	14
I.9.1 Lignes aériennes.....	15
a. Avantages.....	15
b. Inconvénients.....	15
I.9.2. Câbles souterraines.....	15
a. Avantages.....	15
b. Inconvénients.....	16
I.10 Conclusion.....	16

## Chapitre II : Modélisation et calcul des paramètres et caractéristiques des lignes

II.1 Introduction.....	18
II.2 Les paramètres de la ligne électrique.....	18
II.2.1 Les paramètres transversaux.....	19
II.2.1.1 Conductance.....	19
II.2.1.2. La capacité de la ligne.....	19
II.2.2. Les paramètres longitudinaux.....	22
II.2.2.1 La résistance de la ligne.....	22
II.2.2.2 Inductance de la ligne.....	24
II.3 Modélisation du réseau électrique.....	33
II.3.1 Introduction.....	33
II.3.2 Modélisation de ligne longue.....	34
II.4 Un exemple d'étude de ligne à double circuit.....	36
II.4.1 Caractéristiques électriques de ligne.....	37
II.4.2 Résistance de la ligne.....	37
II.4.3 Réactance de la ligne.....	38
II.4.6 Puissance caractéristique de la ligne.....	38

II.4.7 Calcul du champ électrique superficiel des conducteurs.....	39
II.5 Caractéristiques électriques de la ligne.....	40
II.6 Calcul du pas du faisceau (cas de deux conducteurs).....	40
II.6.1 Commentaire et analyse des résultats obtenus.....	41
II.7 Schéma équivalent de longue ligne.....	42
II.7.1 Calcul de la l'impédance et de l'admittance des longues lignes.....	42
II.7.2 Les lignes sans pertes (lignes idéales).....	44
II.8 Conclusion.....	45

**Chapitre III : Simulation d'une ligne de transport**

III.1 Introduction.....	47
III.2 Caractéristiques de la ligne.....	47
III.3 Interface graphique.....	47
III.4 Variation de la température.....	48
III.4 .1 Organigramme de calcul.....	48
III.4 .2 Résultats.....	49
III.4 .3 Interprétation des résultats.....	49
III.4 .3.1 Tension d'entrée en fonction de la température.....	49
III.4 .3.2 courant d'entrée en fonction de la température.....	50
III.5 Variation de la distance.....	50
III.5.1 Organigramme de calcul.....	50
III.5.2 Résultats.....	51
III.5.3 Interprétation des résultats.....	53
III.5.3 .1 Tension d'entrée en fonction de la distance.....	53
III.5.3 .2 Courant d'entrée en fonction de la distance.....	53

## Sommaire

---

<b>III.5.3 .3 Pertes de puissance sur la ligne.....</b>	<b>53</b>
<b>III.6 Calcul des caractéristiques de la ligne électrique triphasée.....</b>	<b>53</b>
<b>III.6.1 Calcul des caractéristiques de la ligne longue.....</b>	<b>53</b>
<b>III.6.2 Algorithme de calcul des caractéristiques de ligne longue.....</b>	<b>54</b>
<b>III.7 Conclusion.....</b>	<b>56</b>
<b>CONCLUSION GENERALE.....</b>	<b>58</b>

---

---

## Table de Figures

Figure I.1 Types usuels de pylônes en treillis pour lignes à deux ou plusieurs ternes .....	6
Figure I.2 Conducteurs en faisceau .....	7
Figure I.3 Conducteur conventionnel sur la gauche et à âme en fibre composite à droite .....	7
Figure I.4 Réseau HTA aérienne en Simple dérivation .....	13
Figure I.5 Réseaux HTA souterrains en Double dérivation .....	14
Figure I.6 Réseaux HTA souterrains en Coupure d'artère .....	14
Figure II.1 Paramètres de la ligne .....	18
Figure II.2 Liaison monophasée .....	19
Figure II.3 Liaison triphasée avec espacement de phase égal.....	20
Figure II.4 Liaison triphasée avec espacement de phase inégal .....	20
Figure II.5 Ligne triphasée avec deux conducteurs en faisceaux .....	21
Figure II.6 La configuration des conducteurs en faisceaux .....	21
Figure. II.7 effet partielle à la terre.....	22
Figure. II.8 Effet de la température sur la résistance d'un conducteur électrique .....	23
Figure. II.9 champ magnétique est égale au courant entouré.....	24
Figure. II.10 Un conducteur massif.....	25
Figure. II.11 Conducteur de section circulaire plein .....	26
Figure. II.12 Circuit de n conducteurs parallèles .....	28
Figure. II.13 Conducteur 3 autour du conducteur 1 .....	28
Figure. II.14 Ligne triphasée avec espacement équilibré.....	30
Figure. II.15 Ligne triphasée transposée .....	31
Figure. II.16 Conducteurs en faisceaux .....	32
Figure. II.17 Modélisation d'une ligne longue.....	34
Figure. II.18 Pylône 400 kV à deux ternes utilisé.....	36
Figure. II.19 Schéma électrique d'une ligne .....	37
Figure. II.20 Le champ électrique $E_{max}$ en fonction 'a' .....	41
Figure. II.21 Schéma équivalent de la ligne (en $\pi$ ).....	42
Figure. II.22 Schéma équivalent d'un réseau électrique .....	42

## Sommaire

---

<b>Figure III.1 : Organigramme de calcul de tension et courant d'entrée en fonction de la température.....</b>	<b>48</b>
<b>Figure III.2 : Tension d'entrée en fonction de la température.....</b>	<b>49</b>
<b>Figure III.3 : Courant d'entrée en fonction de la température.....</b>	<b>49</b>
<b>Figure III.4 : Organigramme de calcul de tension et courant d'entrée en fonction de la distance.....</b>	<b>50</b>
<b>Figure III.5 : Tension d'entrée de la ligne en fonction de la distance.....</b>	<b>51</b>
<b>Figure III.6 : Courant d'entrée de la ligne en fonction de la distance.....</b>	<b>51</b>
<b>Figure III.7 : Chute de tension en fonction de la distance.....</b>	<b>52</b>
<b>Figure III.8 : Chute de courant en fonction de la distance.....</b>	<b>52</b>
<b>Figure III.9 : les données de la ligne longue.....</b>	<b>53</b>
<b>Figure III.10 : organigramme de calcul des caractéristiques de la ligne longue.....</b>	<b>55</b>

## Liste des tableaux

<b>Tableau. I.1</b>	<b>Isolateurs utilisés pour les différentes lignes.....</b>	<b>8</b>
<b>Tableau. I.2</b>	<b>Comparaison entre l'aluminium et le cuivre.....</b>	<b>11</b>
<b>Tableau. II.1</b>	<b>RMG des conducteurs toronnés.....</b>	<b>30</b>
<b>Tableau. II.2</b>	<b>RMG des conducteurs toronnés.....</b>	<b>33</b>
<b>Tableau. II.3</b>	<b>Tableau Racap pour la Modélisation des paramètres du réseau.....</b>	<b>35</b>
<b>Tableau. II.4</b>	<b>Calcul du pas optimal du faisceau (cas de deux conducteurs).....</b>	<b>40</b>
<b>Tableau. III.1</b>	<b>caractéristiques linéiques de la ligne longue .....</b>	<b>56</b>
<b>Tableau. III.2</b>	<b>les caractéristiques de la ligne longue.....</b>	<b>56</b>

## 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 ( $\Omega/\text{km}$ )

$C'$ : capacité linéique ( $\text{F}/\text{km}$ )

$L'$ : inductance linéique ( $\text{H}/\text{km}$ )

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

$S$ : Section des conducteurs ( $\text{mm}^2$ )

$l$ : Longueur de la ligne ou câble ( $\text{km}$ )

$t_1, t_2$ : 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 ( $\text{Hz}$ ).

$B$ : induction magnétique ( $\text{wb}/\text{m}^2$ )  $H$ : champ magnétique ( $\text{At}/\text{m}$ )

$\psi$ : Flux ( $\text{Wb} \cdot \text{t}/\text{m}$ )

$\mu_0$ : 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 ( $\Omega$ )  
 $Z$  : Impédance de la ligne ( $\Omega$ )  
 $\bar{Z}_c$  : Impédance caractéristique ( $\Omega$ )  
 $\gamma$  : Coefficient de propagation  
 $\theta$  : 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  
 $\eta$  : Le rendement de la ligne (%)  
 $\Delta\bar{U}$  : La chute de tension dans la ligne

# Introduction Générale

# INTRODUCTION GENERALE

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.

L'Algérie est devenue à l'heure actuelle un pays industrialisé.

L'électricité joue un rôle très important dans toutes les branches de l'économie nationale, tel que l'industrie, l'agriculture, l'usage domestique et le transport.

Cependant, le progrès technique et social exige le développement de tout ce qui est lié au processus de production, de transport, de distribution et de consommation de l'énergie électrique.

Depuis sa découverte, elle n'a cessé de se développer et actuellement elle est devenue la base de tout développement du point de vue matériel et modernité.

La vie demande de plus en plus de l'énergie électrique pour la consommation industrielle et domestique.

On a donc intérêt de produire plus et de transporter loin, malheureusement les sources de production ne sont pas proches des consommateurs, c'est pourquoi on est obligé de la transporter à travers des réseaux de haute tension.

L'énergie électrique doit être utilisée au moment où elle est produite puisqu'il est impossible de la stocker, ce qui explique que sa production dans différents types de centrales et sa consommation se font d'une manière simultanée qui exige l'utilisation de plusieurs types de réseaux électriques tels que :

- Les réseaux de transports à tension élevée qui relient les postes d'interconnexions au site de production.
- Les réseaux de répartitions qui fournissent la puissance aux réseaux de distribution, mais ne peuvent la transiter que sur des distances limitées à quelques kilomètres.
- Les réseaux de distribution ont pour fonction aux réseaux d'utilisation la puissance dont ils ont besoin.
- Les réseaux industriels sont des réseaux d'alimentation mis avec des puissances élevées.
- Les réseaux d'utilisation doivent souvent pouvoir alimenter un grand nombre de moteurs et d'appareils domestiques, dont la puissance ne dépasse pas quelques

# Introduction Générale

---

kilowatts.

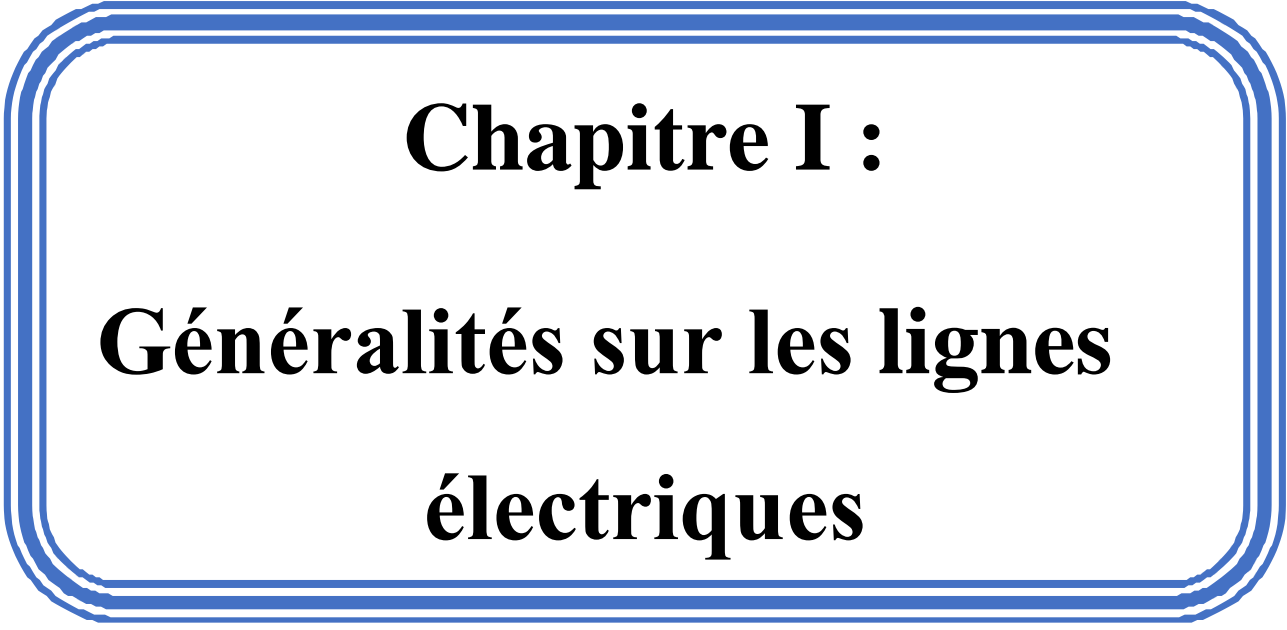
La demande de certains consommateurs en énergie électrique exige une qualité, une fiabilité et une bonne continuité de service suivant les différentes catégories tels que:

- Les consommateurs de 1<sup>ère</sup> catégorie qui n'admettent pas la rupture de la fourniture d'énergie électrique sauf pour une durée inférieure à 1,5 secondes.
- Les consommateurs 2<sup>ème</sup> catégorie qui admettent une rupture de la fourniture en énergie électrique pendant une durée inférieure à 2 heures.
- Les consommateurs 3<sup>ème</sup> catégorie qui admettent une rupture de la fourniture en énergie électrique pendant une durée nécessaire au remplacement de l'installation défectueuse.

Le présent mémoire est structuré comme suit :

- ✓ Le premier chapitre présente des généralités sur la ligne électrique
- ✓ Le deuxième chapitre traite les paramètres et le modèle électrique de la ligne
- ✓ 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 lignes**  
**électriques**

# Chapitre I

## Générales sur les lignes électriques

---

### I.1.Introduction

Le transport de l'énergie électrique est un coefficient fondamental dans la structure du réseau électrique. Le rôle fondamentale d'une ligne est de transporter l'énergie électrique. Les conducteurs aériens sont soumis à l'action des facteurs atmosphériques : température, vent, pluie, etc.

Ces facteurs interviennent de façon importante dans le choix des paramètres d'une ligne haute-tension : type de conducteur électrique (matériaux et géométrie), hauteur et distance des pylônes, tension mécanique maximum sur le conducteur afin de maintenir une garde au sol suffisante etc.

Ce chapitre vise à déterminer ces caractéristiques longitudinales (résistances des conducteurs, les inductances entre les conducteurs) et les caractéristiques transversales (capacité des conducteurs), l'étude générale sur la ligne en cas général.

### 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 comprise entre 50 et 150 kV. [2]

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

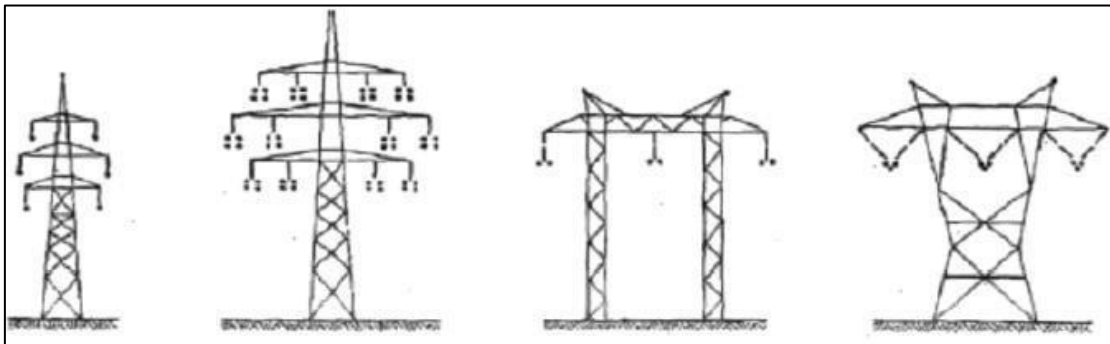
Les lignes THT permettent de transporter des quantités d'électricité très importantes sur de longues distances avec des pertes minimales. Elles relient les régions et les pays entre eux et alimentent directement certaines grandes zones industrielles. elles fonctionnent à des tensions allant jusqu'à 765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

### I.5. Composantes d'une ligne

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

#### I.5.1. Supports

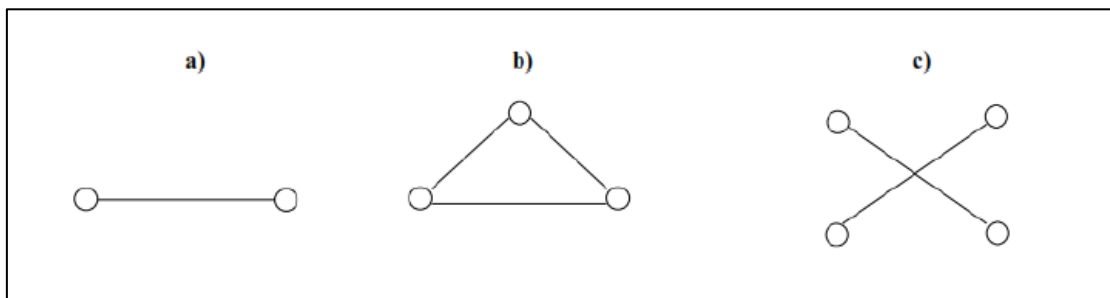
Le rôle des pylônes est de maintenir les câbles à une distance minimale de sécurité du sol et des obstacles environnants, afin d'assurer la sécurité des personnes et des installations situées au voisinage des lignes. Leur silhouette est caractérisée par la disposition des câbles conducteurs. L'écartement 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.



