

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

UNIVERSITE MOULOUD MAMMERI DE TIZI-OUZOU



FACULTE DE GENIE ELECTRIQUE ET D'INFORMATIQUE  
DEPARTEMENT D'ELECTROTECHNIQUE

## Mémoire de Fin d'Etudes de MASTER ACADEMIQUE

Domaine : Sciences et Technologies

Filière : Electrotechnique

**Spécialité : RESEAUX ELECTRIQUES**

*Présenté par*  
**Amar MOUSSAOUI**  
**Ghiles AROUS**

Thème

# Calcul des paramètres électriques et mécaniques d'une ligne aérienne de transport d'énergie

*Mémoire soutenu publiquement le 17 Décembre 2020 devant le jury composé de :*

**M Djaffar BOUGUEDAD**

MCA, UMMTO, Président

**M Hamza BESSAI**

MAA, UMMTO, Rapporteur

**M Azzouz MIOUAT**

MAA, UMMTO, Examineur

## ***Remerciements***

*Nous exprimons notre profonde reconnaissance et nos sincères remerciements à notre promoteur, Monsieur **Hamza BESSAI**, qu'il trouve ici l'expression de notre sincère reconnaissance pour sa confiance, sa patience et son aide tout le long de ce travail.*

*Nos remerciements vont à Monsieur **Djaffar BOUGUEDAD**, maitre de conférence à l'UMMTO d'avoir accepté de présider le jury et de nous faire part de ses remarques et critiques.*

*Nous remercions également Monsieur **Azzouz MIOUAT** , maitre assistant à l'UMMTO pour l'honneur qu'il nous a fait en acceptant de faire partie du jury.*

*Nous adressons nos sincères remerciements à tous nos enseignants, notamment à monsieur le professeur **Tahar OTMANE CHERIF**.*

*Nous ne pourrions terminer sans avoir remercié ceux et celles qui ont participé de près ou de loin à la réalisation de ce travail, qu'ils trouvent ici l'expression de notre gratitude.*

## Sommaire

Introduction générale. ....	1
-----------------------------	---

### Chapitre I : Généralités sur les lignes électriques aériennes.

I.1 Introduction. ....	3
I.2 Les différents réseaux électriques selon le niveau de tension. ....	3
I.3 Eléments constitutifs des lignes aériennes. ....	4
I.3.1 Les conducteurs. ....	4
I.3.1.1 Constitution des conducteurs. ....	5
I.3.2 Le câble de garde. ....	6
I.3.3 Les supports. ....	7
I.3.3.1 Matériaux utilisés. ....	7
I.3.3.1.1 Le Bois. ....	7
I.3.3.1.2 Le Béton. ....	8
I.3.3.1.3 L'Acier. ....	8
I.3.3.1.4 Alliage d'aluminium. ....	9
I.3.3.2 L'armement. ....	9
I.3.3.2.1 Armement en triangle. ....	9
I.3.3.2.2 Armement en drapeau. ....	11
I.3.3.2.3 Armement en nappe. ....	11
I.3.3 Les Isolateurs. ....	12
I.3.3.1 Eléments constitutifs. ....	13
I.3.3.1.1 Isolants. ....	13
I.3.3.1.1.1 Les Céramiques. ....	13
I.3.3.1.1.2 Les Verres. ....	13
I.3.3.1.1.3 Les Matériaux synthétiques. ....	14

I.3.3.1.2 Pièces métalliques de liaison. ....	15
I.3.3.2 Les principaux types d'isolateurs. ....	15
I.3.3.2.1 Isolateur de type rigide. ....	16
I.3.3.2.2 Elément de chaîne. ....	16
Conclusion. ....	19

## **Chapitre II : les paramètres des lignes électriques aériennes.**

II.1 Introduction. ....	20
II.2 Calcul des quatre paramètres électriques des lignes électriques. ....	20
II.2.1 Calcul de la résistance (R) de la ligne. ....	20
II.2.1.1 Effet de Peau. ....	21
II.2.1.2 Effet de température. ....	22
II.2.1.3 Effet du spiralage des conducteurs composites. ....	23
II.2.1.4 L'effet couronne. ....	24
II.3 Calcul de l'inductance (L) de la ligne. ....	24
II.3.1 Calcul l'inductance d'un conducteur simple ....	24
II.3.1.1 Calcul de l'inductance due au flux interne. ....	24
II.3.1.2 Le RMG des différents types de conducteurs. ....	26
II.3.1.2.1 Le RMG des conducteurs toronnés. ....	26
II.3.1.2.2 Le RMG des conducteurs en faisceaux. ....	26
II.3.1.3 Calcul de l'inductance due au flux externe. ....	27
II.3.1.4 Calcul de l'inductance due au flux totale. ....	28
II.3.2 Calcul de l'inductance d'une ligne monophasée. ....	29
II.3.3 Calcul de l'inductance d'une ligne triphasée équilibrée à disposition équilatéral ....	30
II.3.3.1 Calcul de l'inductance des conducteurs composites. ....	31
II.3.3.2 Calcul de l'inductance des lignes triphasées aux conducteurs en faisceaux. ....	32
II.3.4 Calcul de l'inductance d'une ligne triphasée double circuit ....	33



II.4 Calcul de la capacité de la ligne .....	34
II.4.1 Calcul de la capacité d'une ligne monophasée. ....	34
II.4.2 Calcul de la capacité des lignes triphasées. ....	36
II.4.2.1 Lignes triphasée à disposition équilatérale. ....	36
II.4.2.2 lignes triphasée à disposition quelconque. ....	37
II.5 La conductance des lignes triphasée aériennes. ....	37
II.6 calcul du paramètre mécanique de la ligne. ....	37
II.6.1 calcul de la flèche. ....	37
II.6.1.1 supports au même niveau. ....	38
II.6.1.2 Supports à différents niveaux. ....	39
II.6.1.3 Influence du vent et du givre. ....	40
Conclusion. ....	42

### **Chapitre III : La tension et le courant à travers la ligne.**

III.1 Introduction. ....	43
III.2 Classification des lignes électriques. ....	43
III.3 La relation entre les tensions et les courants dans un quadripôle .....	43
III.4 modèles des différents types de lignes. ....	44
III.4.1 les lignes courtes. ....	44
III.4.2 les lignes moyennes. ....	45
III.4.2.1 modèle en T. ....	45
III.4.2.2 modèle en $\pi$ . ....	46
III.4.3 les lignes longues. ....	47
III.4.3.1 Représentation des circuits équivalents d'une ligne longue. ....	50
III.4.3.1.1 Représentation du circuit en $\pi$ équivalent. ....	50
III.4.3.1.2 Représentation du circuit en T équivalent. ....	52
Conclusion. ....	54

## **Chapitre IV : Description du programme et application.**

IV.1 Introduction. ....	55
IV.2 Description du fonctionnement du Programme. ....	55
IV.2.1 Calcul des paramètres électriques. ....	55
IV.2.2 Calcul de la flèche. ....	58
IV.3 Exemples d'application. ....	59
IV.3.1 Calcul des paramètres électriques. ....	59
IV.3.1.1 Ligne triphasée aux conducteurs toronnés à disposition quelconque. ....	59
IV.3.1.2 ligne triphasée aux conducteurs en faisceaux à 3 sous conducteurs. ....	60
IV.3.1.3 ligne triphasée aux conducteurs en faisceaux à 2 sous conducteurs. ....	62
IV.3.2 Calcul de la flèche. ....	64
IV.3.2.1 Pour une portée de 72 m. ....	64
IV.3.2.2 Pour une portée de 35 m. ....	64
Conclusion. ....	65
Conclusion générale. ....	66

## Liste des figures :

### Chapitre I : Généralités sur les lignes électriques aériennes.

Figure I.1 : Architecture générale des réseaux électriques en Algérie .....	4
Figure I.2 : Conducteurs usuels. ....	5
Figure I.3 : Conducteur compact. ....	5
Figure I.4 : Conducteur ACSS. ....	6
Figure I.5 : Câble de garde à fibres optiques incorporées. ....	7
Figure I.6 : Poteau électrique en bois. ....	8
Figure I.7 : Poteau électrique en béton. ....	8
Figure I.8 : Poteau électrique en acier. ....	9
Figure I.9 : Armement en triangle. ....	10
Figure I.10 : Armement en drapeau. ....	11
Figure I.11 : Armement en nappe et nappe-voute. ....	12
Figure I.12 : Isolateur en céramique. ....	13
Figure I.13 : Isolateur en verre. ....	14
Figure I.14 : Isolateur composite. ....	15
Figure I.15 : Isolateurs rigides en verre. ....	16
Figure I.16 : Assemblage des éléments de chaîne. ....	17
Figure I.17 : Isolateur à capot et tige. ....	18
Figure I.18 : Isolateur à long fût en porcelaine céramique. ....	19
Figure I.19 : Isolateur composite. ....	19

### Chapitre II : Les paramètres des lignes électriques aériennes.

Figure II.1 : Détermination de la constante T. ....	22
Figure II.2 : Conducteur spiralé et conducteur non spiralé. ....	23