**Fig.I.1.** Types usuels de pylônes en treillis pour lignes à deux ou plusieurs lignes

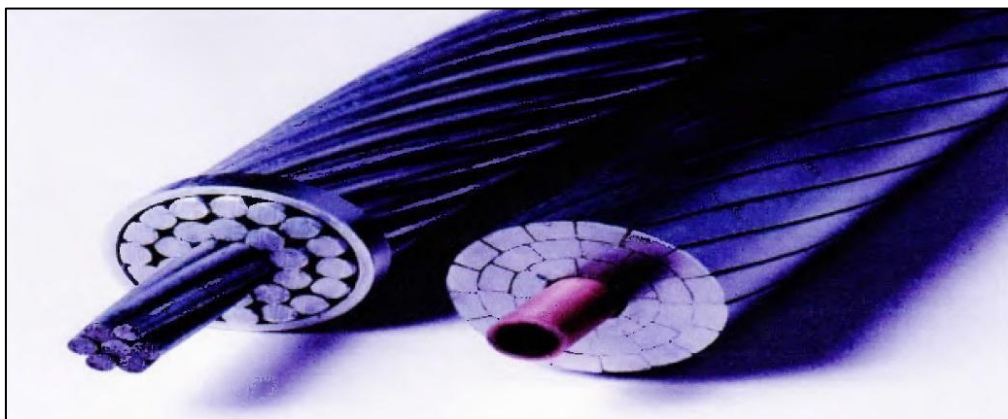
### I.5.2. Conducteurs

Les conducteurs nus, utilisés pour la construction des lignes aériennes, sont des câbles constitués de fils ronds ou exceptionnellement de fils trapézoïdaux ou profilés en forme de Z. Pour réaliser ces câbles, les métaux conducteurs de faible résistivité sont peu nombreux. Seuls sont utilisés actuellement l'aluminium dans sa forme écroui dur, de grande pureté d'une part, et un alliage d'aluminium, l'almélec, d'autre part.



**Fig.I.2** Conducteurs en faisceau

Depuis plusieurs années, le cuivre n'est plus utilisé en raison de sa masse et de son coût. Cependant, des conducteurs en cuivre équipent encore des lignes anciennes.



**Fig.I.3** Conducteur conventionnel sur la gauche et à âme en fibre composite à droite

### I.5.3. Câble de garde

Les câbles de garde ne transportent pas le courant. Ils sont situés au-dessus des conducteurs, ils sont plus tendus que ceux-ci pour assurer une bonne protection contre la foudre.

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'almélec.

Deux types de câbles de garde sont utilisés :

- des câbles almélec-acier normaux ;
- des câbles almélec-acier comportant à l'intérieur des circuits de télécommunication.

### I.5.4. Isolateur

Les isolateurs assurent l'isolement électrique entre les câbles conducteurs et les supports. Sur le réseau de transport, les isolateurs sont utilisés en chaîne, dont la longueur augmente avec le niveau de tension.

Les isolateurs ont deux fonctions principales :

- Ils empêchent le courant électrique qui circule dans les conducteurs de phase dépassé dans les pylônes.
- Ils accrochent les conducteurs de phase au pylône. [1]

Type de ligne	230/400 (420KV)	130/225 (245 kV)	52/90 (100KV)	36/63 (72,5KV)	12/20 (24KV)	230/400V
Appellation	400KV	225 kV	90 kV	63 Kv	20KV	400V
Classification	THT (HTB transport national)		HT (HTB transport regional)		MT (HTA Distribut-ion)	BT (Consummation)
Nombre d'isolateus	19	12 à 14	9	4 à 6	2 à 3	1

**Tableau I.1.** Isolateurs utilisés pour les différentes lignes

### I.6. Classification de la ligne électrique en termes de qualité

#### I.6.1 Tension électrique

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

##### I.6.1.1 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 :

- 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 câble est conçu.

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

$U_m$  : 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.6.1.2 Effort moyen

Les câbles moyens 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 :

$$E_x = \frac{U_0}{r_x \cdot \ln\left(\frac{r_a}{r_i}\right)} \text{ (KV/mm)} \quad (1.1)$$

$U_0$  : 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.6.1.3 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 de 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.6.2 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.6.2.1 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.6.2.2 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.6.2.3 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.

Comparaison des propriétés XHHW-2	Aluminium de série AA-8000	Cuivre
Taille AGW pour 60 A à 75 °C	6	8
Poids par 1 000 pi	39 lb.	65 lb.
Diamètre nominal	0,26 po	0,23 po
Tension de traction maximale	157 lb.	lb 132

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

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. [6]

## **I.7 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.7.1 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.7.2 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.7.3 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.7.4 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]

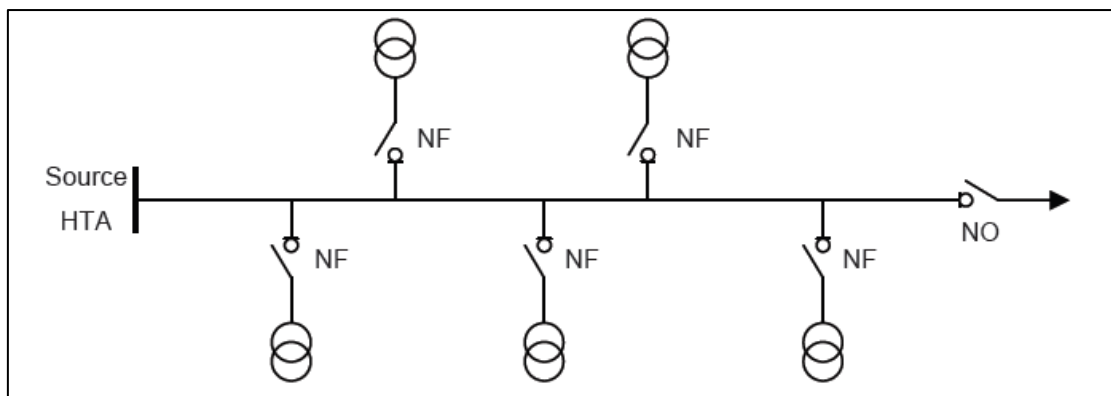
#### I.8 Modes d'utilisation des lignes électriques

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

##### I.8.1 Réseaux HTA aériennes

Les zones rurales à faible densité de charge sont alimentées par des lignes HTA aériennes en simple dérivation (figure I.7), traditionnellement moins coûteuses que les câbles souterraines.

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



**Fig.I.4** Réseau HTA aérienne en Simple dérivation

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

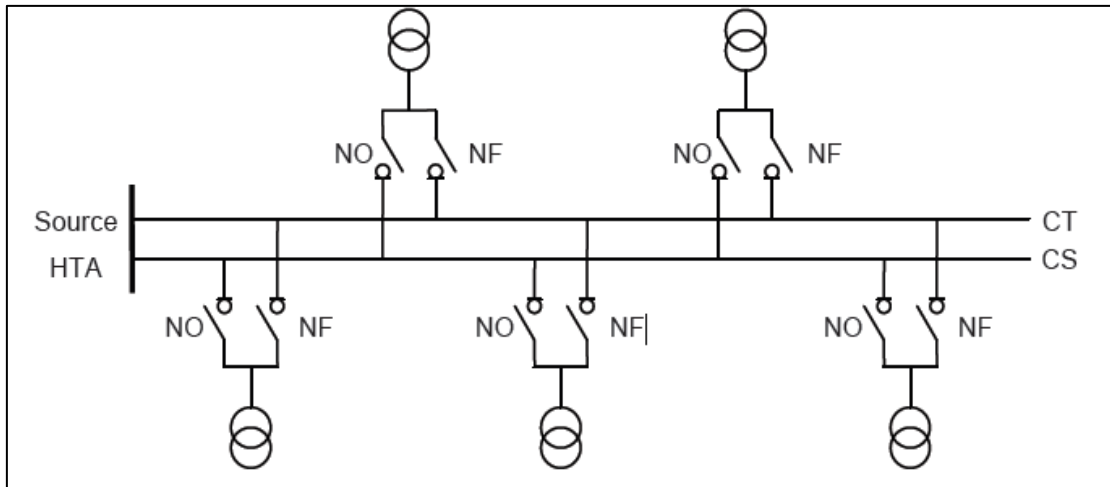
##### I.8.2 Réseaux HTA souterrains

Les zones urbaines ou mixtes à forte densité de charge sont alimentées par des câbles HTA enterrés en double dérivation (figure I.8) ou en coupure d'artère (figure I.9). 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.

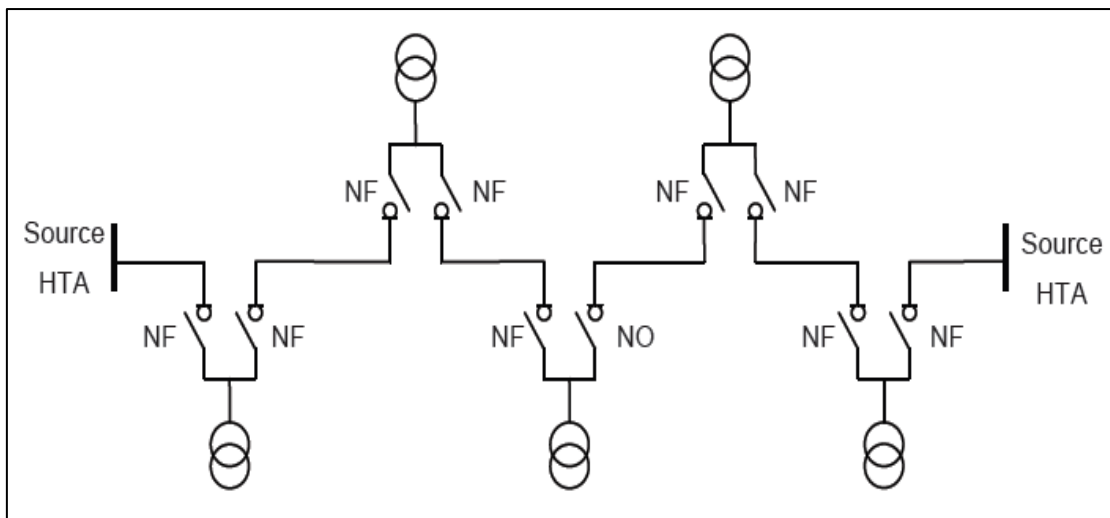
Le dimensionnement des ouvrages souterrains est principalement lié aux courants admissibles dans les câbles en raison de la densité des charges à desservir. [8]

Les ouvrages de distribution neufs ou les rénovations en zones rurales sont également réalisées 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]



**Fig.I.5** Réseaux HTA souterrains en Double dérivation



**Fig.I.6** Réseaux HTA souterrains en Coupure d'artère

**I.9 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. [8]

### **I.9.1 Lignes aériennes**

#### **a. AVANTAGES**

- Sont moins coûteuses que les câbles souterraines 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 sur chargées en intensité de courant sans trop de danger. [8]

#### **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. [8]

### **I.9.2. 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. [8]

#### **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. [8]

### **I.10 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 :**  
**Modélisation et calcul des paramètres**  
**et Caractéristiques des lignes**

# Chapitre II

## Modélisation et calcul des paramètres et caractéristiques des lignes

### II.1 Introduction

Une partie importante de l'ingénierie du système d'alimentation englobe la transmission de l'énergie électrique d'un endroit particulier (par exemple, une centrale) à une autre sous-station ou unité de distribution similaire avec une efficacité maximale. Il est donc très important pour les ingénieurs du système d'alimentation d'être approfondis avec sa modélisation mathématique. Ainsi, l'ensemble du système de transmission peut être simplifié à un réseau à deux ports pour des calculs plus faciles.

Selon la longueur de la ligne, on distingue trois types de lignes ; les lignes courtes, moyennes et longues ; la modélisation de toutes ces lignes exigent une précision dans les calculs, doit tenir compte du fait que leurs paramètres ne sont pas regroupés, mais plutôt repartis uniformément le long de chaque ligne.

Les lignes de longueurs courtes et moyennes peuvent être représentées par des paramètres concentrés et celles dites longues sont nécessairement représentées par des paramètres repartis. Leurs limites de longueur qui seront données dans la suite concernent les réseaux dont la fréquence est de 50 Hz.

### II.2 Les paramètres de la ligne électrique

Les lignes aériennes constituent des circuits de transmission des réseaux triphasés reliant des générateurs aux charges. Chacune possède ses propres caractéristiques résistive, inductive et 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 section R, L, C identiques. [10]

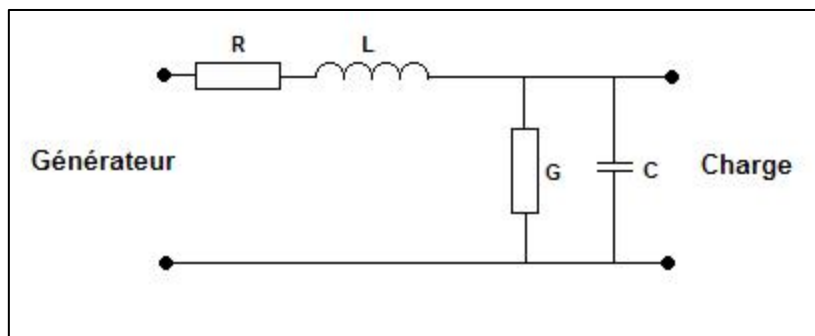


Fig. II.1. Paramètres de la ligne

## II.2.1 Les paramètres transversaux

### II.2.1.1 Conductance

Le terme  $G$ , en effet, dû aux courants superficiels au long des chaînes d'isolateurs et à l'effet couronne des conducteurs est, par temps sec,  $G$  est inférieur à  $0.005 C\omega$  ; ce n'est que sous très forte pluie, lorsque les courants superficiels et les pertes par effet couronne sont les plus élevés, que  $G$  peut atteindre  $0.1 C\omega$ . Ces conditions étant particulièrement rares, il est donc généralement admis de négliger la conductance transversale  $G$  des lignes. [9]

### II.2.1.2. La capacité de la ligne

Les charges superficielles sur le conducteur de la ligne créent un champ électrique perpendiculaire à la surface du conducteur et un courant capacitif. Ce phénomène est représenté par la capacité linéique  $C'$  de la ligne .pour son calcul, le fait qu' ; un conducteur soit creux ou plein ne joue plus aucun rôle puisque la charge se concentre a la périphérie (loi de faraday). [9]

#### II.2.1.2.1. Capacité d'une ligne monophasée

$$V_{xy} = \frac{q}{\pi \times \epsilon} = \ln \frac{D}{\sqrt{r_x r_y}}$$

$$C_{xy} = \frac{\pi \times \epsilon}{\ln \frac{D}{\sqrt{r_x r_y}}} \text{ (F/m)}$$

$$V_{xn} = V_{yn} = \frac{V_{xy}}{2}, \quad C_{xn} = \frac{\pi \times \epsilon}{\ln \frac{D}{\sqrt{r_x r_y}}} \text{ (II.1)}$$

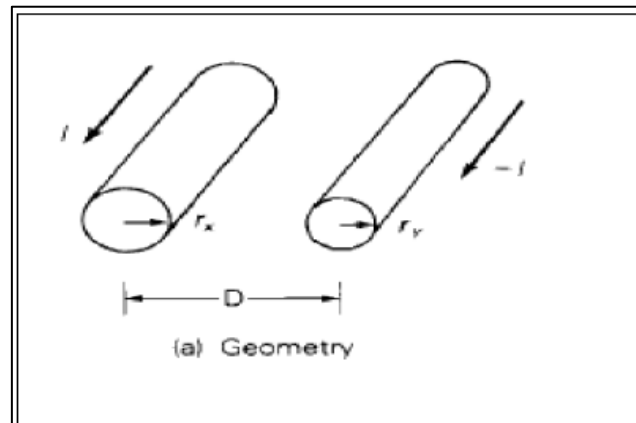
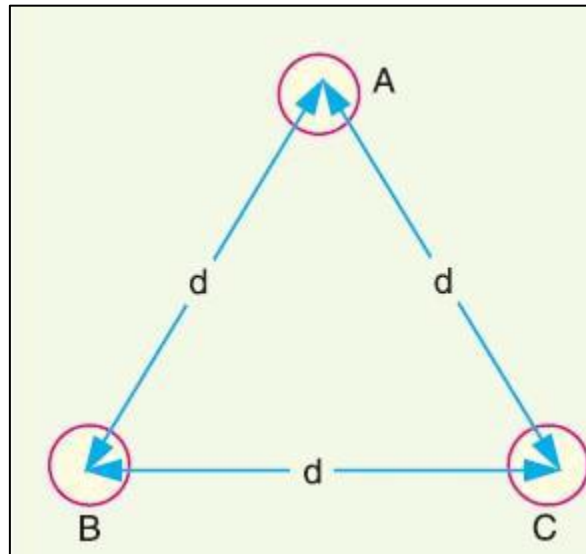


Fig. II.2. Liaison monophasée

#### II.2.1.2.2. Capacité d'une ligne triphasée

##### a. Capacité d'une ligne triphasée avec espacement de phase égal

On montre les trois conducteurs A, B et C de la ligne triphasée de transport aérienne ayant des charges  $Q_A$ ,  $Q_B$  et  $Q_C$  par mètre de longueur, respectivement. Que les conducteurs soient équidistants (mètres  $d$ ) de l'autre. Nous allons trouver la capacité de conducteur de ligne à neutre dans cette ligne espacés symétriquement. En se référant à la (Figure II.2). [9]



**Fig.II.3.** Liaison triphasée avec espacement de phase égal

$$D_{ab} = D_{ba} = D_{ca} = D_{cb} = D$$

$$D_{aa} = D_{bb} = r$$

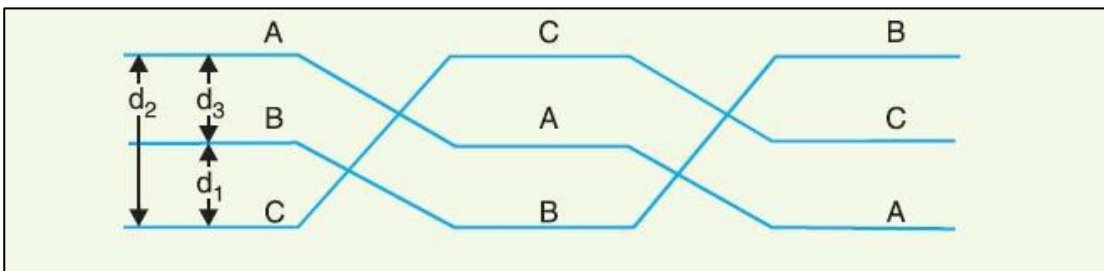
$$\left\{ V_{ab} = \frac{1}{2 \times \pi \times \epsilon} \left[ q_a \ln \frac{D}{r} + q_b \ln \frac{r}{D} \right] \right.$$

$$\left. \left\{ V_{ac} = \frac{1}{2 \times \pi \times \epsilon} \left[ q_a \ln \frac{D}{r} + q_c \ln \frac{r}{D} \right] \right. \right. \quad (II.2)$$

$$\left. \left. \left\{ V_{an} = \frac{q_a \ln \frac{D}{r}}{2 \times \pi \times \epsilon} \right. \right. \right.$$

$$C_{an} = \frac{2 \times \pi \times \epsilon}{\ln \frac{D}{r}} \text{ (F/m)} \quad (II.3)$$

**b. Capacité d'une ligne triphasée avec espacement de phase inégal**



**Fig.II.4.** Liaison triphasée avec espacement de phase inégal

$$\left\{ V_{ab} = \frac{1}{2 \times \pi \times \epsilon} \left[ q_a \ln \frac{D_{eq}}{r} + q_b \ln \frac{r}{D_{eq}} \right] \right. \quad (II.4)$$

$$\left. \left\{ V_{ac} = \frac{1}{2 \times \pi \times \epsilon} \left[ q_a \ln \frac{D_{eq}}{r} + q_c \ln \frac{r}{D_{eq}} \right] \right. \right. \quad (II.5)$$

$$\left. \left. \left\{ V_{an} = \frac{q_a \ln \frac{D_{eq}}{r}}{2 \times \pi \times \epsilon} \right. \right. \right.$$

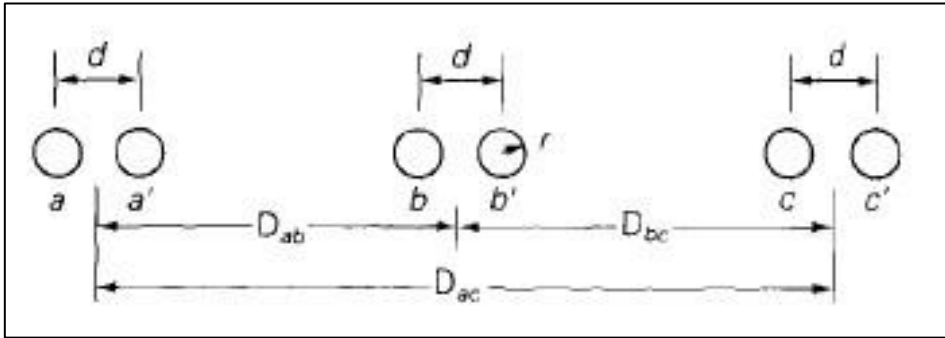
$$C_{an} = \frac{2 \times \pi \times \epsilon}{\ln \frac{D_{eq}}{r}} \text{ (F/m)} \tag{II.6}$$

Ou,

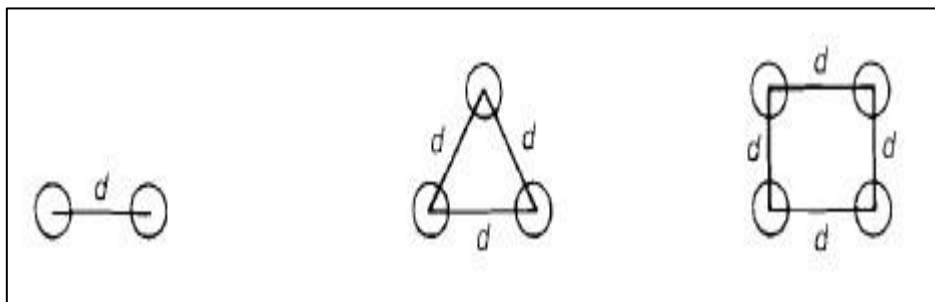
$$D_{eq} = \sqrt[3]{D_{ab} D_{bc} D_{ca}}$$

$D_{eq}$  : Distance géométrique moyenne (GMD)

**II.2.1.2.3. capacité des conducteurs en faisceaux**



**Fig.II.5.** Ligne triphasée avec deux conducteurs en faisceaux



**Fig.II.6.** La configuration des conducteurs en faisceaux

$$\left\{ V_{ab} = \frac{1}{2 \times \pi \times \epsilon} \left[ q_a \ln \frac{D_{eq}}{\sqrt{rd}} + q_b \ln \frac{\sqrt{rd}}{D_{eq}} + q_c \ln \frac{D_{bc}}{D_{ac}} \right] \right. \tag{II.7}$$

$$C_{an} = \frac{2 \times \pi \times \epsilon}{\ln \frac{D_{eq}}{D_{sc}}} \text{ (F/m)} \tag{II.8}$$

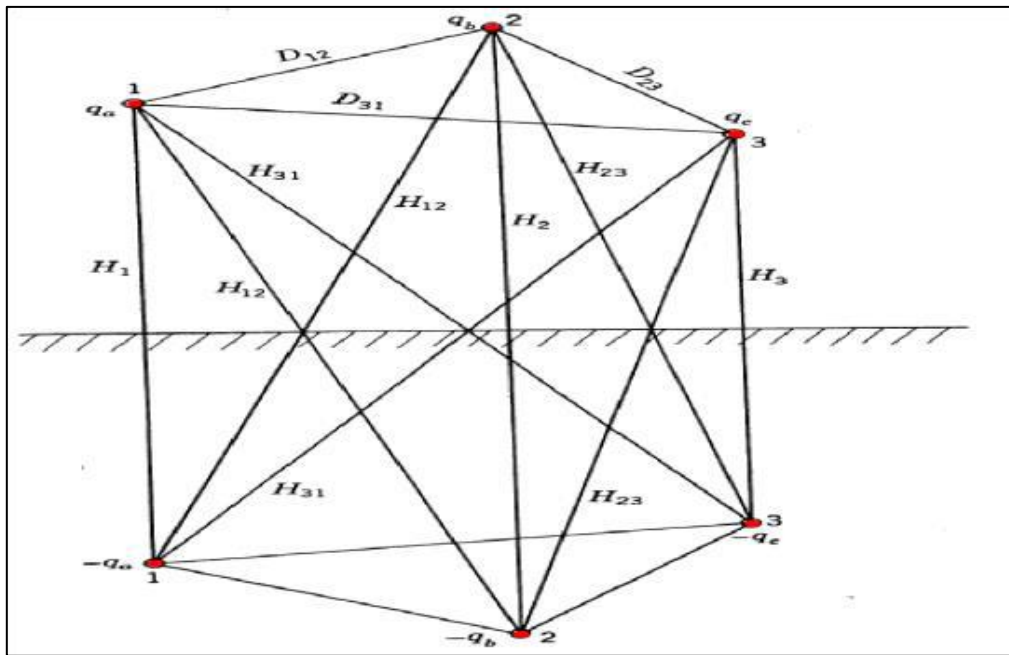
Ou:

$$D_{sc} = \sqrt{rd} \text{ Pour deux conducteurs en faisceaux.}$$

$$D_{sc} = \sqrt[3]{rd^2} \text{ Pour trois conducteurs en faisceaux.}$$

$$D_{sc} = 1.091 \times \sqrt[4]{rd^3} \text{ Pour quatre conducteurs en faisceaux.}$$

**II.2.1.2.4. Effet de la terre sur la capacité de la ligne triphasée**



**Fig.II.7.** effet partielle à la terre

$$C_n = \frac{2\pi k}{\ln\left(\frac{D_{eq}}{r}\right) - \ln\left(\frac{\sqrt[3]{H_{13}H_{23}H_{31}}}{\sqrt[3]{H_1H_2H_3}}\right)} \tag{II.9}$$

**II.2.2. Les paramètres longitudinaux**

**II.2.2.1 La résistance de la ligne**

Bien que la contribution de la résistance de ligne à l'impédance de ligne en série puisse être négligée dans la plupart des cas, c'est la principale source de perte de puissance de ligne.

La résistance Ohmique à courant continu d'un conducteur de longueur  $l$  et de section  $S$  est donnée par la formule :

$$R = \frac{\rho(T) \cdot l}{S} \tag{II.10}$$

Avec :

$$\rho(T) = \rho(T_0) \cdot [1 + \alpha(T - T_0)] \tag{II.11}$$

**a- Effet de spirilage du conducteur**

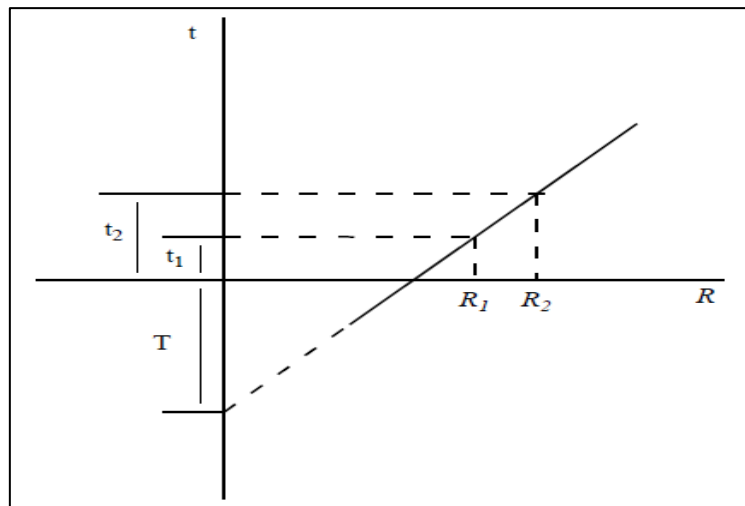
Le spirilage est une technique qui consiste à entourer les conducteurs de phases d'un matériau ferromagnétique, sous forme de spirales, qui absorbe de l'énergie du champ magnétique créée par le conducteur pour produire un échauffement positif (dû au cycle hystérésis) pour faire fondre le givre qui s'y accumule.

Quant aux conducteurs composites, les sous conducteurs sont rassemblés dans des couches spiralées, chaque couche est spiralée dans le sens opposé de la couche qui la précède afin d'éviter le relâchement des conducteurs. [10]

### b- Effet de température

La résistance varie aussi linéairement avec la température, suivant la formule :

$$\frac{R_2}{R_1} = \frac{T+t_2}{T+t_1} \quad (II.12)$$



**Fig.II.8.** Effet de la température sur la résistance d'un conducteur électrique

Où  $R_2$  et  $R_1$  sont les résistances du conducteur aux températures ( $^{\circ}\text{C}$ )  $t_1$  et  $t_2$  respectivement.  $T$  est la constante du matériau et est égale à :

$$T = \begin{cases} 234,5 & \text{pour le cuivre recuit de 100\% de conductivité} \\ 241 & \text{pour le cuivre étiré de 97,3\% de conductivité} \\ 228 & \text{pour l'aluminium de 61\% de conductivité} \end{cases}$$

### c- Effet Kelvin

En courant alternatif, la densité de courant dans un conducteur va en croissant vers la périphérie. Ce phénomène modifie les pertes par effet JOULE et la réactance interne des conducteurs.

Dans un conducteur cylindrique de grande longueur, les surfaces équipotentielles sont, en courant alternatif, tout comme en courant continu, des plans perpendiculaires à l'axe du cylindre. Chaque filet de courant subit donc la même chute de tension totale par unité de longueur.

Cette chute de tension se compose d'une chute ohmique à laquelle s'ajoute une chute de tension réactive  $\partial\Phi/\partial t$ . Ce dernier terme est plus important pour les filets de courants situés près du centre du conducteur que pour les autres, car c'est là que le flux est le plus élevé. Il en résulte que la densité de courant doit aller en diminuant de la surface vers le centre du conducteur.

A égalité entre la valeur du courant alternatif et celle du courant continu circulant dans le même conducteur, la perte de puissance par effet JOULE sera donc plus élevée dans le cas du courant alternatif. Tout se passe comme si la résistance subissait un accroissement.

L'effet pelliculaire est caractérisé par le rapport  $R/R_0$  de la résistance effective en courant alternatif à la résistance en courant continu. Ce rapport est sensiblement égal à l'unité pour des conducteurs non magnétiques, de faible section et à fréquence industrielle. Il augmente considérablement avec la perméabilité, la valeur de la section et la fréquence. [11]

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

$$q = \pi \cdot d \sqrt{\frac{2 \times f \times 10^{-5}}{\rho}} \quad (II.13)$$

d : diamètre de conducteur en cm.

f : fréquence du réseau en Hz.

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

## II.2.2.2 Inductance de la ligne

### II.2.2.2.1 Définition [12]

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

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

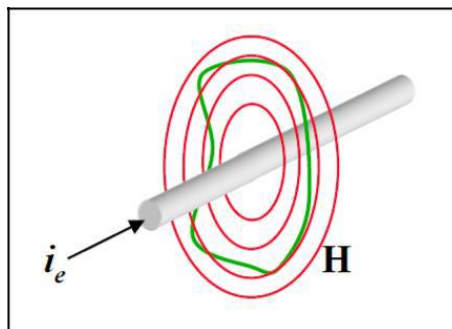
$$\text{Du flux} = \frac{d\phi}{dt} = L \frac{di}{dt}$$

### II.2.2.2.2 Inductance d'un conducteur

#### a. Inductance d'un conducteur due au flux intérieur

Un courant électrique d'intensité I, parcourant un fil conducteur, crée un champ magnétique autour de celui –ici.

D'après la loi de Maxwell, l'intégrale linéique de l'intensité de champ magnétique est égale au courant entouré



**Fig.II.9.** champ magnétique est égale au courant entouré

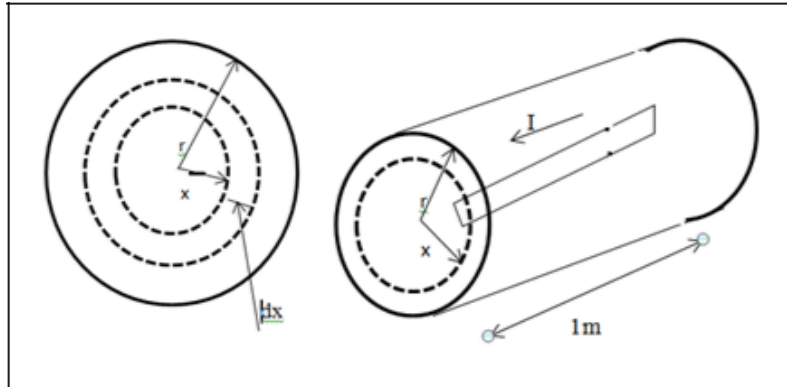
Soit un conducteur de rayon  $r$  parcouru par un courant  $I$ , considérant le champ magnétique  $H$  créée à l'intérieur de ce conducteur a une distance  $x$  du centre .soit le courant entoure par un cercle de rayon  $x$ .  $H$  constant à chaque point du cercle. [12]

$$H2\pi X = I_x$$

$$H = \frac{I_x}{2\pi X} (At/m)$$

$$B = \mu_0 H \text{ (wb/m}^2\text{)}$$

$$B = \mu_0 \frac{I_x}{2\pi X} \quad (II.14)$$



**Fig.II.10.** Un conducteur massif

Le flux travers une section d'épaisseur  $dx$  et de longueur de  $1m$  est :

$$d\phi = B.ds = B.dx . 1$$

Supposant que la densité du courant est uniforme :

$$\frac{I_x}{\pi x^2} = \frac{I}{\pi r^2} = \frac{x^2}{r^2} I$$

Le flux intérieur entoure seulement une partie du conducteur, donc comme

Le courant, il constitue une portion du flux total.

$$d\psi = \frac{x^2}{r^2} . d\phi$$

$$d\psi = \frac{x^2}{r^2} . B . d . x = \frac{x^2}{r^2} \mu_0 \frac{1}{2\pi X} \frac{x^2}{r^2} I d_x$$

$$d\psi = \mu_0 I \frac{1}{2\pi X} \frac{x^3}{r^4} d_x$$

$$\psi_{int} = \int_0^r d\psi = \frac{\mu_0 I}{2\pi X r^4} \int_0^r x^3 d_x$$

$$\psi_{int} = \frac{\mu_0 I}{8\pi} = \frac{1}{2} \times 10^{-7} I \text{ (wb/m)} \quad (II.15)$$

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

$$L_{int} = \frac{\psi_{int}}{I} = \frac{1}{2} \times 10^{-7} (H/m) \quad (II.16)$$

### b. Inductance d'un conducteur due au flux extérieur

Pour déterminer le flux extérieur entre deux contours situés respectivement à la distance  $D_1$  et  $D_2$  du centre du conducteur, considérant un élément d'épaisseur  $dx$  entre  $D_1$  et  $D_2$