Figure II.3 : Couches des sous conducteurs spiralés. ....	23
Figure II.4 : Flux interne d'un conducteur simple. ....	25
Figure II.5 : Liaison de flux entre D1 et D2. ....	27
Figure II.6 : Ligne monophasée à deux conducteurs. ....	29
Figure II.7 : Flux créé en un point p par les deux conducteurs. ....	29
Figure II.8 : Deux conducteurs composites. ....	31
Figure II.9 : Conducteur en faisceaux avec 2,3 et 4 cordes. ....	32
Figure II.10 : Arrangement des conducteurs d'une ligne triphasée à double circuit. ....	33
Figure II.11 : Champ électrique autour d'un fil conducteur long. ....	34
Figure II.12 : Ligne monophasée à deux fils. ....	35
Figure II.13 : Ligne triphasée à disposition équilatérale. ....	36
Figure II.14 : Ligne triphasée à disposition quelconque. ....	37
Figure II.15 : Supports au même niveau. ....	38
Figure II.16 : Supports à différents niveaux. ....	39
Figure II.17 : Epaisseur du givre et impacte du vent sur le conducteur. ....	41

### **Chapitre III : La tension et le courant à travers la ligne.**

Figure III.1 : Représentation en quadripôle d'une ligne de transmission. ....	43
Figure III.2 : Modèle d'une ligne courte. ....	44
Figure III.3 : Modèle en T d'une ligne moyenne. ....	45
Figure III.4 : Modèle en $\pi$ d'une ligne moyenne. ....	46
Figure III.5 : Ligne longue à constantes réparties. ....	47
Figure III.6 : Modèle en $\pi$ d'une ligne longue. ....	50
Figure III.7 : Schéma équivalent en $\pi$ d'une ligne longue. ....	52
Figure III.8 : Modèle en T d'une ligne longue. ....	52

Figure III.9 : Schéma équivalent en T d'une ligne longue. ....	53
--	----

## **Chapitre IV : Description du programme et application.**

Figure IV.1 : Organigramme de calcul des paramètres électriques de la ligne. ....	57
Figure IV.2 : Organigramme de calcul de la flèche. ....	58
Figure IV.3 : Données de la ligne triphasée aux conducteurs toronnés. ....	59
Figure IV.4 : Données d'une ligne triphasée aux conducteurs en faisceaux à 3 sous conducteurs. ....	60
Figure IV.5 : Données d'une ligne triphasée aux conducteurs en faisceaux à 2 sous conducteurs à 37 brins. ....	62
Figure IV.6 : Données d'une ligne triphasée aux conducteurs en faisceaux à 2 sous conducteurs à 61 brins. ....	63

## **Liste des tableaux :**

### **Chapitre II : Les paramètres des lignes électriques.**

Tableau II.1 : RMG des conducteurs toronnés. ....	26
Tableau II.2 : RMG des conducteurs en faisceaux. ....	27

### **Chapitre IV ; Description du programme et application.**

Tableau IV.1 : Les différents choix offerts par le programme de calcul des paramètres électriques. ....	55
Tableau IV.2 : RMG des différents types des conducteurs. ....	56
Tableau IV.3 : Les différents choix offerts par le programme de calcul du paramètre mécanique. ....	58
Tableau IV.4: Nos résultats de calcul des paramètres d'une ligne aux conducteurs toronnés. ....	59
Tableau IV.5 : Résultats obtenus en littérature. ....	60
Tableau IV.6: Résultats de calcul, par phase, des paramètres d'une ligne aux conducteurs en faisceaux à 3 sous conducteurs. ....	61
Tableau IV.7: Résultats en littérature, par conducteur, des paramètres d'une ligne aux conducteurs en faisceaux à 3 sous conducteurs. ....	61
Tableau IV.8: Résultats de calcul, par phase, des paramètres d'une ligne aux conducteurs en faisceaux à 2 sous conducteurs à 37 brins. ....	62
Tableau IV.9: Résultats de calcul, par phase, des paramètres d'une ligne aux conducteurs en faisceaux à 2 sous conducteurs à 61 brins. ....	63

### **Liste des abbreviations :**

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.

DMG : Distance Moyenne Géométrique.

ACSR Aluminium Conductor Steel reinforced.

AAAC : All Aluminium Alloy Conductor.

AACSR : Aluminium Alloy Conductor Steel Reinforced.

ACSS : Aluminium Conductor Steel Suported.

TACSR : Thermal Aluminium Conductor Steel Reinforced.

EPDM : éthylpropyldimonomère.

### Liste des symbols :

R : résistance linéique ( $\Omega/\text{km}$ )

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

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

$\rho$  : résistivité du matériau ( $\Omega.\text{m}$ )

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

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

t : les température en  $^{\circ}\text{C}$  du conducteur.

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

K: facteur de Kelvin

f : fréquence du réseau ( $\text{Hz}$ ).

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

H: champ magnétique ( $\text{At}/\text{m}$ )

$\Phi$ : Flux ( $\text{Wb.t}/\text{m}$ )

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

$\epsilon_0$  : permittivité du vide ( $\epsilon_0 = 8.85 \times 10^{-12} \text{ F}/\text{m}$  )

$g_{11}$  (rmg): Rayon moyen géométrique d'une corde.

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

Y : Admittance de la ligne ( $\Omega$  )

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

$Z_c$ : Impédance caractéristique ( $\Omega$ )

$\lambda$ : Confession de propagation

$\theta$ : Angle propagation

D : la flèche en [m].

S : la portée horizontale en [m].

w : le poids du conducteur par unité de longueur en [ $\text{N}/\text{m}$ ].

H : tension mécanique aux extrémités du conducteur en [ $\text{N}$ ].



$h$  : la distance verticale entre les sommets des supports en [m]

$D_L$  : La flèche par rapport au support de gauche en [m]

$D_R$  : La flèche par rapport au support de droite en [m]

$w_i$  : le poids du givre par unité de longueur en [N/m]

$D_i$  : la densité du givre

$d$  : diamètre du conducteur en [m]

$t$  : épaisseur du givre en [m]

$w_w$  : la force du vent par unité de longueur en [N/m]

$p_w$  : la pression du vent en [Pa].

$w_t$  : le poids total du conducteur, en présence du givre et du vent, par unité de longueur en [N/m]

# **Introduction générale**

### Introduction générale

L'électricité est devenue omniprésente dans tous les secteurs de vie quotidienne. Sa production est assurée par des centrales de production d'électricité de différents types, ensuite acheminée dans des réseaux électriques et distribuée sous différents niveaux.

Les réseaux électriques sont considérés comme des infrastructures. Ces réseaux sont conçus traditionnellement d'une manière verticale où les transferts de l'énergie suivent le schéma dit « du haut en bas » : Production –Transport Distribution [1]. Un réseau électrique est un ensemble d'infrastructures dont les lignes, particulièrement les lignes aériennes triphasées qui font l'objet de notre travail, et les postes électriques.

Ces lignes électriques sont disposées de diverses manières pour assurer la transition de l'énergie électrique de manière fiable et économique, en minimisant les pertes en énergie électrique et en matériels utilisés.

Notre travail consiste à écrire un programme informatique, sous MATLAB, qui permet de calculer les différents paramètres, électriques et mécaniques, pour les différentes dispositions.

Les quatre paramètres électriques qui affectent les performances des lignes électriques de transmission, qui sont une partie très importante du réseau d'énergie électrique, sont l'inductance, la capacité, la résistance et la conductance [2].

Le calcul de ces quatre paramètres a plusieurs apports bénéfiques, que ce soit sur la détermination de la tension et du courant à travers la ligne, ou sur le plan de protection, ou encore sur la compensation de l'énergie réactive.

En plus de ces paramètres électriques, il existe un paramètre mécanique qui ne peut être négligeable lors de la conception de la ligne, ce paramètre est le fléchissement de la ligne, communément appelé « la flèche ».

Ce travail sera réparti en quatre chapitres :

- Le chapitre I, traite des généralités sur les lignes électriques aériennes et particulièrement les éléments les constituants.
- Le chapitre II est consacré au calcul des paramètres électriques et mécanique des lignes.
- Le chapitre III, présente les différents modèles mathématiques des lignes selon leurs longueurs ainsi que les calcul des courants et tensions à travers ces dernières.
- Le chapitre IV, présente le programme de calcul réalisé, et les applications étudiées pour différentes configurations de lignes.

Nous terminons notre travail par une conclusion générale.

# **Chapitre I :**

## **Généralités sur les lignes électriques aériennes**

**I.1 Introduction**

La transmission de l'énergie électrique, des centrales de production vers les centres de consommation, se fait majoritairement par des lignes électriques aériennes grâce aux divers avantages que présente ce type de ligne.

Cette transmission de l'énergie électrique se fait à différents niveaux de tension, pour des raisons économiques et de facilitation de gestion.

On va présenter dans ce chapitre les différents niveaux de tension utilisés pour les lignes aériennes, et les éléments les constituant.

**I.2 Les différents réseaux électriques selon le niveau de tension**

En général, le nombre de niveaux de tension est limité à 3, selon le type de réseau électrique [3] (comme le montre la figure I.1) :

- Les réseaux de transport et d'interconnexion, ce type de réseau utilise la THT ou la HTB.
- Les réseaux de répartition, ce type de réseau utilise la HTB et la HTA.
- Les réseaux de distribution, ce type de réseau utilise la HTA.

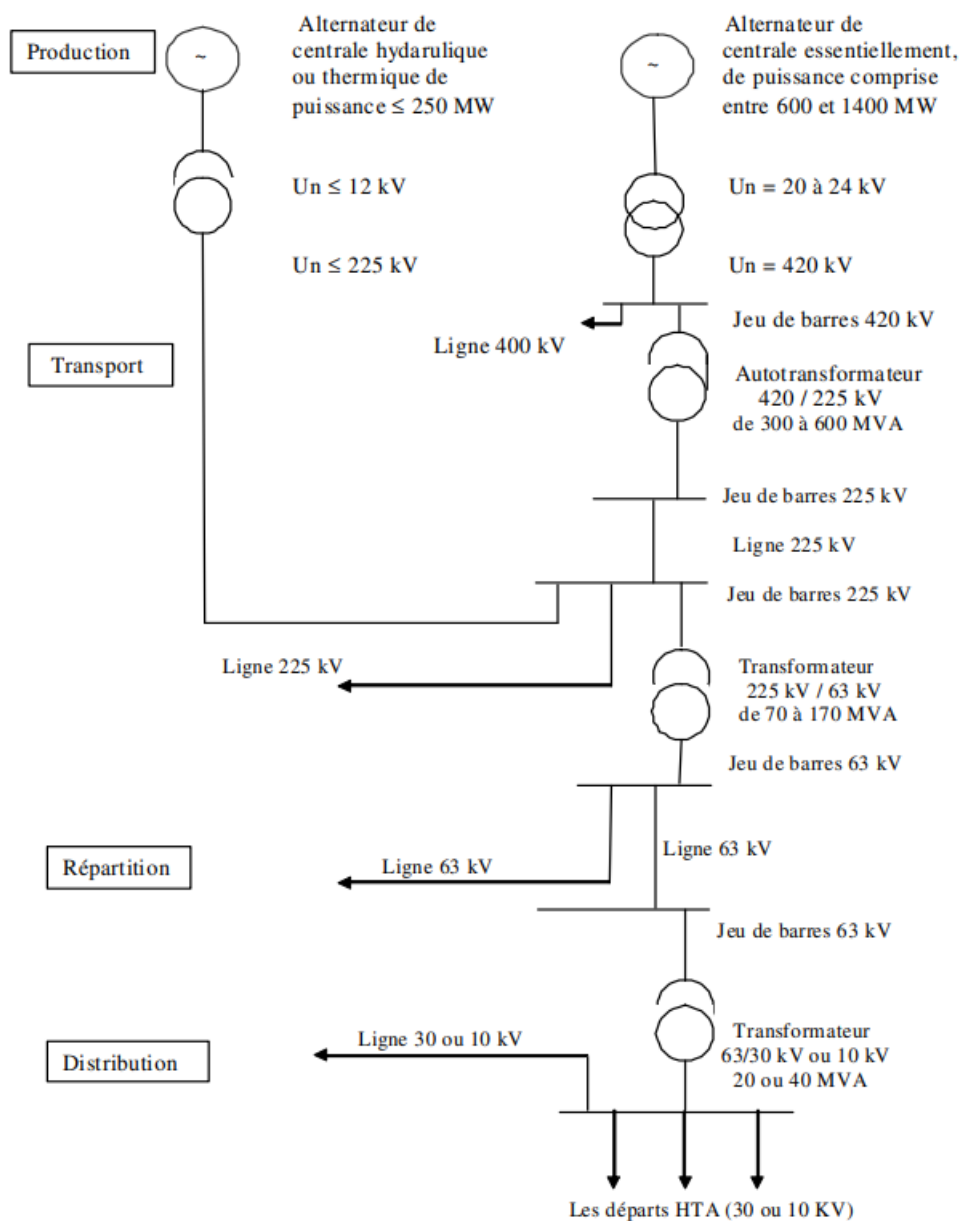


Figure I.1 : Architecture générale des réseaux électriques en Algérie [4].

### I.3 Eléments constitutifs des lignes aériennes

#### I.3.1 Les conducteurs

Le transport et la distribution de l'énergie électrique se fait en triphasé pour des raisons économiques, donc chaque ligne comprend principalement 3 conducteurs de phase.

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 [5].

### I.3.1.1 Constitution des conducteurs

Les métaux les plus utilisées actuellement dans les lignes électriques aériennes sont l'Aluminium et ses alliages, on distingue essentiellement 3 types de conducteurs de ce genre [5] :

- Le ACSR : Aluminium Conductor Steel reinforced.
- Le AAAC : All Aluminium Alloy Conductor.
- Le AACSR : Aluminium Alloy Conductor Steel Reinforced.

Les conducteurs se répartissent principalement en 3 catégories [5] :

- Les conducteurs usuels :

Les conducteurs usuels sont des câbles normalement formés de couches successives de brins ronds à sens d'enroulement alternés.

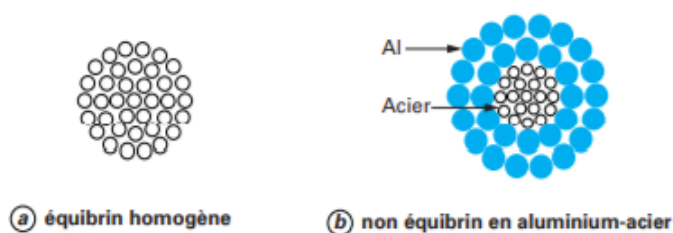


Figure I.2 : Conducteurs usuels.

- Les conducteurs compacts :

Ce type de conducteurs réduit les vides existant dans les conducteurs usuels, en formant des brins de sections trapézoïdales ou profilés en forme de Z.

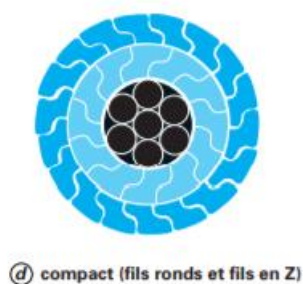


Figure I.3 : Conducteur compact.



- Les conducteurs à haute température :

Ce type de conducteurs est conçu pour supporter des températures très élevées. Il en existe 2 types :

- Le ACSS : Aluminium Conductor Steel Suported.
- Le TACSR : Thermal Aluminium Conductor Steel Reinforced.

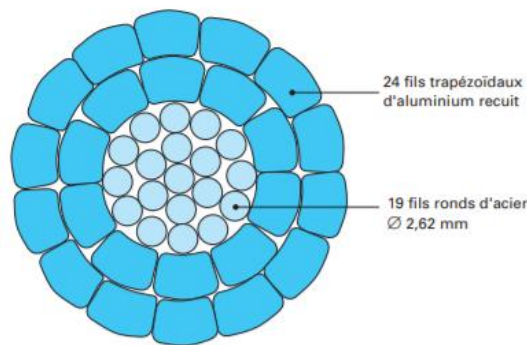


Figure I.4 : Conducteur ACSS.

### I.3.2 Le câble de garde

Au plus haut de la ligne est disposé un câble appelé câble de garde, dont le rôle est de protéger des coups de foudre afin d'éviter une éventuelle surtension au niveau des conducteurs.

Il existe deux types de câble de garde [5]:

- Des câbles alélec-acier normaux ;
- Des câbles alélec-acier comportant à l'intérieur des circuits de télécommunication. Equipés de fibres optiques, ils permettent de transmettre les informations nécessaires pour la protection, la conduite et l'exploitation du réseau ; on parle alors d'OPGW (Optical GroundWire). C'est aussi un moyen d'offrir des solutions haut débit pour les collectivités territoriales

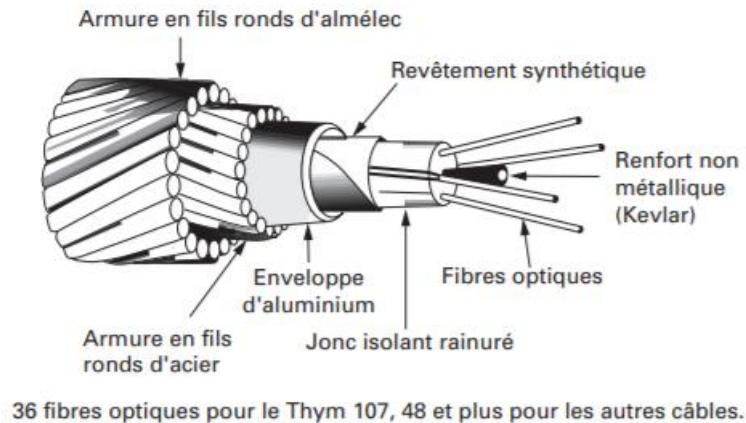


Figure I.5 : Câble de garde à fibres optiques incorporées.