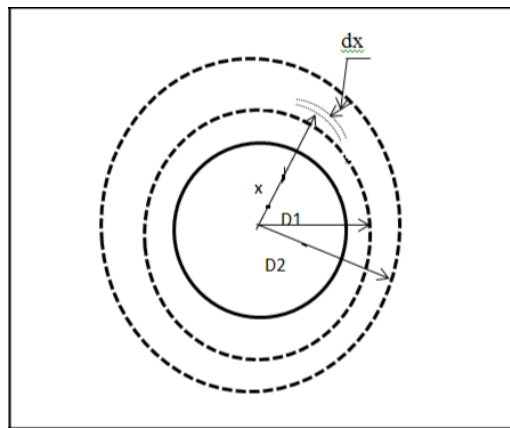
$$\int_0^{2\pi} H \times dx = I$$

$$H \times 2\pi X = I$$

$$H = \frac{I}{2\pi X} \quad (\text{At/m}) \quad x > r$$

$$B = cH \quad (\text{wb/m}^2)$$

$$B = \mu_0 \frac{1}{2\pi X}$$



**Fig. II.11.** Conducteur de section circulaire plein

Le flux à travers un cylindre d'épaisseur  $dx$  et de longueur de 1m est :

$$d\phi = B \cdot ds = B \cdot dx \cdot 1$$

$$d\phi = \mu_0 I \frac{dx}{2\pi X}$$

$$d\phi = 2 \times 10^{-7} I \frac{dx}{X}$$

Le flux crée entre deux contours et  $D_1$  et  $D_2$

$$\psi_{12} = 2 \times 10^{-7} I \frac{D_2}{D_1} \quad (\text{wb. t/m}) \quad (\text{II.17})$$

Si :  $D_1 = D_2 = D$

$$\psi_{est} = 2 \times 10^{-7} I \ln \left( \frac{D}{r} \right) \quad (\text{II.18})$$

L'inductance d'un conducteur due au flux extérieure:

$$L_{est} = 2 \times 10^{-7} \ln\left(\frac{D}{r}\right) (H/m) \quad (II.19)$$

### c. L'inductance d'un conducteur due au flux total

Le flux de liaison total est :

$$\Psi = \Psi_{int} + \Psi_{est}$$

$$\Psi = \frac{1}{2} \times 10^{-7} I + 2 \times 10^{-7} I \ln\left(\frac{D}{r}\right)$$

Sachant que:

$$2 \ln e^{\frac{1}{4}} = \frac{1}{2}$$

$$\Psi = 2 \times 10^{-7} I \left[ \ln e^{\frac{1}{4}} + \ln\left(\frac{D}{r}\right) \right] \quad (II.20)$$

$$\Psi = 2 \times 10^{-7} I \ln\left(\frac{D}{r e^{\frac{-1}{4}}}\right) \quad (II.21)$$

En posant:

$$r e^{\frac{-1}{4}} = r'$$

Le flux crée par un conducteur est:

$$\Psi = 2 \times 10^{-7} I \ln\left(\frac{D}{r'}\right) (wb. t/m) \quad (II.22)$$

L'inductance du conducteur est:

$$L = \frac{\Psi}{I} = 2 \times 10^{-7} I \ln\left(\frac{D}{r'}\right) (H/m) \quad (II.23)$$

#### II.2.2.3 Inductance d'un ensemble de n conducteurs en parallèles parcourus chacun par un courant

Les relations du flux de liaison sont nécessaires pour évaluer l'inductance de la ligne de transport constituée de quelques conducteurs en parallèle. Considérons la figure II.12 qui illustre les sections d'un groupe, soient les conducteurs  $a, b, c, \dots$  et  $n$  de rayon respectivement  $r_a, r_b, r_c, \dots, r_n$ .

portant respectivement les courants  $I_a, I_b, I_c, \dots, I_n$ . Ce groupe de conducteur forme un circuit électrique complet. [14]

Soient :

$D_{ab}$ : Distance entre les centres des deux conducteurs  $a$  et  $b$ ,

$D_{bc}$ : Distance entre les centres des deux conducteurs b et c,

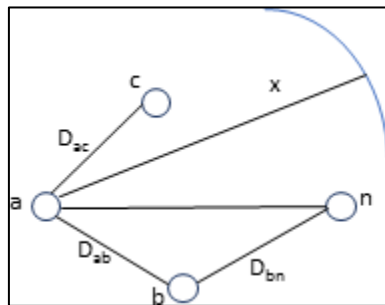
$D_{ca}$ : Distance entre les centres des deux conducteurs c et a, ... etc

Pour la plupart de lignes aériennes on admet les hypothèses suivantes :

1- Les distances entre conducteurs sont très grandes comparées à leurs rayons  $r_a, r_b, r_c, \dots, r_n$ .

La distribution du courant est uniforme sur la section ;

2- Le système n'est pas affecté par les champs extérieurs (isolé de toute source magnétique extérieure)



**Fig. II.12.** Circuit de n conducteurs parallèles

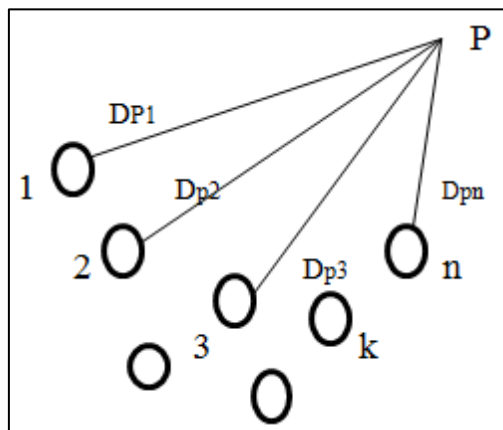
Le flux a un point p par le conducteur 1 est :

$$\psi_{est} = 2 \times 10^{-7} I \ln \left( \frac{D_2}{D_1} \right)$$

Où:

$$\psi_{12} = 2 \times 10^{-7} I_2 \ln \left( \frac{D_{p2}}{D_{12}} \right) \tag{II.24}$$

De la même manière, le flux crée par le conducteur 3 autour du conducteur 1 est :



**Fig. II.13.** Conducteur 3 autour du conducteur 1

$$\psi_{13} = 2 \times 10^{-7} I_3 \ln \left( \frac{D_{p3}}{D_{13}} \right) \quad (II.25)$$

$$\psi_{1n} = 2 \times 10^{-7} I_n \ln \left( \frac{D_{pn}}{D_{1n}} \right) \quad (II.26)$$

Le flux total crée autour du conducteur 1 à un point p distant  $D_2$  de du centre du conducteur 1 est :

$$\psi_1 = \psi_{11} + \psi_{12} + \dots + \psi_{1n}$$

$$\psi_1 = 2 \times 10^{-7} \sum_{j=1}^n I_j \ln \left( \frac{D_{pj}}{D_{1j}} \right) \quad (II.27)$$

D'une manière générale, le flux total crée autour d'un conducteur k à un point p disant de  $D_{pk}$  du centre du conducteur k est :

$$\psi_k = \psi_{k1} + \psi_{k2} + \dots + \psi_{kj} + \psi_{kk} + \dots + \psi_{kn}$$

$\psi_{kj}$  est le flux crée par le conducteur j autour de k, c'est le flux mutuel :

$$\psi_k = 2 \times 10^{-7} \sum_{j=1}^n I_j \ln \left( \frac{D_{pj}}{D_{kj}} \right) \quad (II.28)$$

$D_{jk} = D_{kj}$  est la distance entre deux conducteurs j et k.

$D_{kk} = r_{k'}$  est le rayon du conducteur k.

$$\psi_k = 2 \times 10^{-7} \left[ \sum_{j=1}^n I_j \ln \left( \frac{1}{D_{kj}} \right) + \sum_{j=1}^n I_j \ln(D_{pj}) \right] \quad (II.29)$$

$$I_n = -(I_1 + I_2 + \dots + I_{n-1}) = - \sum_{j=1}^{n-1} I_j$$

D'où:

$$\psi_k = 2 \times 10^{-7} \left[ \sum_{j=1}^n I_j \ln \left( \frac{1}{D_{kj}} \right) + \sum_{j=1}^{n-1} I_j \ln \left( \frac{D_{pj}}{D_{pn}} \right) \right]$$

Comme le point p est supposé très loin des conducteur, les valeurs :

$$\frac{D_{p1}}{D_{pn}} \cong \frac{D_{p2}}{D_{pn}} \cong \frac{D_{pn-1}}{D_{pn}} \cong 1$$

$$\psi_k = 2 \times 10^{-7} \left[ \sum_{j=1}^n I_j \ln \left( \frac{1}{D_{kj}} \right) + \right] \text{ (wb/m)} \quad (II.30)$$

### II.2.2.2.4 Rayon moyen géométrique (RMG) des conducteurs toronnés

Pour les conducteurs constitués de brins toronnés, les valeurs du RMG peuvent être

Calculées à partir de la section utile  $S$  du conducteur et du nombre de brins. [15]

**Tableau II.1.** RMG des conducteurs toronnés

Type	$g_{11} \text{RMG}$
Conducteur de section circulaire pleine	$0.4394S^{\frac{1}{2}}$
Corde circulaire à 7 brins	$0.4642S^{\frac{1}{2}}$
Corde à 3brins sans âme centrale	$0.4750S^{\frac{1}{2}}$
Corde circulaire à 19 brins	$0.4902S^{\frac{1}{2}}$
Corde circulaire à 37 brins	$0.4982S^{\frac{1}{2}}$
Corde circulaire à 61 brins	$0.5020S^{\frac{1}{2}}$
Corde circulaire à 91 brins	$0.5038S^{\frac{1}{2}}$
Corde circulaire à 127 brins	$0.5046S^{\frac{1}{2}}$

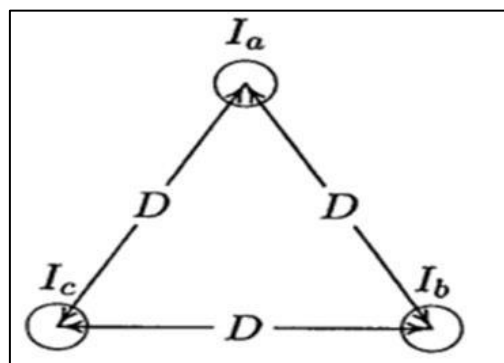
### II.2.2.2.5 Inductance des lignes triphasées

#### a. Disposition triangle équilatéral (espacements égaux)

Les trois conducteurs de la ligne sont de rayon  $r$  et espacés de la distance  $D$ .

Les courants dans les conducteurs satisfont la relation. [13]

$$I_a + I_b + I_c = 0$$



**Figure. II.14.** Ligne triphasée avec espacement équilibré

Assumant des courants triphasés équilibrés, nous avons :  $I_a + I_b + I_c = 0$

La liaison de flux total du conducteur de phase à est :

$$\psi_a = 2 \times 10^{-7} \left( I_a \ln \left( \frac{1}{r} \right) + I_b \ln \left( \frac{1}{D} \right) + I_c \ln \left( \frac{1}{D} \right) \right), \text{ et substituant pour } I_b + I_c = -I_a$$

$$\psi_a = 2 \times 10^{-7} (I_a \ln \left( \frac{1}{r} \right) - I_a \ln \left( \frac{1}{D} \right))$$

$$\psi_a = 2 \times 10^{-7} I_a \ln \left( \frac{D}{r} \right) \text{ (wb/m)} \quad (II.31)$$

L'inductance du conducteur  $L_a$  est:

$$L_a = \frac{\psi_a}{I_a} = 2 \times 10^{-7} \ln \left( \frac{D}{r} \right) \text{ (H/m)} \quad (II.32)$$

Avec :  $r' = g_{11}$

À cause de la symétrie  $\psi_a = \psi_b = \psi_c$ , et les trois inductances sont symétriques.

L'inductance linéique par phase de la ligne est :

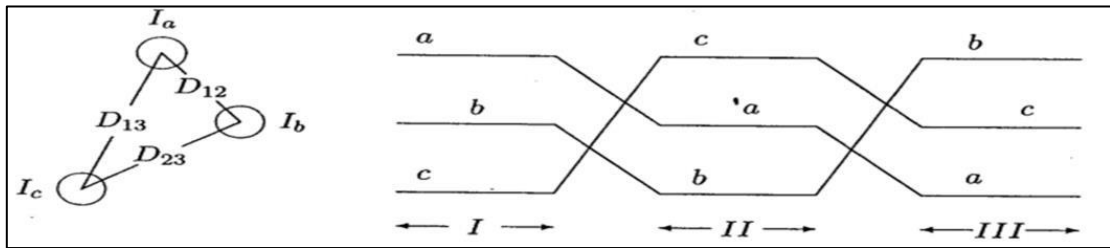
$$L = 2 \times 10^{-7} \ln \left( \frac{D}{g_{11}} \right) \text{ (H/m)}$$

$g_{11}$  = Est le rayon moyen géométrique (RMG) (**Tableau II.1**)

### b- Disposition quelconque

Si les conducteurs des phases de la ligne ne sont pas régulièrement espacés, les capacités et les inductances des phases sont différentes. Ce problème peut être résolu par la transposition de la ligne.

La transposition de la ligne est la permutation des conducteurs de phase à des intervalles réguliers le long de la ligne telle que chaque conducteur occupera sa position originale. [13]



**Figure II.15.** Ligne triphasée transposée

Les liaisons de flux sont données pour chaque conducteur par :

$$\begin{cases} \psi_a = 2 \times 10^{-7} (I_a \ln \left( \frac{1}{r} \right) + 2 \times 10^{-7} I_b \ln \left( \frac{1}{D_{12}} \right) + 2 \times 10^{-7} I_c \ln \left( \frac{1}{D_{13}} \right)) \\ \psi_b = 2 \times 10^{-7} (I_a \ln \left( \frac{1}{D_{12}} \right) + 2 \times 10^{-7} I_b \ln \left( \frac{1}{r} \right) + 2 \times 10^{-7} I_c \ln \left( \frac{1}{D_{23}} \right)) \\ \psi_c = 2 \times 10^{-7} (I_a \ln \left( \frac{1}{D_{13}} \right) + 2 \times 10^{-7} I_b \ln \left( \frac{1}{D_{23}} \right) + 2 \times 10^{-7} I_c \ln \left( \frac{1}{r} \right)) \end{cases} \quad (II.33)$$

Pour des courants triphasés équilibrés avec  $I_a$  comme référence, nous avons :

$$I_b = I_a [240^\circ] = a_2 I_a; I_c = I_a [120^\circ] = a I_a; \text{ avec } a_2 = 1 [240^\circ]; a = 1 [120^\circ], \text{ donc:}$$

$$\begin{cases} L_a = \frac{\psi_a}{I_a} = 2 \times 10^{-7} \left( \ln \left( \frac{1}{r'} \right) + a^2 \ln \left( \frac{1}{D_{12}} \right) + a \ln \left( \frac{1}{D_{13}} \right) \right) \\ L_b = \frac{\psi_b}{I_b} = 2 \times 10^{-7} \left( a \ln \left( \frac{1}{D_{12}} \right) + \ln \left( \frac{1}{r'} \right) + a^2 \ln \left( \frac{1}{D_{23}} \right) \right) \\ L_c = \frac{\psi_c}{I_c} = 2 \times 10^{-7} \left( a^2 \ln \left( \frac{1}{D_{13}} \right) + a \ln \left( \frac{1}{D_{23}} \right) + \ln \left( \frac{1}{r'} \right) \right) \end{cases} \quad (II.34)$$

Dans une ligne transposée, l'inductance est :  $L = \frac{L_a + L_b + L_c}{3}$

ET notons aussi que  $a^2 + a = -1$ ;

$$L = \frac{2 \times 10^{-7}}{3} \left( 3 \ln \left( \frac{1}{r'} \right) - \ln \left( \frac{1}{D_{12}} \right) - \ln \left( \frac{1}{D_{13}} \right) \right)$$

$$L = 2 \times 10^{-7} \left( \ln \left( \frac{1}{r'} \right) - \ln \frac{1}{\sqrt[3]{D_{12} D_{23} D_{13}}} \right)$$

$$L = 2 \times 10^{-7} \ln \left( \frac{\sqrt[3]{D_{12} D_{23} D_{13}}}{r'} \right) = 2 \times 10^{-7} \ln \frac{\sqrt[3]{D_{12} D_{23} D_{13}}}{g_{11}} \quad (H/m) \quad (II.35)$$

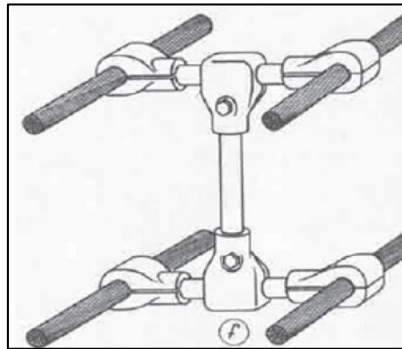
Avec  $DMG = \sqrt[3]{D_{12} D_{23} D_{13}}$  la distance moyenne géométrique

*DMG*: Distance Moyenne Géométrique.

Donc :

$$L = 2 \times 10^{-7} \ln \left( \frac{DMG}{g_{11}} \right) \quad (H/m) \quad (II.36)$$

### II.2.2.2.6 Inductance des lignes triphasées avec des conducteurs en faisceaux



**Figure II.16.** Conducteurs en faisceaux [16]

- ❖ **RMG des conducteurs en faisceaux** : Un conducteur de phase peut être constitué d'un faisceau de 2 ou plusieurs cordons de mêmes diamètres, disposés symétriquement les uns par rapport aux autres. [16]

Si la ligne est formée par des conducteurs de phase en faisceaux, l'inductance linéique est :

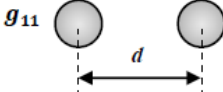
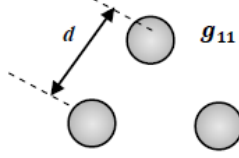
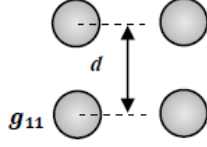
$$L = 2 \times 10^{-7} \ln \left( \frac{DMG}{g_{11}} \right) \quad (H/m) \quad (II.37)$$

Avec :

DMG:  $\sqrt[3]{D_{12}D_{23}D_{13}}$  : est la distance moyenne géométrique entre phase

$g_{11}$ : est le rayon moyen géométrique d' un conducteur en faisceaux (Tableau II. 1).