### I.3.3 Les supports

Pour transporter de l'énergie électrique par la voie aérienne, les conducteurs électriques, généralement nus, et les câbles de gardes sont supportés par des pylônes, pour assurer l'isolement par rapport à la terre, ainsi que la sécurité de proximité en les maintenant à une distance suffisante du sol.

Les supports peuvent aller des simples poteaux en bois ou en béton, d'une douzaine de mètres en hauteur, aux pylônes treillis d'acier, de plus de 50 m de hauteur et ayant une masse pouvant atteindre, voire dépasser 100 t [6].

Les fondations de ces supports dépendent de leurs natures, elles peuvent être unique (monobloc) ou à raison d'un massif par pied (multipode) [7].

#### I.3.3.1 Matériaux utilisés

Les supports de lignes aériennes sont, couramment, des poteaux de bois ou de béton armé, des assemblages de pièces de bois ou de béton armé ou des constructions métalliques de formes et d'importances très variées, allant de la simple poutrelle aux pylônes métalliques en treillis [6].

##### I.3.3.1.1 Le Bois

Les essences de bois utilisées sont presque toujours des résineux que l'on imprègne de produits antiseptiques pour les protéger contre les attaques biologiques par insectes et champignons [6].



Figure I.6 : Poteau électrique en bois.

### I.3.3.1.2 Le Béton

Il en existe 2 types ; le béton armé et le béton précontraint. La mise en œuvre est identique pour les deux types de béton. Il est fabriqué à partir de constituants normalisés et agréés (ciments, granulats, eau) [6].



Figure I.7 : Poteau électrique en béton.

### I.3.3.1.3 L'Acier

Quel que soit l'effort appliqué, les tubes et profilés d'acier se prêtent naturellement à la fabrication de toute espèce de support ou d'élément de support que l'on peut désirer (ferrures d'armement pour les supports en bois et en béton, poteaux formés d'une simple poutrelle en fer ou de section plus compliquée, pylônes à treillis de toutes formes et de toutes dimensions) [6].

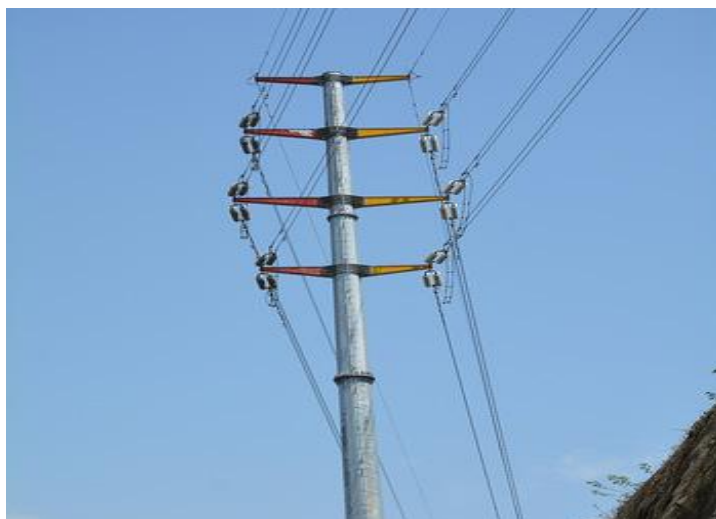


Figure I.8 : Poteau électrique en acier.

#### **I.3.3.1.4 Alliage d'aluminium**

Certains alliages d'aluminium (magnésium et silicium) ont été utilisés pour la réalisation de pylônes, pratiquement toujours dans des régions définies soit par leur agressivité (bord de mer ou proximité de complexes sidérurgiques ou chimiques), soit par leur relief (difficultés d'accès) [6].

#### **I.3.3.2 L'armement**

On appelle armement d'une ligne électrique, l'ensemble des accessoires (tête du support, ferrures et isolateurs) nécessaires au support d'une ligne électrique en haut d'un mât ou d'un pylône. Il doit être tel que les conducteurs ne puissent se toucher entre eux ou entrer en contact avec le sol dans l'espace compris entre deux support consécutifs que l'on appelle « portée ». On distingue 3 types d'armement :

##### **I.3.3.2.1 Armement en triangle**

Cet armement exige des dimensions transversales réduites, donc permet d'obtenir assez facilement une bonne tenue du support aux efforts de torsion, mais il présente quelques inconvénients [6] :

- La hauteur des pylônes doit être très élevée
- Les deux conducteurs situés dans deux plans verticaux doivent être distants

- L'armement en chapeau de gendarme dans la figure I.9 élimine l'inconvénient précédent mais il ne peut être utilisé que pour des tensions assez basses.

La figure I.9 Suivante nous montre quelques exemples d'armement triangle.

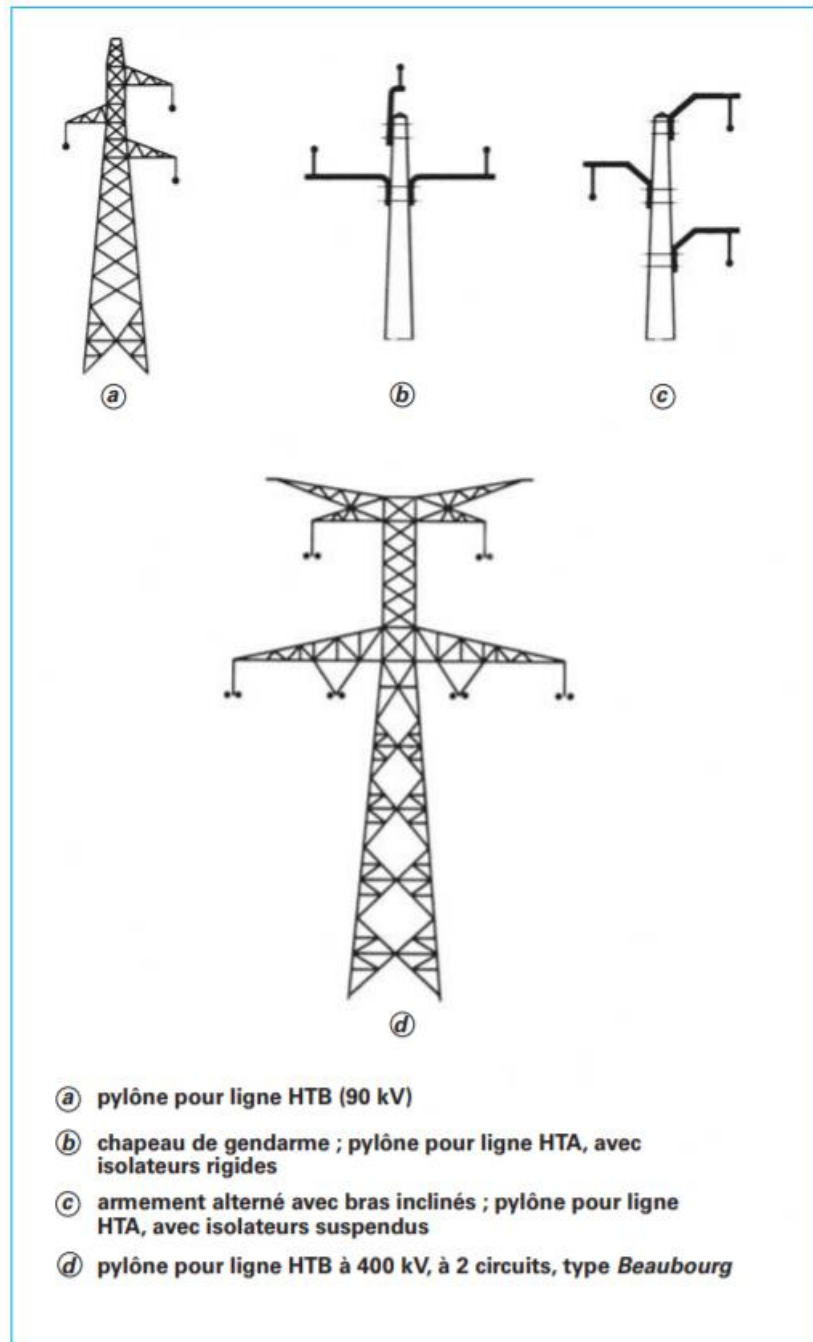


Figure I.9 : Armement en triangle.

### I.3.3.2 Armement en drapeau

Il est peu fréquent pour les lignes HTB à un seul circuit, mais assez habituel pour les lignes HTA et BT. En HTB, cette disposition est utilisée pour les lignes à deux circuits.

Cet armement présente les défauts de l'armement en triangle, mais cette disposition est pratiquement imposée pour un grand nombre de lignes, notamment en HTB, lorsque l'encombrement en projection horizontale est limité (zones fortement urbanisées, en traversées de forêts) [6].