**Tableau II.2.** RMG des conducteurs toronnés

Cas	Disposition	Formule
1		$G_{11} = (g_{11} d)^{1/2}$
2		$G_{11} = g_{11}^{1/3} d^{2/3}$
3		$G_{11} = 2^{1/8} g_{11}^{1/4} d^{3/4}$

**II.2.2.2.7 Inductance linéique d'une ligne triphasée à deux ternes**

$$L = 2 \times 10^{-7} \ln \left( \frac{DMG \cdot D_n}{g_{11}} \right) \text{ (H/m)} \tag{II.38}$$

Avec:

$$D_n = \sqrt[3]{D_{Ab}D_{Ac}D_{Bc}}$$

$$D_n = \sqrt[3]{D_{Aa}D_{Bb}D_{Cc}}$$

$g_{11}$ : est le rayon moyen géométrique d'une corde.

**II.3 Modélisation du réseau électrique**

**II.3.1 Introduction**

Un réseau d'énergie électrique comprend des génératrices, des lignes de transport et distribution, et un ensemble de consommateurs, qui constituent la charge de réseau, en outre le réseau comporte également des transformateurs et des appareils de protection. L'ensemble des systèmes électrique comporte en gros trois sous-systèmes

- Production (génératrice).
- Transport, répartition et distribution (lignes).

- Utilisation (consommateur).

Vu la complexité d'un réseau d'énergie électrique, il faut simplifier leur représentation pour établir des modèles ou schéma équivalent des principaux composant à savoir, des générateurs, les différents types de transformateurs, des lignes et des charges.

### II.3.2 Modélisation de ligne longue

Une ligne peut être considérée comme une série de circuit à constantes répartie uniformément sur toute sa longueur. Ces circuits sont composés d'une infinité d'élément identique constitué, d'une inductance linéique, et d'une résistance linéique, dans le sens longitudinal, qui donnent naissance à de chutes de tension.

Une conductance linéique et une capacité linéique dans le sens transversale. Le schéma équivalent en  $\Pi$  est représenté par la figure (2.4). [17]

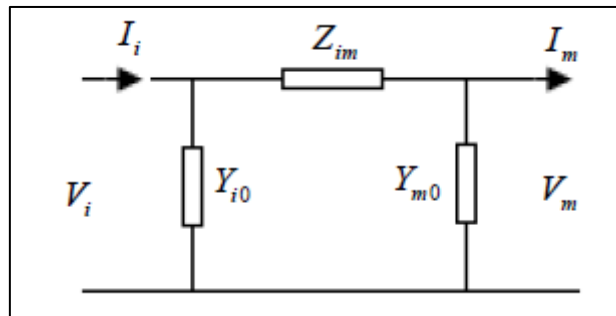


Figure II.17.. modélisation d'une ligne longue

Généralement toute ligne longue se caractérisée par les équations suivantes :

$$\begin{cases} V(x) = V_i \cosh(\gamma X) - I_i Z_c \sinh(\gamma X) \\ I(X) = V_i / Z_c \sinh(\gamma X) + I_i \cosh(\gamma X) \end{cases} \quad (II-39)$$

Avec les conditions suivantes:

$$V(x = 0) = V_i$$

$$I(x = 0) = I_i$$

Où :  $Z$  (Impédance caractéristique de la ligne ( $\Omega$ ))

$\gamma = \sqrt{Z \cdot Y}$ : Constante de propagation)

L'équation (II-1) nous donne le courant et la tension de la ligne en fonction de la longueur X Pour

on a  $X = L$  on a

$$\begin{cases} V(x = L) = V_m = V_i \cosh(\gamma L) - I_i Z_c \sinh(\gamma L) \\ I(X = L) = I_i = V_i / Z_c \sinh(\gamma L) + I_i \cosh(\gamma L) \end{cases} \quad (II.40)$$

Les équations (II-2), (II-3) nous donne :

$$V_i \cosh(\gamma L) = 1 + Z_m \cdot Y_{i0} = 1 + Z_{im} \cdot Y_{m0} \quad (II.41)$$

$$\frac{\sinh(\gamma L)}{Z_c} = Y_{m0} + Y_{i0} + Z_{im} \cdot Y_{m0} \cdot Y_{i0} \quad (II.42)$$

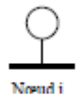

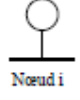

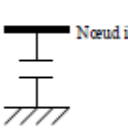
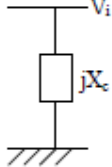
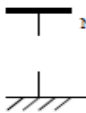
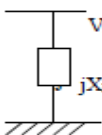
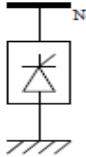
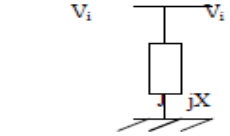

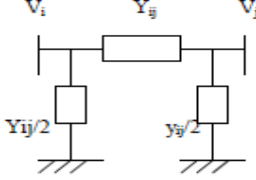
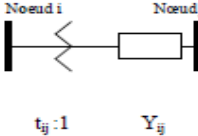
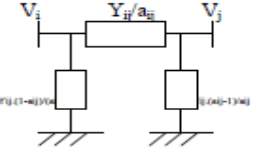


D'où en tire:

$$Z_{im} = Z_c \cdot \sinh(\gamma L)$$

$$Y_{i0} = Y_{m0} = \tanh\left(\frac{\gamma L}{2}\right) / Z_c \tag{II.43}$$

Finalement en a les expressions de l'impédance série  $Z_{im}$  et de l'admittance transversale ( $Y_{i0} = Y_{m0}$ ) de la ligne de schéma équivalent en  $\Pi$  représenté sur la figure (2.4).

**Tableau II.3** Tableau Racap pour la Modélisation des paramètres du réseau.

Composants	Symbole	Représentation	Observation
Générateurs		$P_g, Q_g$ 	Puissances active et réactives générées.
Compensateurs Synchrones		$P_g = 0, Q_g$ 	Puissance réactive générée.
Capacités shunts			Considérées comme impédance capacitive constante au nœud i, où comme puissance réactive injectée.
Self shunt ( reactance)			Considérée comme impédance inductive constante ou comme puissance réactive injectée.
Compensateurs statiques (SVC).		$Q_g$ 	La puissance réactive des compensateurs statiques (SVC), peut être calculée, a tension fixe au nœud i.
Lignes du réseau			
Transformateur avec régleur en charge (taps)			
La charge			Les puissances active et réactive, sont fixes.
	$P_c, Q_c$	$P_c, Q_c$	

## II.4 Un exemple d'étude de ligne à double circuit:

La ligne de tension nominale 400 KV est a double terne et est prévue pour faire transiter 600 MW par terne sur une distance de transport égale a 320 Km. Le régime de fonctionnement de ligne en charge minimale est supposé être de 40 % de la puissance maximale soit 240MW par terne. Les caractéristiques des pylônes utilisées dans le tracé de la ligne sont les suivantes :

- La hauteur de suspension des conducteurs des phases 1 et 4 est de 41,8m.
- La hauteur de suspension des conducteurs des phases 2 et 5 est de 31,8m.
- La hauteur de suspension des conducteurs des phases 3 et 6 est de 22,6m.
- Les écartements horizontaux entre le centre du pylône et les phases considérées sont mentionnés sur la figure (II.44 et II.45).
- Chaque phase est constitué en faisceau de deux conducteurs de section  $500 \text{ mm}^2$  chacun maintenus par des entretoises de 40cm ( $2 \times 500 \text{ mm}^2$ ).
- Le diamètre de chaque conducteur constituant le faisceau est égal à 31,5mm.
- La résistance électrique à  $20^{\circ}\text{C}$  :  $R_{20^{\circ}\text{C}} = 0,059 \Omega / \text{km}$ .

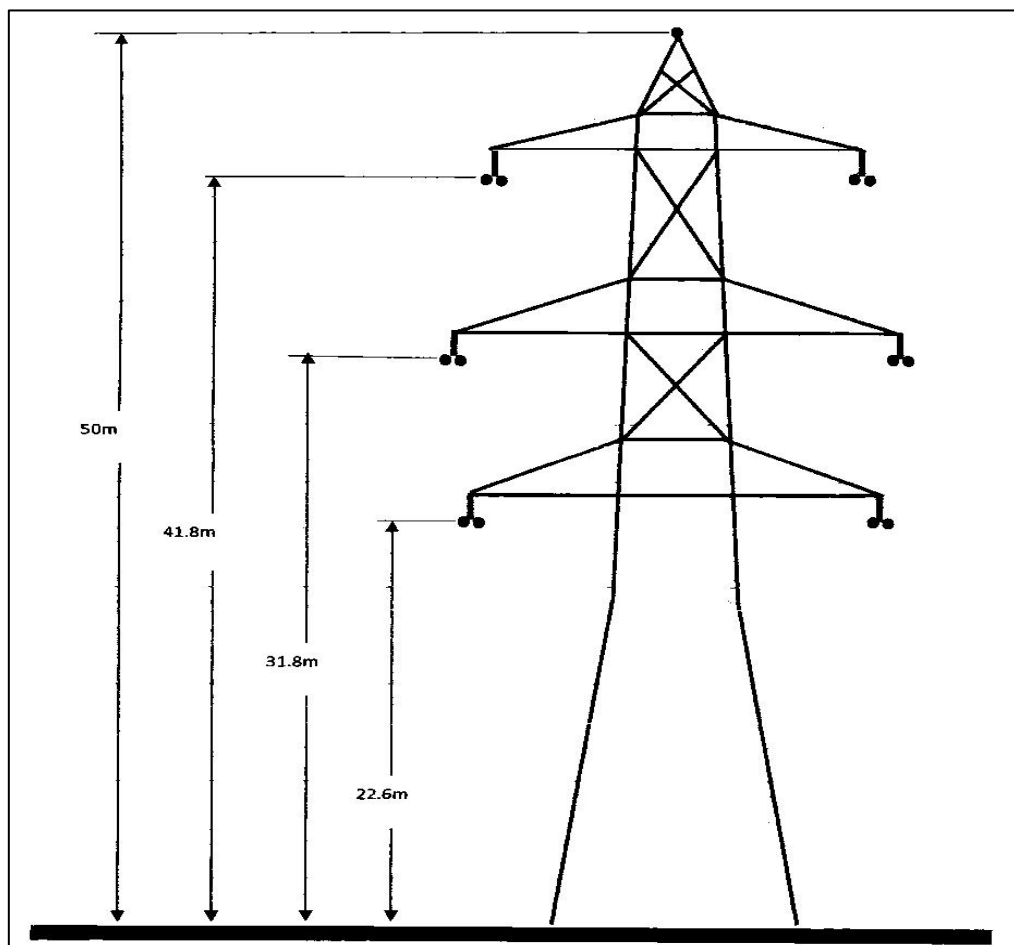
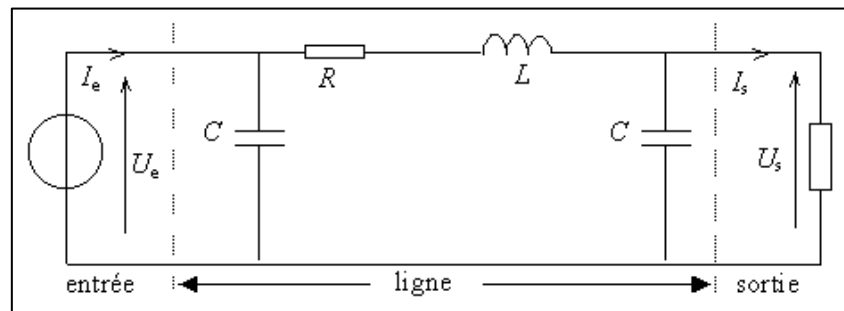


Figure II.18. Pylône 400 kV à deux ternes utilisé.

### II.4.1 Caractéristiques électriques de ligne:



**Figure II.19.** Schéma électrique d'une ligne.

Une ligne électrique parfaite peut être considérée comme un fil d'impédance nulle. Dans la pratique plusieurs phénomènes physiques entrent en jeu : pertes d'énergie par effet Joule, réponse fréquentielle, courants de fuite. Une étude à l'aide d'un modèle théorique simplifié permet de comprendre l'effet de divers paramètres sur le comportement de la ligne.

### II.4.2 Résistance de la ligne :

La résistance d'un conducteur filiforme s'écrit :

$$R_{\theta} = R_{20} (1 + 0.004 (\theta_c - 20^{\circ}C)) \left(\frac{\Omega}{km}\right) \quad (\text{II.44})$$

$$R_{20} = \rho \cdot \frac{l}{S} = \frac{\rho}{k \cdot (\pi \frac{d^2}{4} n)} \left(\frac{\Omega}{km}\right) \quad (\text{II.45})$$

$\rho$ : Résistivité des matériaux utilisés pour les lignes ( $\Omega \cdot m$ ).

$n$  : nombre de brins dans le conducteur.

$d$  : diamètre de chaque brin (mm).

$k$  : facteur donné par le constructeur.

La résistance électrique par phase est :

$$R_{20} = \frac{0,059}{2} * 320 = 9,44 (\Omega/km).$$

Afin de limiter les pertes par effet Joule, on souhaite que la résistance soit la plus faible possible. La longueur de la ligne étant imposée, on ne peut jouer que sur la résistivité  $\rho$  du matériau du conducteur et sur sa section. Le cuivre, dont la résistivité vaut  $1,72 \times 10^{-8} \Omega \cdot m$ , n'est pas utilisé car trop coûteux, mais aussi 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  $3 \times 10^{-8} \Omega \cdot m$ . [18]

### II.4.3 Réactance de la ligne :

Les paramètres réactifs de la ligne de transport d'énergie électrique transposée sont calculés par la relation suivante. [19]

$$X_0 = 0.1445 \cdot \log \frac{D_{mg}}{r_{eq}} + \frac{0.01157}{n} \quad (\Omega/\text{km}). \quad (\text{II.46})$$

$$r_{eq} = \sqrt{a \cdot r_c} : \text{Pour un faisceau de deux conducteurs}$$

$D_{mg}$  : la distance moyenne géométrique (m).

$n$  : le nombre de conducteur dans le faisceau.

$a$  : le pas du faisceau (cm).

$r_c$  : le rayon du conducteur (cm).

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

### II.4.4 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. [20]

$$b_0 = \frac{7.58}{\log \frac{D_{mg}}{r_{eq}}} \cdot 10^{-6} \quad \left( \frac{\Omega^{-1}}{\text{km}} \right) \quad (\text{II.47})$$

### II.4.5 Impédance caractéristique :

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

$$Z_c = \sqrt{\frac{r_0 + j \cdot x_0}{g_0 + j \cdot b_0}} \quad (\Omega) \quad (\text{II.48})$$

La résistance  $r_0$  et la conductance  $g_0$  peuvent être négligées dans les lignes longues par ce que  $r_0 \ll x_0$  et  $g_0 \ll b_0$  donc :

$$Z_c \cong \sqrt{\frac{x_0}{b_0}} \quad (\Omega) \quad (\text{II.49})$$

### II.4.6 Puissance caractéristique de la ligne :

C'est la puissance naturelle de la ligne triphasée qui est donnée par l'expression :

$$P_c = \frac{U_n^2}{Z_c} \quad (MW) \quad (\Omega) \quad (\text{II.50})$$

### II.4.7 Calcul du champ électrique superficiel des conducteurs :

En haute tension le diamètre des conducteurs doit être suffisamment grand pour minimiser les pertes d'énergies dues à l'effet de couronne. Un faisceau de conducteurs est caractérisé par les grandeurs suivantes :

$n$ : nombre de conducteurs élémentaires.

$R$ : rayon du faisceau.

$a$ : distance entre deux conducteurs consécutifs est définie par :

$$a = 2 \cdot R \cdot \sin \frac{\pi}{n} \text{ (cm)}$$

$R$  donné par la relation (II.51) :

$$R = \frac{a}{2 \cdot \sin \frac{\pi}{n}} \text{ (cm)} \quad (\text{II.51})$$

$r_{eq}$  : 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, est définie par :

$$r_{eq} = \sqrt[n]{R^{n-1}} \cdot n \cdot r_c \text{ (cm)} \quad (\text{II.52})$$

Pour le calcul du champ crée 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 de potentiel.

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

$$E_{moy} = \frac{1}{n} \cdot \frac{Q}{2\pi\epsilon_0 r_c} \left( \frac{kv}{cm} \right) \quad (\text{II.53})$$

Où:

$$Q = C \cdot U_n \text{ (MVAR)} \quad (\text{II.54})$$

D'après les équations (II.54) et (II.47), on introduit la notion du champ moyen :

$$E_{moy} = \frac{0.354 \cdot U_n}{n \cdot r_c \cdot \log \frac{D_{mg}}{r_{eq}}} \left( \frac{kv}{cm} \right) \quad (\text{II.55})$$

Avec :

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

$U_n$  : la tension nominale de la ligne (kV).

$\epsilon_0$ : 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 du blindage mutuel, le gradient réel est plus important vers l'extérieur et plus faible vers l'intérieur du faisceau.

La relation du champ maximal des conducteurs est donnée par :

$$E_{\text{max}} = E_{\text{moy}} \cdot \left(1 + \frac{(n-1) \cdot r_c}{R}\right) \left(\frac{\text{kv}}{\text{cm}}\right) \quad (\text{II.56})$$

L'expression (II.55) devient:

$$E_{\text{max}} = E_{\text{moy}} \cdot k \left(\frac{\text{kv}}{\text{cm}}\right) \quad (\text{II.57})$$

Avec :

$$k = 1 + \beta \cdot \frac{r_c}{a} \quad ; \quad \beta = 2 \cdot (n - 1) \sin \frac{\pi}{n}$$

k : le degré d'irrégularité du champ électrique.

### II.5 Caractéristiques électriques de la ligne :

Dans le but de faire une étude des régimes de fonctionnement et du comportement électrique de la ligne suivant les puissances actives transitées en régime de charge maximale et minimale, les caractéristiques électriques de la ligne El-Affroun-Hassi Amer sont déterminées par les équations précédentes :

$$\begin{aligned} D_{mg} &= 12.14 \text{ m} & x_0 &= 0.324 \left(\frac{\Omega}{\text{km}}\right) & b_0 &= 3.47 \cdot 10^{-6} \left(\frac{\Omega}{\text{km}}\right) \\ Z_c &= 305.6 \text{ } \Omega & P_c &= 523.6 \text{ (MW)} \end{aligned}$$

### II.6 Calcul du pas du faisceau (cas de deux conducteurs) :

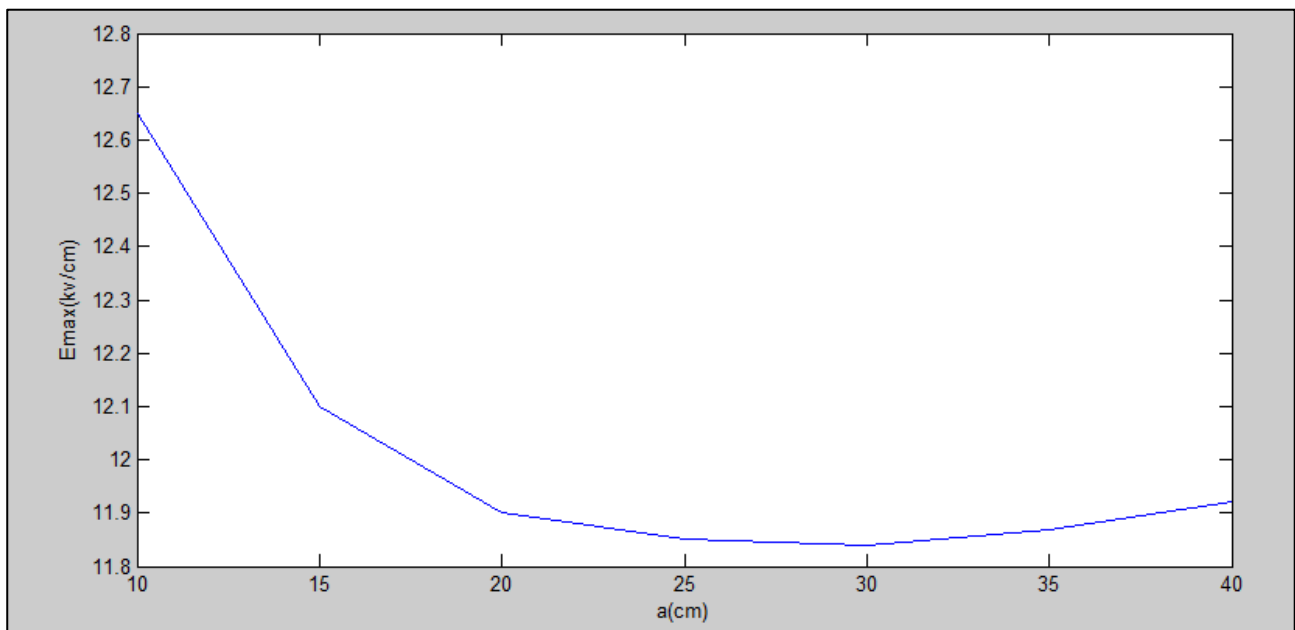
On va calculer le pas du faisceau de tel sorte que l'intensité maximale du champ ( $E_{\text{max}}$ ), à la périphérie de chaque conducteur, soit minimale.

Les résultats de calcul du champ maximal par variation du pas de faisceau 'a', sont présentés dans le tableau suivant :

**Tableau II.4** Calcul du pas optimal du faisceau (cas de deux conducteurs)

a(cm)	R(cm)	$r_{eq}(cm)$	$E_{moy}$ (kv/cm)	k	$E_{max}$ (kv/cm)
10	5	5.61	9.62	1.315	12.65
15	7.5	6.87	10	1.210	12.10
20	10	7.94	10.28	1.158	11.90
25	12.5	8.87	10.52	1.126	11.85

30	15	9.72	10.72	1.105	11.84
35	17.5	10.5	10.89	1.090	11.87
40	20	11.22	11.05	1.079	11.92



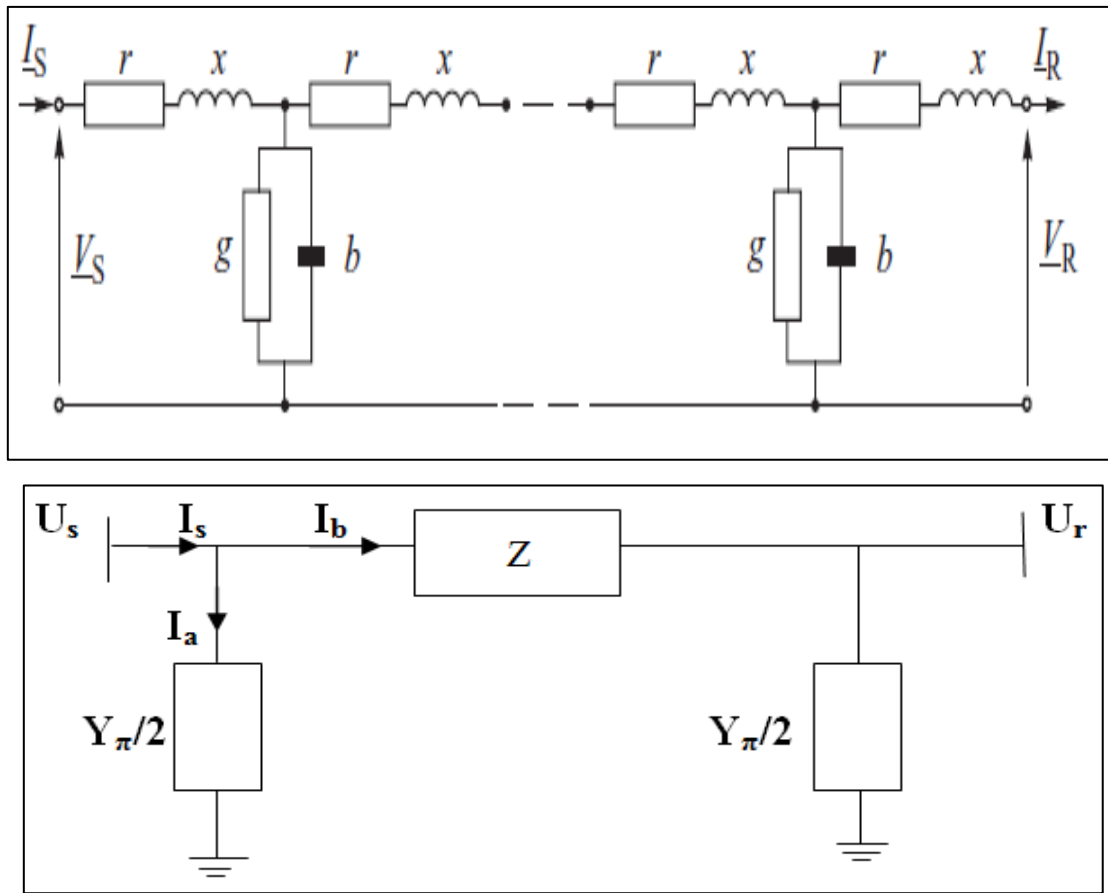
**Figure II.20.** Le champ électrique  $E_{max}$  en fonction 'a'

On remarque que la valeur optimale du pas du faisceau qui donne un champ faible est de **30cm** ce qui implique que le rayon équivalent du faisceau  $r_{eq}$  sera égal **9.72cm**.

### II.6.1 Commentaire et analyse des résultats obtenus :

D'après les résultats obtenus dans le tableau et la figure ci dessus nous remarquons que l'intensité du champ dépend de la distance entre les conducteurs, mais d'autre côté du degré d'irrégularité du champ électrique qui diminue avec l'augmentation de la distance. En tenant compte de ses deux paramètres, on remarque que l'intensité du champ maximale passe par un minimum, ce qui explique la distance optimale 'a' à partir de la quelle le champ maximal croit avec l'augmentation de pas 'a'. On peut dire que ce minimum correspond à la distance optimale entre les conducteurs du point de vue minimisation de pertes par effet couronne.

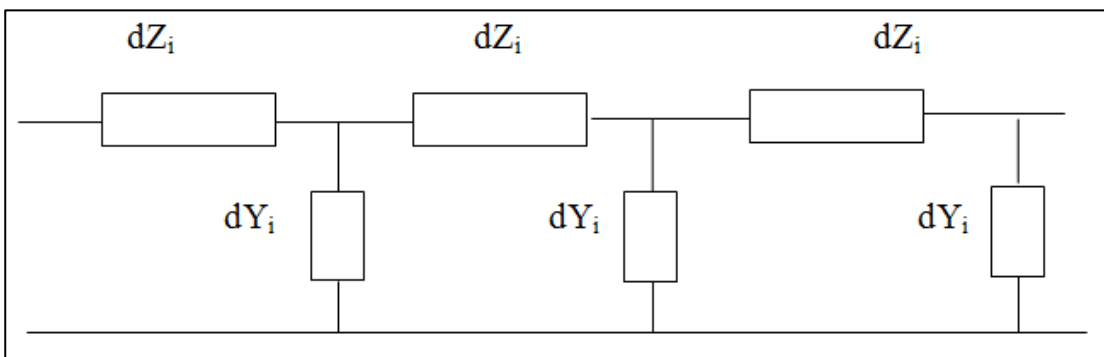
**II.7 Schéma équivalent de longue ligne :**



**Figure.II.21** Schéma équivalent de la ligne (en  $\pi$ )

**II.7.1 Calcul de la l'impédance et de l'admittance des longues lignes :**

Dans les longues lignes, la notion d'approximation, du fait que le courant n'est pas constant tout au long de la ligne, les circuits dans ce cas sont considérés comme des circuits à constantes uniformément réparties, ainsi chaque élément de la ligne doit être affecté d'une impédance  $dZ_i$  et d'une admittance  $dY_i$ .



**Figure.II.22.** Schéma équivalent d'un réseau électrique

Pour de nombreux problèmes seul les tensions et les courants aux deux extrémités de la ligne présentent de l'intérêt. Lorsqu'une ligne symétrique de longueur quelconque (L) fonctionne en régime sinusoïdal, il est toujours possible de la remplacer par un schéma en ( $\pi$ ) équivalent. [21]

$$\dot{Y}_s = \dot{Y}_r + \dot{I}_b, \dot{Z}_\pi = \dot{Y}_r + \left( \frac{\dot{Y}_\pi}{2} \dot{Y}_r + \dot{I}_r \cdot \dot{Z}_\pi \right)$$

$$\dot{Y}_s = \dot{Y}_r \cdot \left( 1 + \frac{\dot{Y}_\pi \cdot \dot{Z}_\pi}{2} \right) + \dot{I}_r \cdot \dot{Z}_\pi \quad (\text{II.58})$$

$$\dot{I}_s = \dot{I}_a + \dot{I}_b = \frac{\dot{Y}_\pi}{2} \dot{Y}_s + \frac{\dot{Y}_\pi}{2} \dot{Y}_s + \dot{I}_s \quad (\text{II.59})$$

On remplace l'expression de  $V_s$  (II.58) dans l'équation (II.59) on trouve :

$$\dot{I}_s = \frac{\dot{Y}_\pi}{2} \cdot \dot{Y}_r \cdot \left( 1 + \frac{\dot{Y}_\pi \cdot \dot{Z}_\pi}{2} \right) + \dot{I}_r \cdot \dot{Z}_\pi + \frac{\dot{Y}_\pi}{2} \cdot \dot{Y}_s + \dot{I}_r$$

$$\dot{I}_s = \left[ \frac{\dot{Y}_\pi}{2} \cdot \left( 1 + \frac{\dot{Y}_\pi \cdot \dot{Z}_\pi}{2} \right) + \frac{\dot{Y}_\pi}{2} \right] \cdot \dot{Y}_r + \left( \frac{\dot{Y}_\pi}{2} \cdot \dot{Z}_\pi + 1 \right) \dot{I}_r$$

$$\dot{I}_s = \dot{Y}_\pi \cdot \left( 1 + \frac{\dot{Y}_\pi \cdot \dot{Z}_\pi}{2} \right) \cdot \dot{Y}_r + \left( \frac{\dot{Y}_\pi}{2} \cdot \dot{Z}_\pi + 1 \right) \dot{I}_r \quad (\text{II.60})$$

On obtient donc :

$$\begin{cases} \dot{Y}_s = \dot{Y}_r \cdot \left( 1 + \frac{\dot{Y}_\pi \cdot \dot{Z}_\pi}{2} \right) + \dot{I}_r \cdot \dot{Z}_\pi \\ \dot{I}_s = \dot{Y}_\pi \cdot \left( 1 + \frac{\dot{Y}_\pi \cdot \dot{Z}_\pi}{2} \right) \cdot \dot{Y}_r + \left( \frac{\dot{Y}_\pi}{2} \cdot \dot{Z}_\pi + 1 \right) \dot{I}_r \end{cases} \quad (\text{II.61})$$

On a aussi equation:

$$\dot{Y}_s = \dot{Y}_r \cdot \cosh(\gamma \cdot l) + \dot{I}_r \cdot \dot{Z}_c \cdot \sinh(\gamma \cdot l)$$

$$\dot{I}_s = \dot{Y}_r \cdot \left( \frac{\dot{Y}_r}{\dot{Z}_c} \right) \sinh(\gamma \cdot l) + \dot{I}_r \cdot \cosh(\gamma \cdot l)$$

$$\dot{Z}_c = \sqrt{\frac{\dot{Z}}{\dot{Y}}} : \text{Impédance caractéristique de la ligne } (\Omega)$$

$$\gamma = \sqrt{\dot{Z} \cdot \dot{Y}} : \text{Coefficient de propagation de la ligne}$$

Par identification on obtient (II.62) :

$$\dot{A} = \dot{D} = \cosh(\gamma \cdot l) = 1 + \frac{\dot{Y}_\pi}{2} \cdot \dot{Z}_\pi$$

$$\dot{B} = \dot{Z}_c \cdot \sinh(\gamma \cdot l) = \dot{Z}_\pi (\Omega)$$

$$\dot{C} = \left( \frac{1}{\dot{Z}_c} \right) \sinh(\gamma \cdot l) = \dot{Y}_\pi \cdot \left( 1 + \frac{\dot{Y}_\pi \cdot \dot{Z}_\pi}{4} \right) (\Omega^{-1}) \quad (\text{II.62})$$

De l'expression (II.62) on obtient :

$$\cosh(\gamma \cdot l) = 1 + \frac{\dot{Y}_\pi}{2} \cdot \dot{Z}_\pi$$

Ou encore:

$$\frac{\dot{Y}_\pi}{2} = \frac{\cosh(\gamma \cdot l) - 1}{\dot{Z}_\pi} = \frac{\cosh(\gamma \cdot l) - 1}{\dot{Z}_\pi \cdot \sinh(\gamma \cdot l)} \quad (\text{II.63})$$

Finalement on aboutit a:

$$\dot{Z}_\pi = Z_C \cdot \sinh(\gamma \cdot l)$$

$$\frac{\dot{Y}_\pi}{2} = \frac{\cosh(\gamma \cdot l) - 1}{\dot{Z}_\pi} = \frac{\cosh(\gamma \cdot l) - 1}{\dot{Z}_\pi \cdot \sinh(\gamma \cdot l)} \quad (\text{II.64})$$

### II.7.2 Les lignes sans pertes (lignes idéales) :

Pour  $r = g \approx 0$  on a :

$$\dot{Z}_c = \sqrt{\frac{z}{y}} = \sqrt{\frac{l}{c}} \quad \dot{\gamma} = j\omega \cdot \sqrt{LC} = \frac{j\omega}{\tau}$$

Avec  $\tau = \frac{1}{\sqrt{LC}}$

$\omega$  : pulsation du courant et de la tension d'alimentation a fréquence f.

$$\omega = 2 \cdot \pi \cdot f$$

Il s'ensuit que :  $\dot{\gamma} = \frac{j\omega}{\tau} = \frac{j2\pi}{\dot{\gamma}} \quad (\text{II.65})$

Où  $\psi$  est la longueur d'onde de la ligne à la fréquence du réseau ( $f = 50\text{Hz}$ ).  $\psi = \gamma \cdot L$

$$\psi = (\alpha_0 + j\beta_0) \cdot l$$

$$\alpha_0 = 0.06 \left( \frac{\text{deg}}{\text{km}} \right)$$

Donc :

$$\cosh(\dot{\gamma} \cdot l) = \cosh\left(\frac{j\omega}{\tau} \cdot l\right) = \cos\left(\frac{\omega L}{\tau}\right) \quad (\text{II.66})$$

$$\sinh(\dot{\gamma} \cdot l) = \sinh\left(\frac{j\omega}{\tau} \cdot l\right) = j \cdot \sin\left(\frac{\omega L}{\tau}\right) \quad (\text{II.67})$$