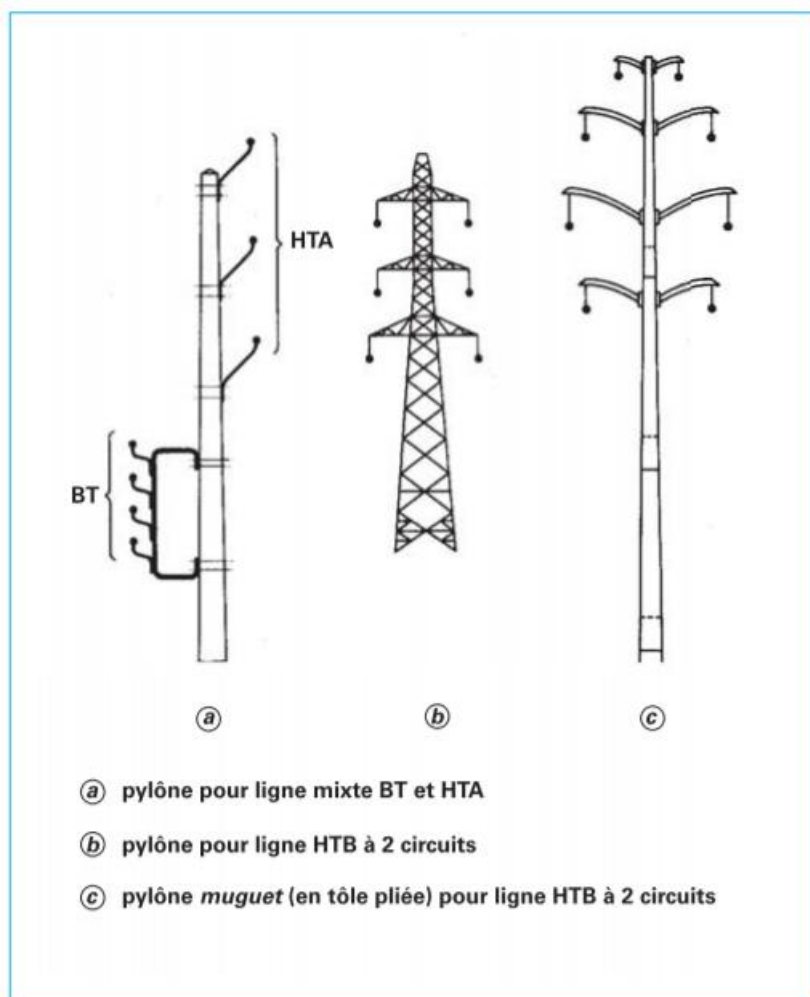


Figure I.10 : Armement en drapeau.

### I.3.3.2.3 Armement en nappe

Il est d'usage fréquent pour les lignes HTA et HTB. Le pylône du type chat, très utilisé en France pour les lignes HTB, peut être considéré comme armé en nappe, bien que la poutre centrale soit légèrement plus haute que les consoles.

Cet armement en nappe exige des supports plus larges mais moins élevés que pour les autres armements et donne une plus grande sécurité en cas de décharge de givre ou d'oscillations verticales des conducteurs. Il permet, par installation de deux câbles de garde, de protéger la ligne contre les coups de foudre et est bien adapté aux lignes de montagne [6].

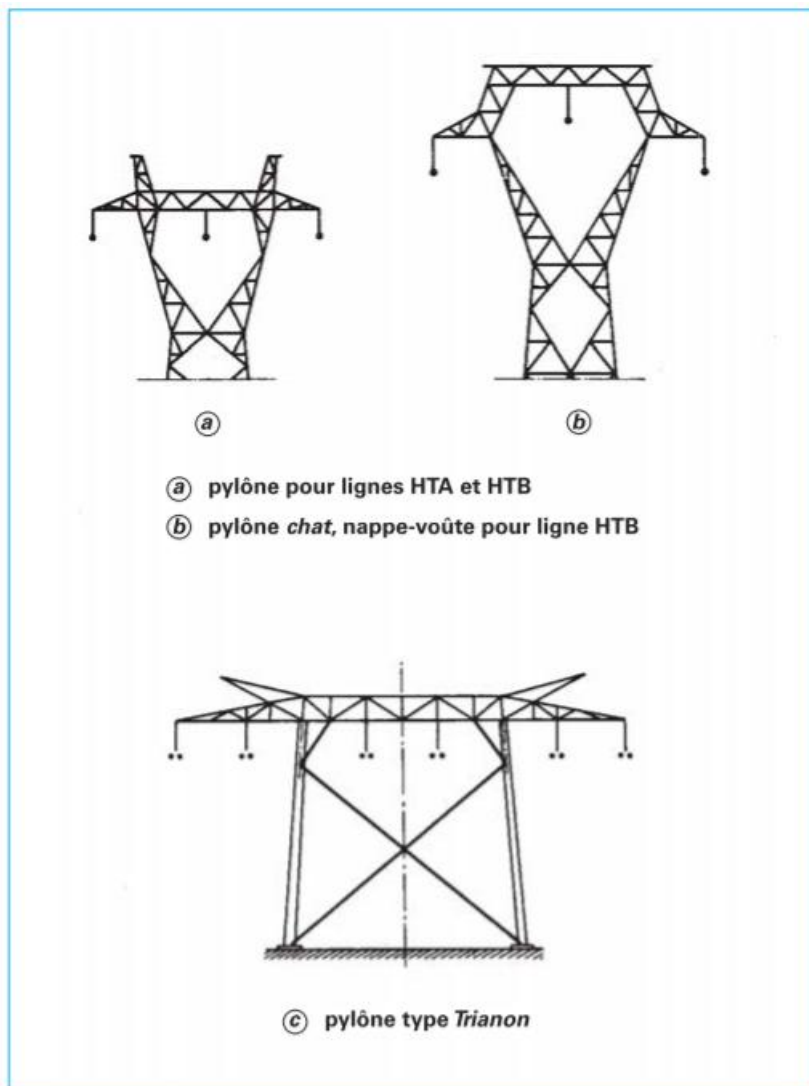


Figure I.11 : Armement en nappe et nappe-voûte.

### I.3.3 Les Isolateurs

Un isolateur sert à empêcher la conduction entre des conducteurs électriques soumis à des tensions différentes. Ces isolateurs sont réalisés soit en verre, ou céramique, soit en matériau synthétique, dont la conductivité électrique est pratiquement très faible voire nulle, pour assurer l'isolation électrique entre conducteurs.

### I.3.3.1 Eléments constitutifs

Un isolateur est constitué en général de deux parties : une partie isolante et des pièces métalliques de liaison, scellées sur cette partie isolante [8].

#### I.3.3.1.1 Isolants

Jusqu'aux années quatre-vingt, seuls le verre et la céramique ont justifié d'un bon comportement en exploitation, bien que ces deux matériaux soient, par essence, des matériaux fragiles [8].

##### I.3.3.1.1.1 Les Céramiques

Elles sont actuellement utilisées pour les isolateurs à haute tension. Certaines céramiques à grains très fins sont recommandées pour des isolateurs devant supporter des efforts mécaniques élevés [8].



Figure I.12 : Isolateur en céramique.

##### I.3.3.1.1.2 Les Verres

Il en existe deux types utilisés :

- **Le verre recuit**

Il a surtout été utilisé pour faire des isolateurs rigides, mais on s'est aperçu que les isolateurs un peu épais ne résistaient pas aux variations brusques de température. De plus, le verre recuit ne supporte que des tensions mécaniques relativement faibles, ce qui interdit son emploi pour les isolateurs de suspension [8].



### - Le verre trempé

Il est obtenu par réchauffage de l'isolant retiré du moule à une température d'environ 700 °C, puis refroidi par des jets d'air sous pression : les couches extérieures de la pièce isolante acquièrent rapidement une rigidité qui ne leur permet plus aucune déformation. L'intérieur restant à une température supérieure à celle des couches extérieures, il ne peut se contracter librement, lors de son refroidissement ; il reste donc en extension et crée des contraintes de compression sur les couches superficielles. Le verre trempé présente une contrainte mécanique en traction environ 5 à 6 fois plus grande que celle du verre recuit et peut supporter des variations brusques de température pouvant atteindre 100 °C.



Figure I.13 : Isolateur en verre.

#### I.3.3.1.1.3 Les Matériaux synthétiques

Ces isolateurs, dits composites, sont constitués d'une âme réalisée en fibre de verre imprégnée de résine, donnant à l'isolateur sa tenue mécanique, et d'une enveloppe en matériaux synthétiques isolants. Les revêtements ayant un comportement satisfaisant sous contraintes électriques sont certaines résines cycloaliphatiques (chargées au trihydrate d'alumine), des caoutchoucs synthétiques (silicones ou EPDM : éthylpropyldimonomère) ou des polytétrafluoroéthylènes (Téflon). Ces revêtements évitent tout cheminement carboné en surface sous l'effet de contraintes électriques mais sont soumis à une érosion superficielle plus ou moins rapide selon leur constitution [8].



Figure I.14 : Isolateur composite.