Donc l'équation (II.61) devient:

$$\begin{cases} \dot{Y}_s = \dot{Y}_r \cdot \cos\left(\frac{\omega L}{\tau}\right) + \dot{I}_r \cdot j \cdot \sqrt{\frac{l}{c}} \cdot \sin\left(\frac{\omega L}{\tau}\right) \\ \dot{I}_s = j \cdot \dot{Y}_r \cdot \left(\frac{\sin\left(\frac{\omega L}{\tau}\right)}{\sqrt{\frac{l}{c}}}\right) + \dot{I}_r \cdot \cos\left(\frac{\omega L}{\tau}\right) \end{cases} \quad (\text{II.68})$$

En remplaçant  $\omega/\tau$  par  $2\pi/\psi$  on obtient :

$$\begin{cases} \dot{Y}_s = \dot{Y}_r \cdot \cos\left(\frac{2\pi L}{\psi}\right) + \dot{I}_r \cdot j \cdot \sqrt{\frac{l}{c}} \cdot \sin\left(\frac{\omega L}{\psi}\right) \\ \dot{I}_s = j \cdot \dot{Y}_r \cdot \left(\frac{\sin\left(\frac{2\pi L}{\psi}\right)}{\sqrt{\frac{l}{c}}}\right) + \dot{I}_r \cdot \cos\left(\frac{2\pi}{\psi} \cdot l\right) \end{cases} \quad (\text{II.69})$$

-équations de télégraphistes.[22]

$$\begin{pmatrix} \dot{V}_s \\ \dot{I}_s \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \cosh(\gamma \cdot l) & Z_C \sinh(\gamma \cdot l) \\ Y_C \sinh(\gamma \cdot l) & \cosh(\gamma \cdot l) \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \dot{V}_r \\ \dot{I}_r \end{pmatrix}$$

$$\begin{bmatrix} V_s \\ I_s \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \hat{A} & \hat{B} \\ \hat{C} & \hat{D} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} V_r \\ I_r \end{bmatrix} \quad (\text{II.70})$$

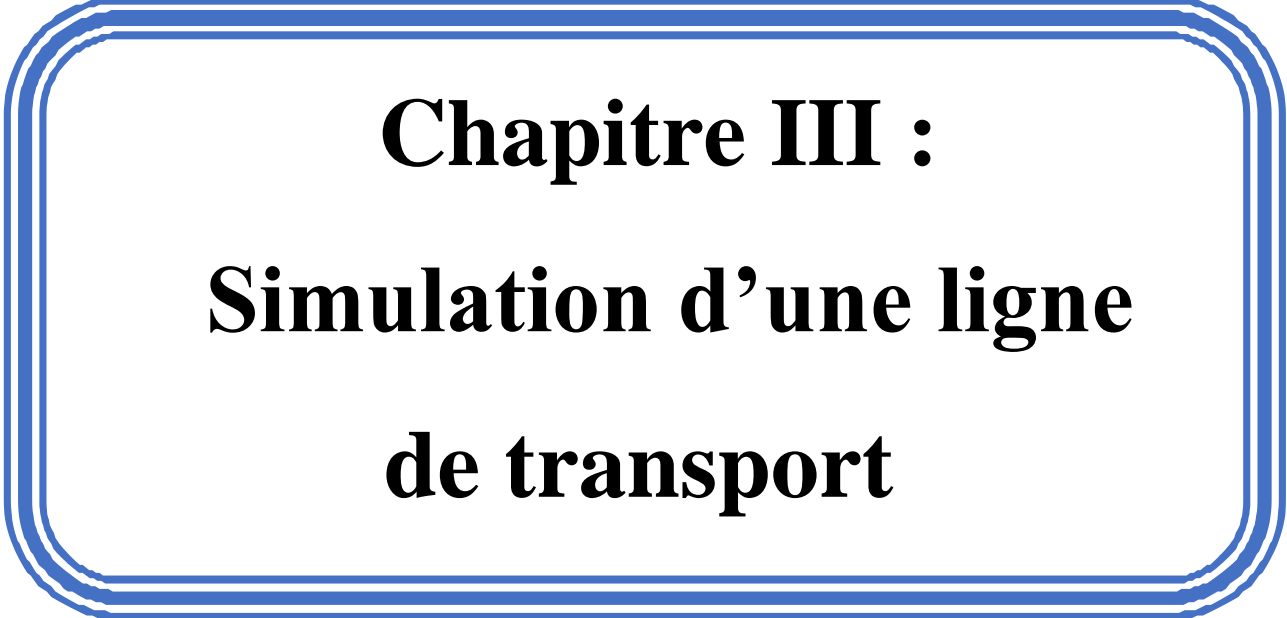
Avec :  $\hat{A} = \cosh(\gamma.l) = \hat{D}$

$$\hat{B} = Z_c \sinh(\gamma.l) (\Omega) \quad \hat{C} = Y_c \sinh(\gamma.l) (\Omega^{-1})$$

## II.8 Conclusion

Dans ce chapitre nous avons présenté le calcul des paramètres d' une ligne électrique aérienne (La résistance **R**, l'inductance **L**, la capacité **C** et la conductance **G**).

Ces paramètres conjointement avec le courant de charge et le facteur de puissance déterminent les performances électriques de la ligne. Le calcul de ces paramètres s'avère indispensable pour bien dimensionner et concevoir la ligne électrique, à cause du besoin de ces quatre paramètres dans la majorité des calculs de la ligne électrique.



**Chapitre III :**  
**Simulation d'une ligne**  
**de transport**

# 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:

$s=547.11 \text{ mm}^2$ ;  $d_c=26.4 \text{ mm}$ ;  $r_{20^\circ\text{C}}=0.103 \text{ } \Omega/\text{Km}$ ;  $x_0=0.405 \text{ } \Omega/\text{Km}$ ;

$b_0=2.57 \cdot 10^{-6} \text{ Siemens/Km}$ ;  $L=200 \text{ Km}$ .

### III.3 Interface graphique

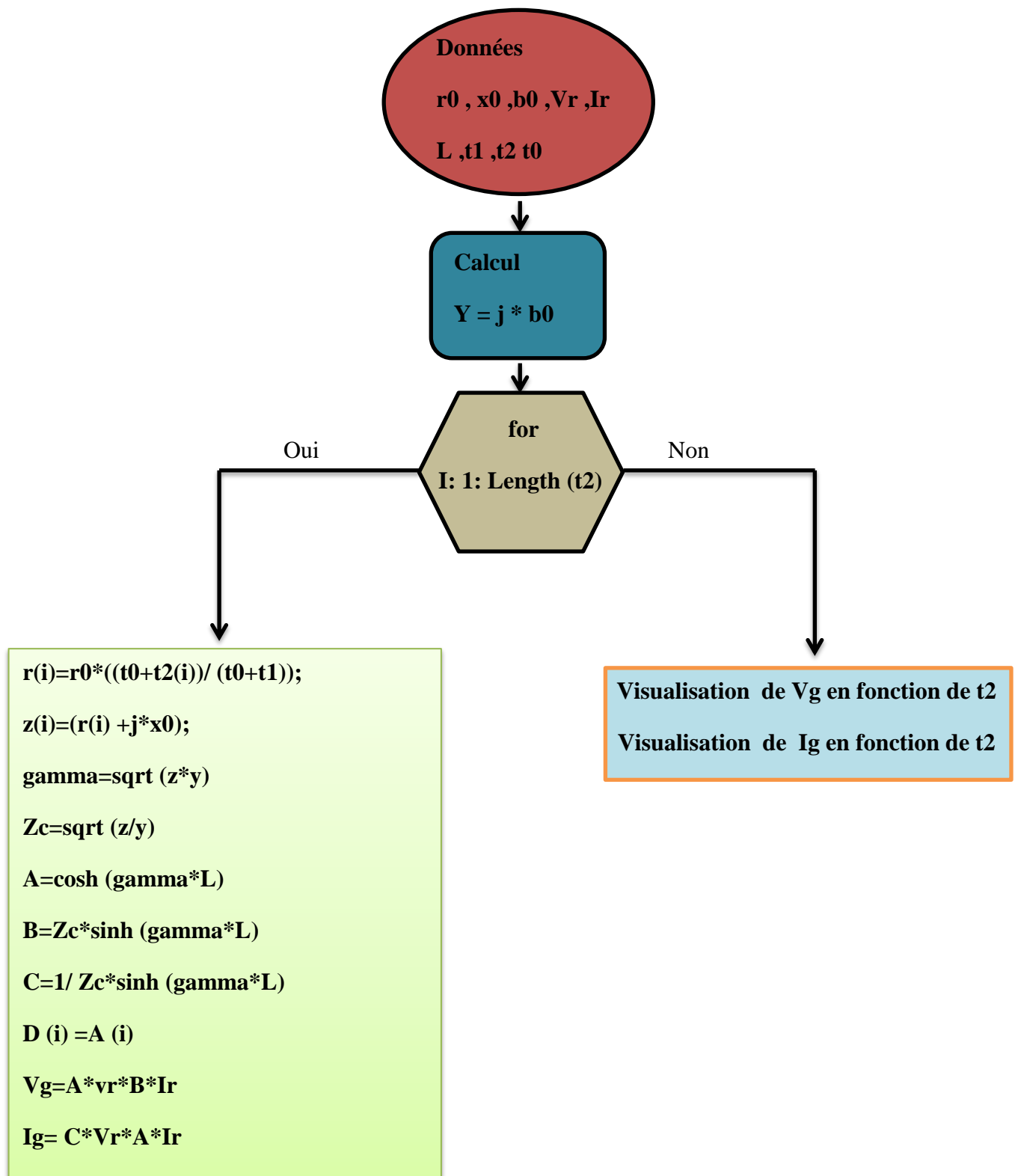
Une interface graphique qu'on développée pour le calcul et le tracé des diagrammes.

L'interface permet d'évaluer :

- La tension d'entrée et le courant d'entrée en fonction de la température
- La tension d'entrée et Le courant d'entrée en fonction de la distance.

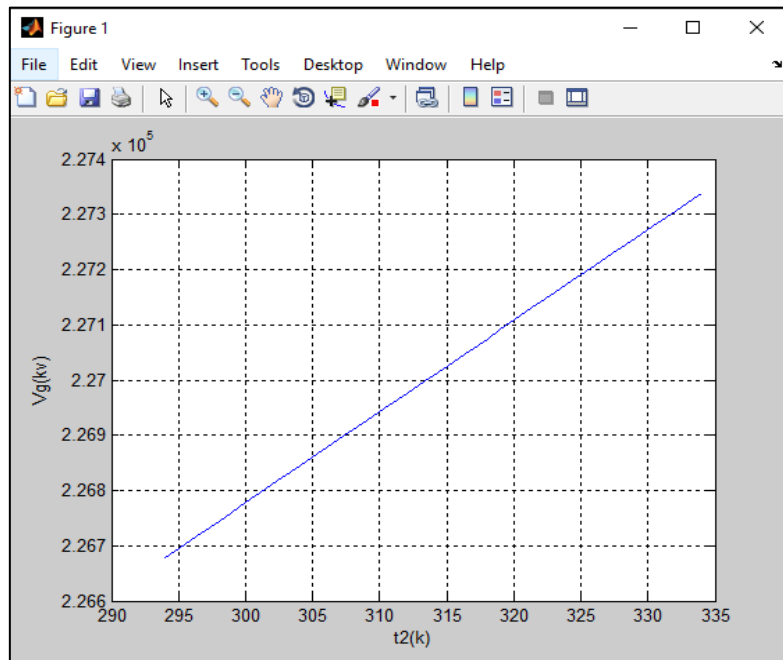
## III.4 Variation de la température

## III.4.1 Organigramme de calcul

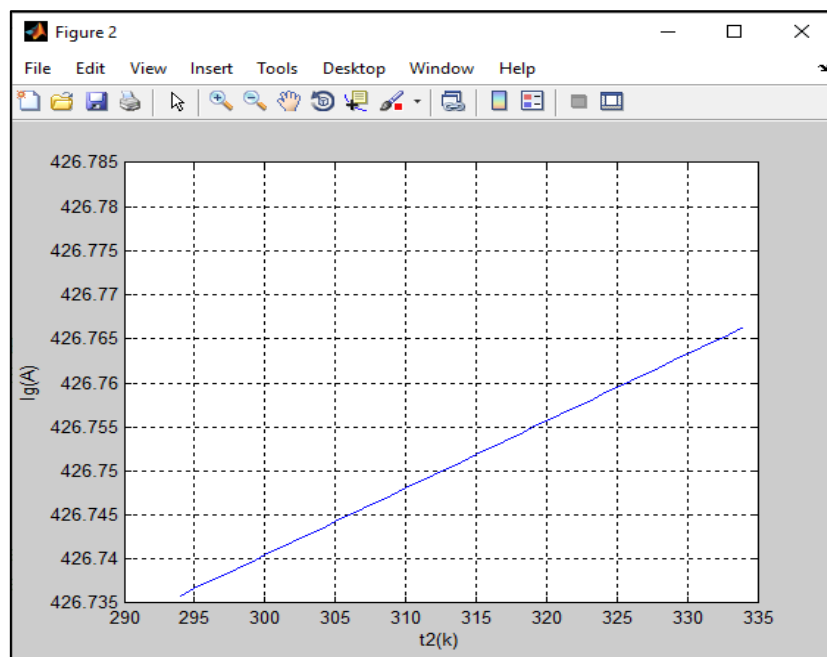


**Figure III.1.** Organigramme de calcul de tension et courant d'entrée en fonction de la température

### III.4 .2 Résultats



**Fig.III.2** Tension d'entrée en fonction de la température



**Fig.III.3** Courant d'entrée en fonction de la température

### III.4 .3 Interprétation des résultats

#### III.4 .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.4 .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.5 Variation de la distance

#### III.5.1 Organigramme de calcul

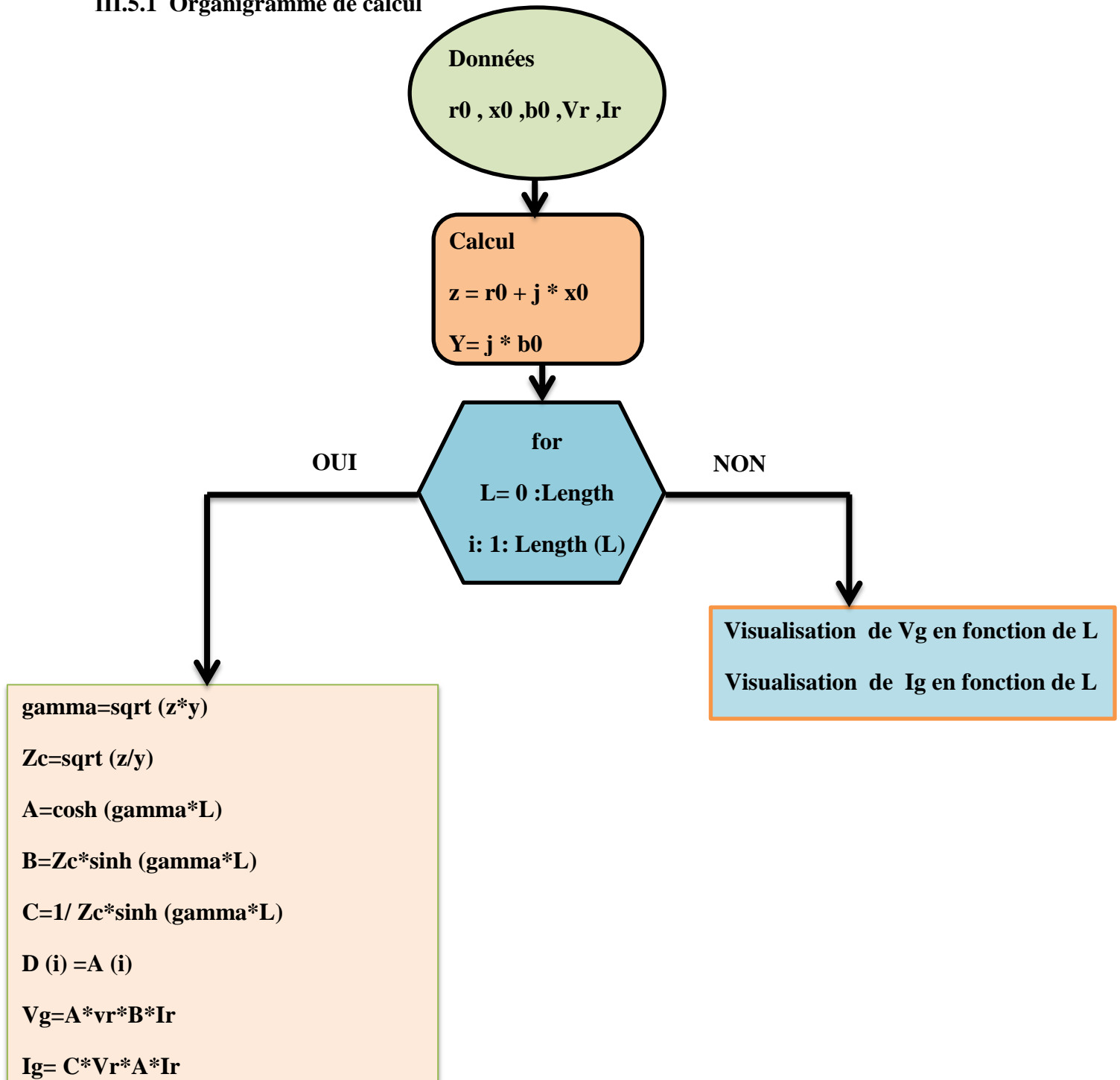


Figure III.4. Organigramme de calcul de tension et courant d'entrée en fonction de la distance