#### I.3.3.1.2 Pièces métalliques de liaison

Les parties isolantes constitutives de l'isolateur sont reliées entre elles ou au support par des pièces métalliques, réalisées dans différents métaux qui doivent répondre aux contraintes mécaniques et thermiques appliquées à l'isolateur au cours de son exploitation. Les principaux métaux ou alliages utilisés sont [8] :

- Les fontes malléables, permettant de réaliser des pièces minces et de forme compliquée, par exemple les capots d'isolateurs ;
- Les aciers au carbone, de caractéristiques précises, employés pour la réalisation des pièces forgées, en particulier les tiges d'isolateurs ;
- Les alliages d'aluminium et les alliages de cuivre et de bronze d'aluminium, permettant de fabriquer certains capots ;
- Les alliages de zinc du type Z-A4G, qui, compte tenu de leur température de fusion, permettent de couler directement les capots sur les diélectriques des isolateurs de faible résistance mécanique.

La liaison entre pièces métalliques et partie isolante est réalisée à l'aide d'un scellement qui peut être fait au mortier de ciment Portland ou alumineux. Des alliages de plomb-antimoine, des mélanges de soufre et de poudre céramique sont également utilisés. De la qualité du scellement et des différents assemblages dépendent, en grande partie, la sécurité d'exploitation et la durée de vie de l'isolateur [8].

#### I.3.3.2 Les principaux types d'isolateurs

On peut distinguer deux types principaux d'isolateurs : les isolateurs de type rigide et les éléments de chaîne [8].

### I.3.3.2.1 Isolateur de type rigide

Un isolateur rigide est relié au support par une ferrure fixe. Cet isolateur est principalement soumis à des efforts de flexion et de compression, lorsqu'il est placé en position verticale. Il peut, dans certains cas, être placé horizontalement, voire à l'oblique.

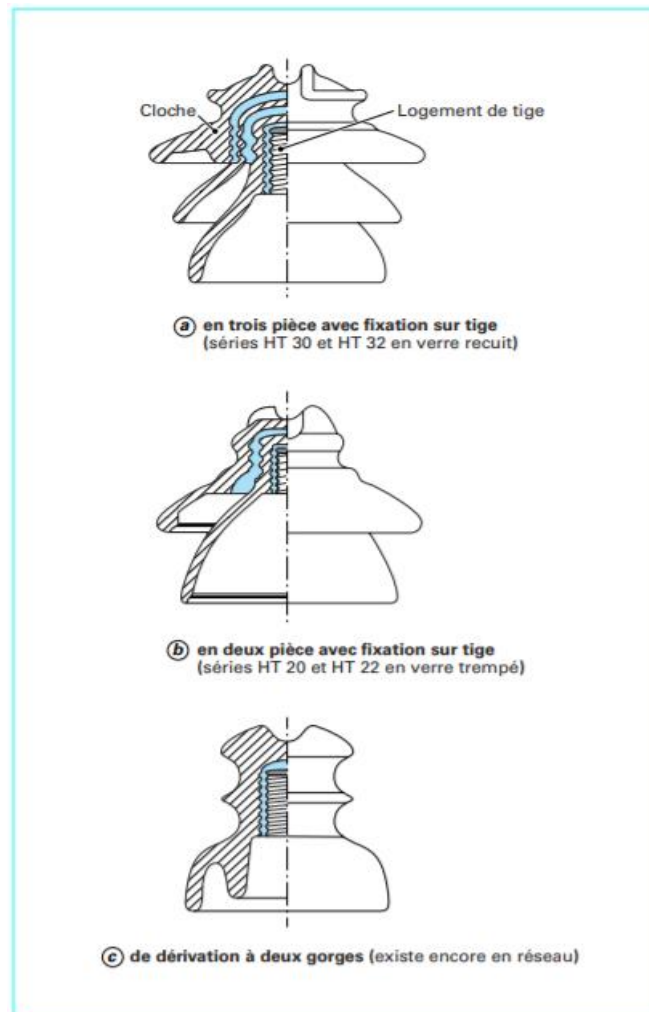


Figure I.15 : Isolateurs rigides en verre.

### I.3.3.2.2 Élément de chaîne

C'est un isolateur constitué par un matériau isolant équipé de pièces métalliques de liaison, nécessaires pour le relier de façon flexible à d'autres éléments de chaîne, à la pince de suspension du conducteur ou au support [8].

Il existe deux types principaux d'éléments de chaîne : les isolateurs à capot et tige et les isolateurs à long fût [8].

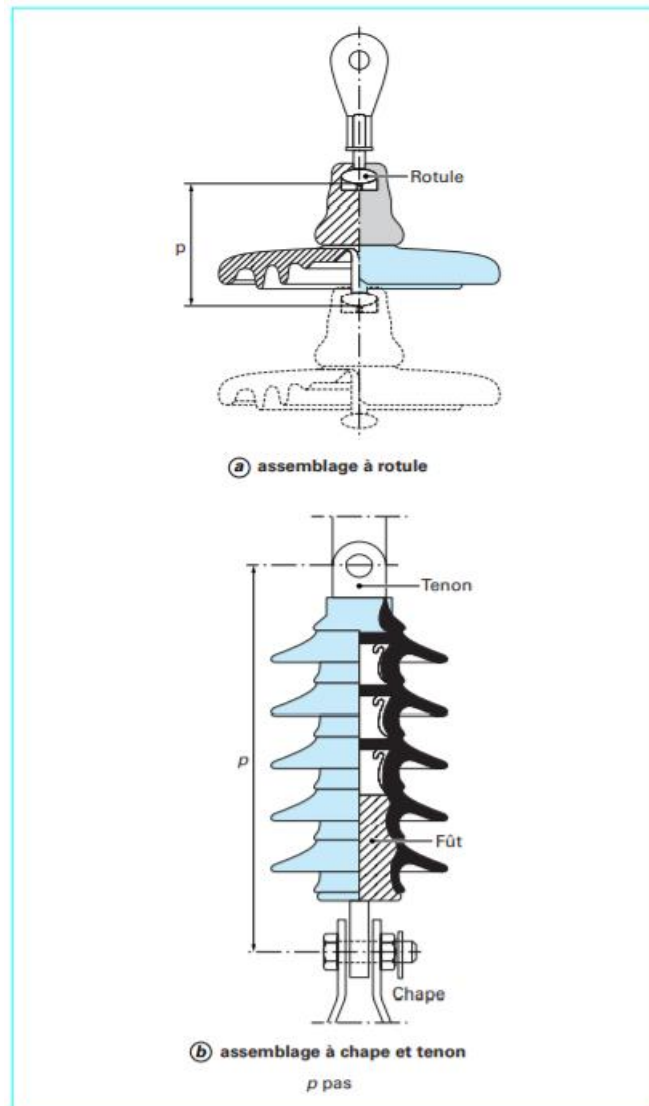


Figure I.16 : Assemblage des éléments de chaîne.

### - Isolateurs à capot et tige

La coupe d'un tel isolateur est schématisée sur la figure Figure I.15. La forme de la tête est dessinée de sorte que les efforts de traction appliqués à l'isolateur se transforment, autant que possible, en compression des diélectriques sur lesquels apparaissent, toutefois, inévitablement certaines contraintes de cisaillement.

La forme en contre-dépouille de l'intérieur de la tête, nécessaire à l'accrochage du scellement de la tige, est obtenue soit par le pas d'une vis qui se dégage après le pressage du diélectrique, soit par une déformation ou un usinage postérieur à la formation de la tête, dans le cas d'isolateurs en céramique.

Cette contre-dépouille peut être évitée pour ces isolateurs par l'application, avant cuisson, de petits morceaux de pâtes précuites qui, après cuisson, feront corps avec la pièce et permettront l'accrochage du mortier ; ce procédé connu sous le nom de Sandage est couramment utilisé [8].

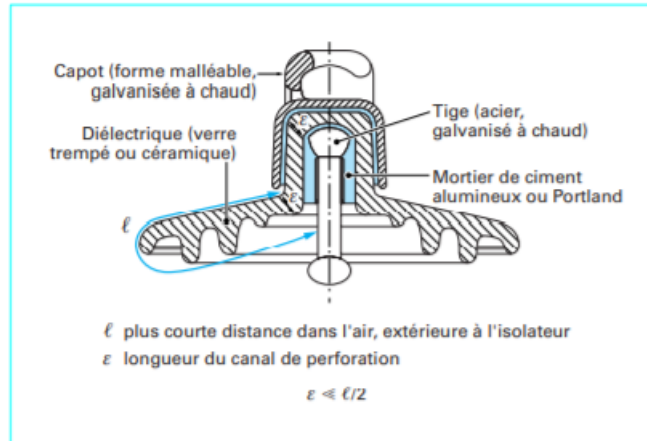


Figure I.17 : Isolateur à capot et tige.

## - Isolateurs à long fût

### ➤ En céramique

Ils sont constitués d'un bâton cylindrique plein en céramique, muni d'ailettes. À chaque extrémité est fixée une pièce métallique de liaison ; celle-ci peut être enveloppante en forme de capot scellé autour des extrémités tronconiques prévues sur le bâton, ou bien en forme de tige scellée dans une cavité prévue à cet effet.

De tels isolateurs peuvent être utilisés unitairement ou en série de plusieurs éléments en fonction de leur longueur et du niveau d'isolement requis [8].

### ➤ En matériaux synthétiques

L'intérêt principal de tels isolateurs est leur meilleure tenue à la pollution, leur faible encombrement, et leur légèreté, en particulier lorsqu'on les compare aux chaînes d'isolateurs pour les lignes de tension électrique élevée.

De par leur constitution, ces isolateurs sont appelés isolateurs composites [8].

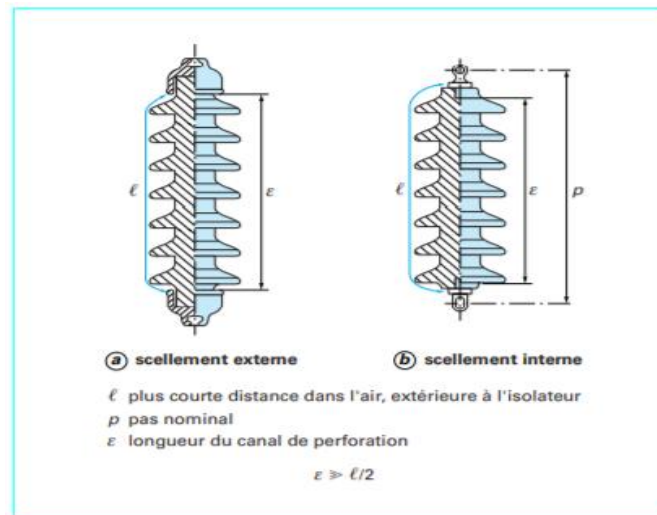


Figure I.18 : Isolateur à long fût en porcelaine céramique.

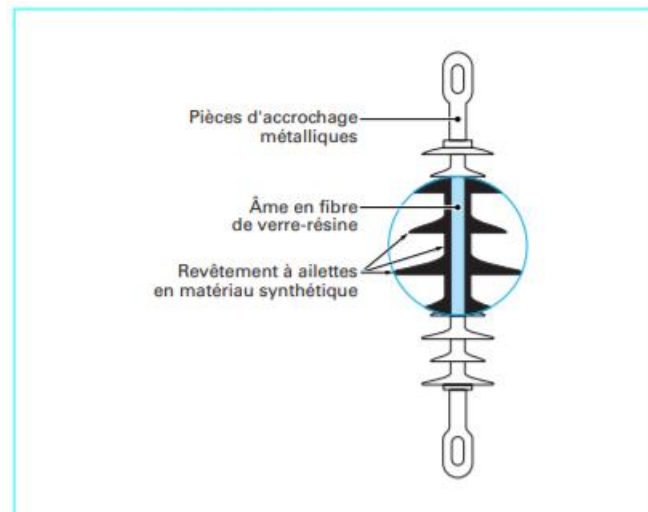


Figure I.19 : Isolateur composite.

## Conclusion

Les lignes électriques aériennes ne sont pas constituées seulement de conducteurs électriques, mais aussi de pleins d'autres infrastructures assurant la bonne tenue des conducteurs, ainsi que d'assurer leurs protection contre les surtensions et les court-circuits dus aux conditions atmosphériques.

## **Chapitre II :**

### **Les paramètres des lignes électriques aériennes**

## II.1 Introduction

Les quatre paramètres électriques qui affectent les performances des lignes électriques de transmission, qui sont une partie très importante du réseau d'énergie électrique, sont l'inductance, la capacité, la résistance et la conductance [9].

Le calcul de ces quatre paramètres a plusieurs apports bénéfiques, que ce soit sur la détermination de la tension et du courant à travers la ligne, ou sur le plan de protection, ou encore sur la compensation de l'énergie réactive.

En plus de ces paramètres électriques, il existe un paramètre mécanique qui ne peut être négligeable lors de la conception de la ligne, ce paramètre est le fléchissement des conducteurs, communément appelé « la flèche » ou « Sag » en anglais.

## II.2 Calcul des quatre paramètres électriques des lignes électriques

### II.2.1 Calcul de la résistance (R) de la ligne

Malgré que la valeur de la résistance de la ligne soit négligeable devant son impédance série dans la plupart des cas, étant une source de pertes, elle doit être prise en compte pour une transmission économique d'énergie [9].

La résistance en courant alternatif dans une ligne de transmission est basée sur le calcul de la résistance ohmique (en courant continu).

Si le courant continu transite à travers un conducteur cylindrique, alors ce courant est uniformément réparti sur la section du conducteur et sa résistance est donnée par la formule [10] :

$$R = \rho \times \frac{l}{S} \quad (\text{II.1})$$

avec :  $\rho(T) = \rho(T_0)(1 + \alpha(T - T_0))$

Où :

$\rho(T)$  est la résistivité à une température T en [ $\Omega \cdot m$ ]

l est la longueur de la ligne en [m]

S est la section du conducteur en [ $m^2$ ]

$\rho(T_0)$  est la résistivité du matériau à 20 °C



$\alpha$  est le coefficient de température en  $[\frac{1}{^{\circ}\text{C}}]$ .

Or que si c'est un courant alternatif qui y transite, il ne sera pas uniforme sur toute la section du conducteur suite à la fréquence, c'est ce qu'on appelle l'effet de peau, et la résistance effective sera plus grande.

### II.2.1.1 Effet de Peau

La distribution uniforme du courant sur la section d'un conducteur n'existe qu'en courants continus. Cette uniformité se perd au fur et à mesure qu'on augmente la fréquence, le courant se concentre alors à la périphérie du conducteur, c'est l'effet de peau [11].

La résistance effective en courant alternatif  $R_a$  est plus grande que la résistance réelle en courant continu  $R_c$ .

En pratique, le taux d'effet de peau ou coefficient d'augmentation de résistance s'exprime par le rapport suivant [12] :

$$K = \frac{R_a}{R_c} \quad \Rightarrow \quad R_a = k \cdot R_c \quad (\text{II.2})$$

Avec :  $R_a$  est la résistance effective en courant alternatif.

$R_c$  est la résistance en courant continu.

Ou

$$K = \sqrt[6]{\left(\frac{3}{4}\right)^6 + \left(\frac{S}{p\delta}\right)^6} + 0.25 \quad (\text{II.3})$$

Avec :  $S$  est la section du conducteur en  $[\text{m}^2]$

$P$  est le périmètre du conducteur en  $[\text{m}]$

$\delta$  est l'épaisseur de peau en  $[\text{m}]$

$$\delta = \frac{1}{2\pi} \cdot \sqrt{\frac{10\rho}{\mu f}} \quad (\text{II.4})$$

Avec :  $\rho$  est la résistivité exprimée en  $[\Omega \cdot \text{m}]$

$\mu$  est la perméabilité valant  $4\pi 10^{-7}$   $[\text{H/m}]$  pour le vide

$f$  est la fréquence est exprimée en  $[\text{Hz}]$

En plus de ce facteur, il existe d'autres facteurs induisant la variation de la résistance comme [10] :

- La température,
- L'effet de spirilage des conducteurs toronnés,
- L'arrangement des conducteurs en faisceaux.

### II.2.1.2 Effet de température

La résistivité de chaque matériau conducteur varie linéairement avec la température du service suivant la relation :

$$\rho(T) = \rho(T_0)(1 + \alpha(T - T_0))$$

Et la résistance à son tour varie linéairement avec la résistivité suivant la relation :

$$R = \rho(T) \times \frac{l}{S}$$

Alors la résistance varie aussi linéairement avec la température, suivant la formule [10] :

$$R_2 = R_1 \times \left[ \frac{T + t_1}{T + t_2} \right] \quad (\text{II.5})$$

Avec :  $R_1$  et  $R_2$  des résistances des conducteurs respectivement à des températures  $t_1$  et  $t_2$ , et  $T$  est une constante de température liée à la nature du conducteur.

Pour permettre de déterminer la constante  $T$ , on place les températures sur l'axe des coordonnées et les résistances sur l'axe des abscisses, on obtient la valeur de  $T$  de l'intersection de la courbe  $t=f(R)$  avec l'axe des coordonnées comme illustré sur la figure II.1 suivante [9] :

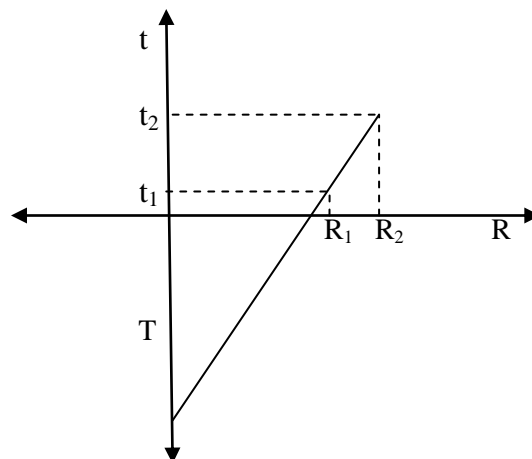


Figure II.1 : Détermination de la constante  $T$ .