## III.5.2 Résultats

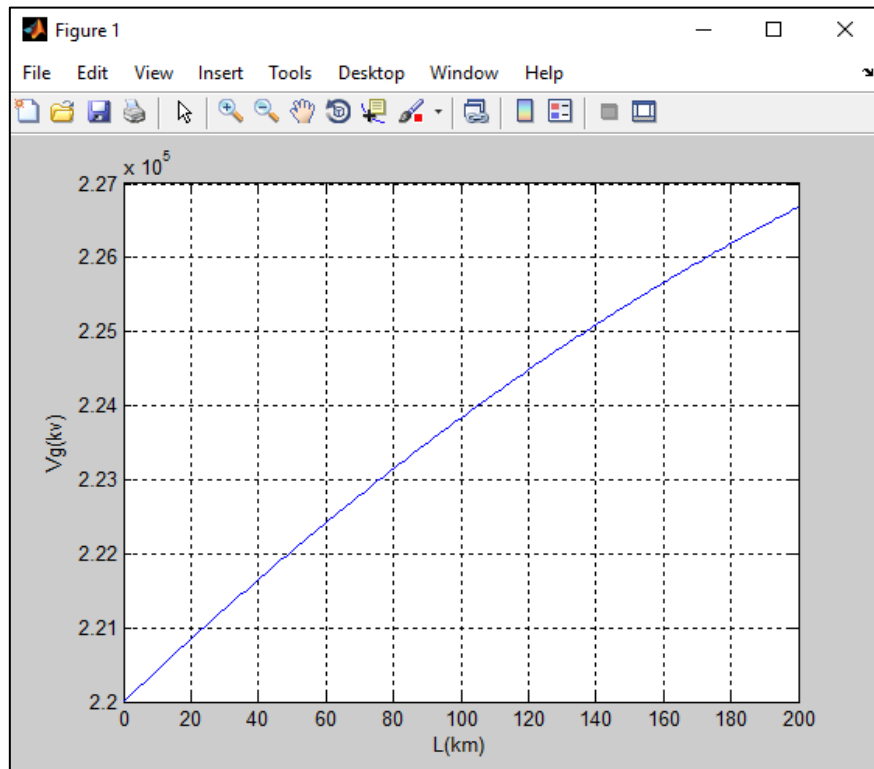


Fig.III.5 Tension d'entrée de la ligne en fonction de la distance

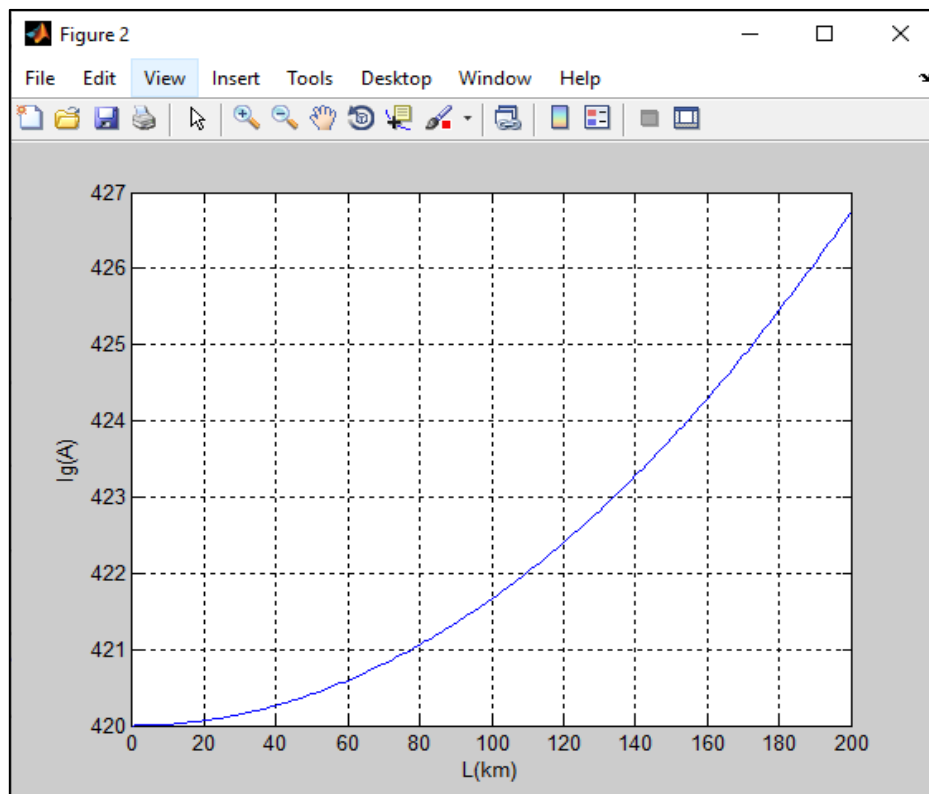
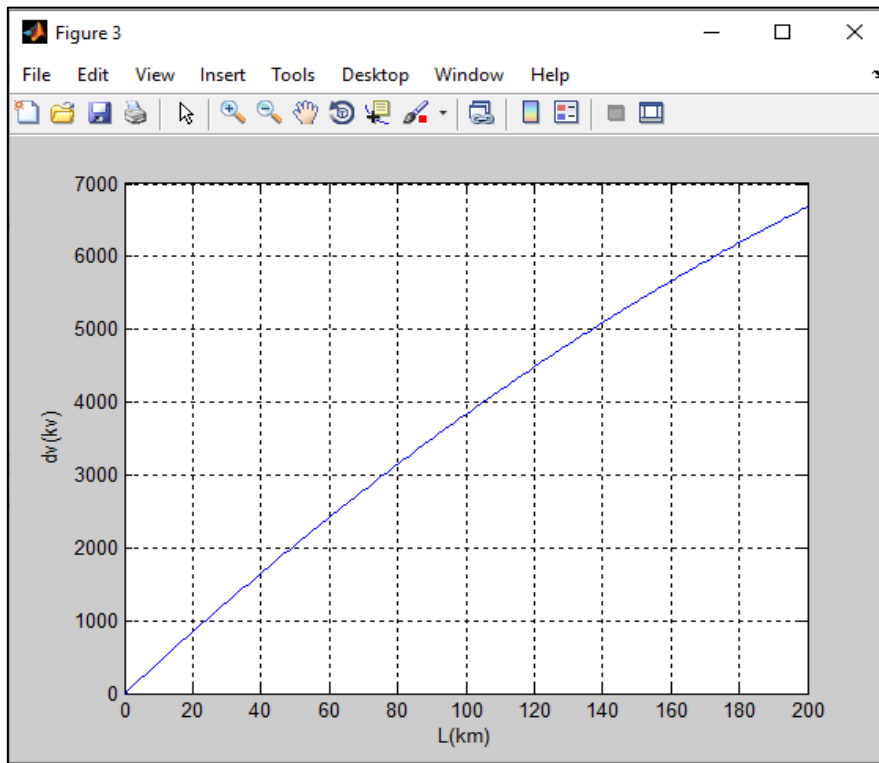
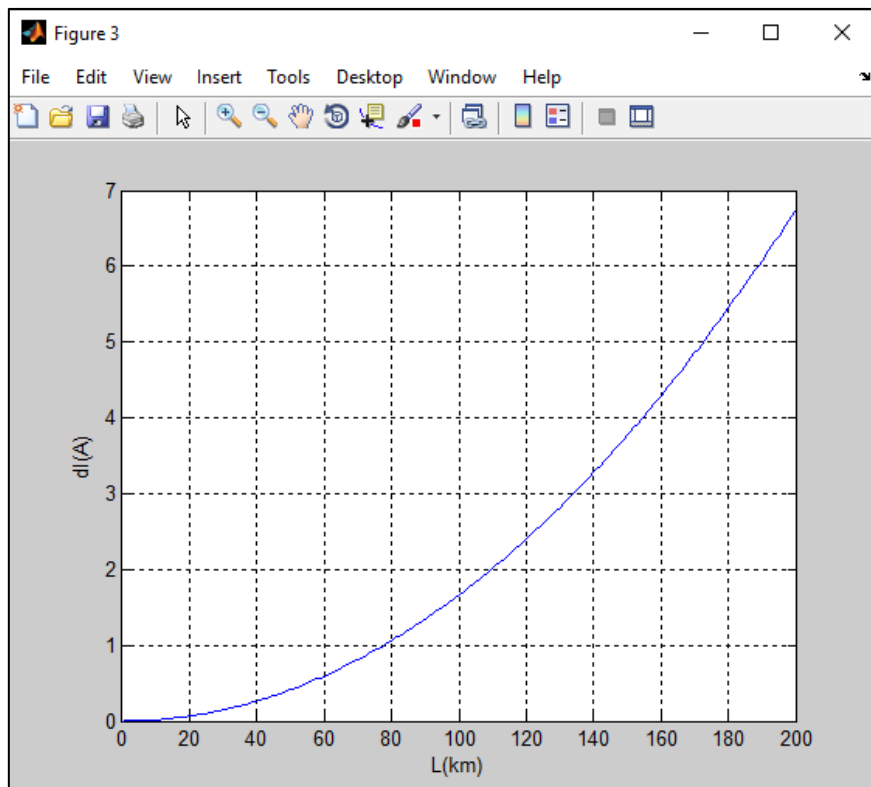


Fig.III.6 Courant d'entrée de la ligne en fonction de la distance



**Fig.III.7** Chute de tension en fonction de la distance



**Fig.III.8** Chute de courant en fonction de la distance



### III.6.2 Algorithme de calcul des caractéristiques de ligne longue

Dans le but de modéliser la ligne longue on a fait l'algorithme du déroulement du programme :

Calcul de coefficient de propagation  $\bar{\gamma} = \sqrt{\bar{Z} \bar{Y}}$

Calcul des impédances et l'admittance de la ligne :

$$\bar{Z}_c = \sqrt{\frac{\bar{Z}}{\bar{Y}}}$$

$$\bar{Z} = \bar{Z}_c \cdot \sinh(\bar{\gamma}l) \quad , \quad \bar{Y} = \frac{\cosh(\bar{\gamma}l-1)}{\bar{Z}}$$

Calcul des caractéristiques à la source :

$$\begin{cases} \bar{V}_S = \left(1 + \frac{\bar{Y} \cdot \bar{Z}}{2}\right) \bar{V}_r + \bar{Z} \bar{I}_r \\ \bar{I}_S = \left(1 + \frac{\bar{Y} \cdot \bar{Z}}{4}\right) \bar{V}_r + \left(1 + \frac{\bar{Y} \cdot \bar{Z}}{4}\right) \bar{I}_r \end{cases}$$

La puissance maximale transmise dans la ligne:

$$p_{max} = \frac{U_S U_R - U_R^2 \cos \beta}{U_R}$$

Calcul du rendement avec la formule suivant :

$$N\% = \frac{p_r}{p_s} \%$$

La régulation de la tension :

$$R\% = \frac{V_S - V_R}{V_R} \cdot 100\% = \frac{U_S - U_R}{U_R} \cdot 100\%$$

Calcul de la puissance réactive fournit par la ligne :

$$Q_C = \frac{\bar{Y}}{2} U_R^2$$

Calcul de la chute de tension :

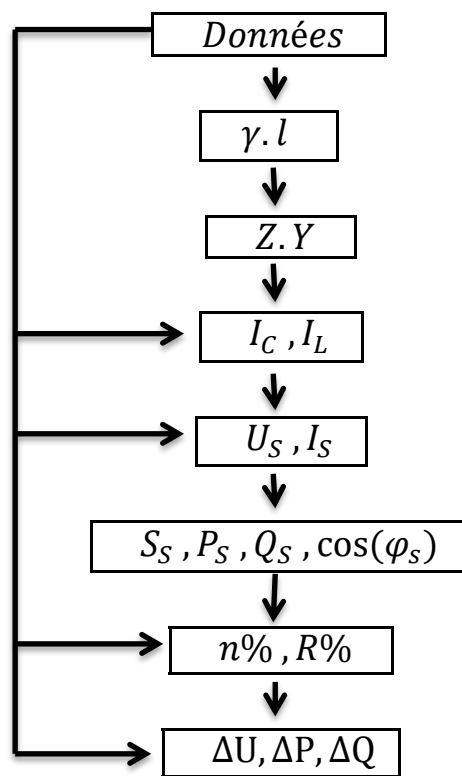
$$\Delta U_L = \frac{RP_2 + X(Q_2 - Q_{C2})}{U_2}$$

$$\Delta U_T = \frac{XP_R + X(Q_R - Q_{C2})}{U_R}$$

Calcul des pertes de puissance active et réactive :

$$\Delta P = 3 \cdot R I^2$$

$$\Delta Q = 3 \cdot X I^2 - Y_P (U_S^2 + U_R^2)$$



**Fig.III.10** organigramme de calcul des caractéristiques de la ligne longue

Les résultats de calculs sont présentés dans les tableaux suivants :

**Tab. III.1.** caractéristiques linéiques de la ligne longue

Impédance linéique $Z'$ ( $\Omega/\text{Km}$ )	$0.4121e^{182.3301}$
Admittance linéique $Y'$ ( $\Omega^{-1}/\text{Km}$ )	$6.2832*10^{-6} e^{190}$
Coefficient de propagation $\gamma$	$0.0017 e^{186.1651}$
$\gamma.l$	$0.5401 e^{186.1651}$
Impédance caractéristique $Z_C$ ( $\Omega$ )	$244.1809 e^{-3.8349i}$
Impédance de la ligne $Z(\Omega)$	$125.609 e^{182.7092}$
Admittance de la ligne $Y$ ( $\Omega^{-1}$ )	$0.0011 e^{189.8077}$

**Tab. III.2.** les caractéristiques de la ligne longue

$U_s(kV)$	$239.8837 e^{12.2508i}$
$I_s(A)$	$238.5938 e^{129.4843}$
$S_s(MVA)$	$99.133 e^{-17.2334i}$
$P_s(MW)$	94.683
$Q_s(MVAR)$	29.370
$\cos\phi_s$	0.9551
$\Delta U(KV)$	$52.801 e^{74.1652i}$
$P_{MAX}(MW)$	371.4271
$\Delta P(MW)$	4.3039
$\Delta Q(MVAR)$	22.102
N%	96.5878
R%	8.2889

### III.6 Conclusion

D'après l'interprétation de nos résultats notre programme a donné des résultats satisfaisants qui pourront être appliqué à un projet de construction de ligne de moyenne distance

# **Conclusion Générale**

### **CONCLUSION GENERALE**

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 composants le 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.

## Bibliographie

---

- [1] **Bellamouchi**, et al. "Conception et simulation de lignes électriques à haute tension." (2021).
- [2] **Support de Cours Réseaux Electriques**, Centre Universitaire Nour El Bachir El Bayadh, Année universitaire 2017/2018.
- [3] **www.alfanar.com**, Low Voltage Power and Control Cables, 2022/04/12,17:51.
- [4] **www.alfanar.com**, Medium Voltage Power and Control Cables, 2022/04/12, 18:04.
- [5] **www.alfanar.com**, HIGH VOLTAGE Power Cables and Control Cables, 2022/04/11,18:01.
- [6] **sitelec.org**, conducteurs en **cuivre\_vs\_aluminium.pdf**, 2022/04/14, 17:48.
- [7] **Ben Haoua**, et al. "Etude et analyse les paramètres électriques et mécaniques d'une ligne à haute tension." (2021).
- [8] Lyazid, H. A. D. D. A. D., and H. A. M. I. Khodir. "Calcul des paramètres et caractéristiques des lignes électriques triphasées." *Mémoire de Master 2* (2015).
- [9] Pierre ESCANÉ&Jean-Marie ESCANÉ « Réseaux électriques linéaires à constantes réparties »Techniques de l'Ingénieur D 1 100
- [10] **N. AOZELLAG LAHAÇANI**, « Réseaux électriques », Polycopié de cours UEF 3111, Université de A.MIRA-BEJAIA
- [11] **Messad, Oussama**, and **Nouh Agguini**. Calcul des paramètres et caractéristiques des lignes électriques triphasées. Diss. UNIVERSITE MOULOUD MAMMARI TIZI-OUZOU, 2021.
- [12] **Ahmed**, et al. "Calcul mécanique et électriques d'une ligne HT." (2020).
- [13] **L. Boufenneche**, « Calcul des réseaux électriques », Cours donné à Université des Frères Mentouri Constantine, 2018.
- [14] **A.ZEGAOUI**, « Cours de réseaux électriques », Polycopié de cours, Université Hassiba Benbouali de Chlef, 2020
- [15] **J- LILJEN**, « Transport et distribution de l'énergie électrique », Manuel de travaux pratiques destiné au cours, Université de Liège 1999/2000
- [16] « Paramètres et influences magnétiques et électriques intervenant dans le calcul des lignes électriques », Document scientifique.

## Bibliographie

---

- [17] **Abdelaziz Chaghi** « documents pédagogiques et didactiques » université de Batna 2000/2001
- [18] **Modeling, Simulation and Optimization of Transmission Lines. Applicability and Limitations of Some Used Procedures** (C.Portela / M.C.Tavares)
- [19] **Electrical Energy Systems** (Mohamed E. El-Hawary Dalhousie University)
- [20] 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
- [21] **Power System Stability and Control** (P .KUNDUR)
- [22] **Lignes Aériennes Présentation Et Calcul Des Lignes (D4420) Réseaux D'interconnexion Et De Transport.**