### II.2.1.3 Effet du spirilage des conducteurs composites

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 créé par le conducteur pour produire un échauffement positif (du au cycle hystérésis) pour faire fondre le givre qui s'y accumule [13].

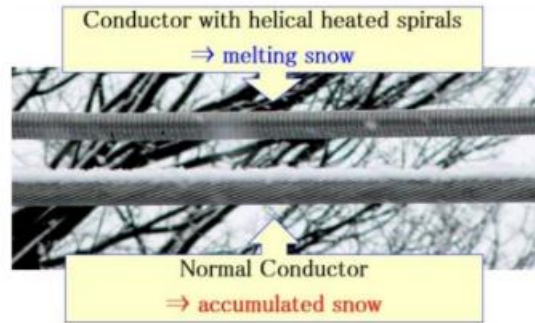


Figure II.2 : Conducteur spiralé et conducteur non spiralé.

L'effet du spirilage d'un conducteur fait augmenter la résistance de 1% environ pour les conducteurs à 3 brins et de 2% environ pour les conducteurs de brins supérieure [14].

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].



Figure II.3 : Couches des sous conducteurs spiralés.

La résistance de chaque sous conducteur par unité de longueur dans chaque couche, est donnée par la relation suivante [10] :

$$R_{\text{cond}} = \frac{\rho(T)}{S} \times \sqrt{1 + \left(\pi \frac{l}{p}\right)^2} \quad [\Omega/\text{m}] \quad (\text{II.6})$$

Avec :

$R_{\text{cond}}$  est la résistance d'un sous conducteur en  $[\Omega]$

$\sqrt{1 + (\pi \frac{l}{p})^2}$  est la longueur d'un sous conducteur en [m]

$$P = \frac{l}{2r}$$

$l$  est la longueur d'un tour de spirale en [m]

$2r$  est le diamètre de la couche en [m]

#### II.2.1.4 L'effet couronne

L'effet couronne ou décharge couronne, est un phénomène dû à l'ionisation de l'air autour d'un conducteur d'une ligne électrique de transmission, se manifestant sous forme d'une gaine lumineuse bleuâtre [15], à cause des champs électriques intenses, à la surface des conducteurs, entraînés par une tension élevée dépassant la tension critique, au-delà de laquelle ce phénomène apparaît [16].

L'effet couronne contribue significativement à l'augmentation de la température du conducteur ce qui mène, à son tour, à une augmentation de la résistance du conducteur [16] (la relation entre la température et la résistance).

### II.3 Calcul de l'inductance (L) de la ligne

L'inductance est le quotient entre le flux total embrassé par la boucle conductrice et le courant qui la traverse [14]. Elle est déterminée par la relation :

$$L = \frac{\Phi}{I} \text{ [H]} \quad \text{avec : } \Phi : \text{ le flux total induit par les courants variables en [Wb]} \quad (\text{II.7})$$

$I$  : le courant circulant à travers le conducteur [A].

L'inductance est le paramètre le plus dominant dans les lignes électriques de point de vue des spécialistes des réseaux d'énergie électrique [9].

#### II.3.1 Calcul de l'inductance d'un conducteur simple [9]

##### II.3.1.1 Calcul de l'inductance due au flux interne

Supposons un conducteur traversé par un courant  $I$  sur sa longueur  $l$ ,  $x$  est le rayon interne

variable et  $r$  le rayon entier fixe du conducteur, comme indiqué sur la figure II.4 suivante.

La surface de la section correspondante au rayon  $x$  est  $\pi x^2$  et  $I_x$  le courant circulant à travers cette surface (pas d'effet de peau). La valeur de  $I_x$  peut être exprimée en fonction du courant  $I$  circulant à travers le conducteur entier et sa surface  $\pi r^2$ , comme suit :

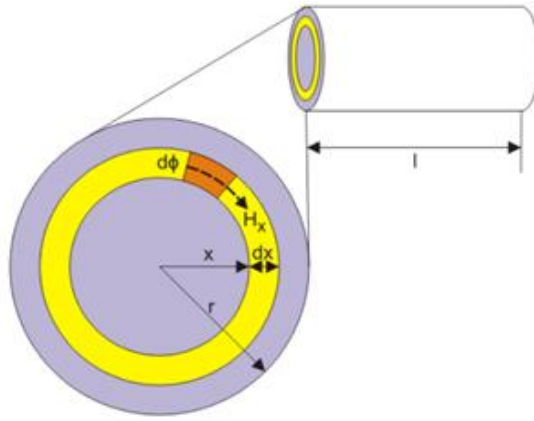


Figure II.4 : Flux interne d'un conducteur simple.

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

Prenons à présent une petite portion  $dx$  et 1 m de longueur pour le conducteur,  $H_x$  est le champ magnétique dû au courant  $I_x$  à travers l'aire  $\pi x^2$  :

$$H_x = \frac{I_x}{2\pi x} = \frac{I}{2\pi r^2} \times x \text{ [A/m]} \quad (\text{II.8})$$

Comme :  $I_x = I \times \frac{x^2}{r^2}$

On a :  $B_x = \mu \times H_x = \mu_0 \times \mu_r \times H_x$

La perméabilité relative  $\mu_r$  de ce matériau est prise  $\mu_r = 1$ ,

Alors  $B_x = \mu_0 \times H_x = \mu_0 \times \frac{I}{2\pi r^2} \times x$

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

On a :  $d\Phi = B_x dx = \frac{\mu_0}{2 \times \pi} \times \frac{x \times I}{r^2} dx \text{ [Wb/m]} \quad (\text{II.10})$

Ce flux est le flux dans l'aire dont le rayon est le rayon variable  $x$ , le flux à travers la section dont le rayon est  $r$  est :

$$d\lambda = \frac{\pi x^2}{\pi r^2} \times d\Phi = \frac{\mu_0}{2 \times \pi} \times \frac{x^3 \times I}{r^4} dx \text{ [Wb/m]} \quad (\text{II.11})$$

$$\lambda = \int_0^r d\lambda = \frac{\mu_0}{8 \times \pi} \times I$$

$$L_{\text{int}} = \frac{\lambda}{I} = \frac{\mu_0}{8 \times \pi} \text{ [H/m]} \quad (\text{II.12})$$

On déduit de l'équation (II.12) que l'inductance interne ne dépend pas des dimensions du conducteur [18].

### II.3.1.2 Le RMG des différents types de conducteurs

#### II.3.1.2.1 Le 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 comme indiqué dans le tableau II.1 suivant [17] :

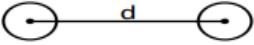
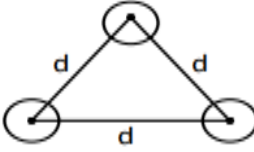
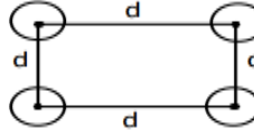
Nombre de brins	RMG
Conducteur de section circulaire pleine	$0,4394 S^{\frac{1}{2}}$
Corde à 3 brins sans âme centrale	$0,4750 S^{\frac{1}{2}}$
Corde à 7 brins	$0,4642 S^{\frac{1}{2}}$
Corde à 19 brins	$0,4902 S^{\frac{1}{2}}$
Corde à 37 brins	$0,4982 S^{\frac{1}{2}}$
Corde à 61 brins	$0,5020 S^{\frac{1}{2}}$
Corde à 91 brins	$0,5038 S^{\frac{1}{2}}$
Corde à 127 brins	$0,5046 S^{\frac{1}{2}}$

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

#### II.3.1.2.2 Le RMG des conducteurs en faisceaux

Dans les lignes à haute tension, le conducteur de phase peut être constitué d'un faisceau de 2, 3, 4 conducteurs ou plus, selon la tension, d'un même diamètre, disposé symétriquement les uns par rapport aux autres [17].

Dans un tel cas, il faut connaître le RMG résultant du faisceau, qui est constitué de conducteurs de un ou plusieurs torons, comme indiqué dans le tableau II.2 suivant [17]:

Disposition	Formule du RMG
	$\text{RMG} = (rmg \cdot d)^{\frac{1}{2}}$ $\text{RMG} = \sqrt{rmg \cdot d}$
	$\text{RMG} = rmg^{\frac{1}{3}} \cdot d^{\frac{2}{3}}$ $\text{RMG} = \sqrt[3]{rmg \cdot d^2}$
	$\text{RMG} = 2^{\frac{1}{8}} \cdot rmg^{\frac{1}{4}} \cdot d^{\frac{3}{4}}$ $\text{RMG} = 1.09 \cdot \sqrt[4]{rmg \cdot d^3}$

**Tableau II.2** : RMG des conducteurs en faisceaux

**N.B** : rmg est le rayon moyen géométrique d'une seule corde et RMG est le rayon moyen géométrique d'un faisceau entier.

### II.3.1.3 Calcul de l'inductance due au flux externe

Supposons qu'à cause de l'effet de peau le courant circulant à travers le conducteur est concentré près de la surface du conducteur, et y le rayon entier du conducteur (Figure II.5).

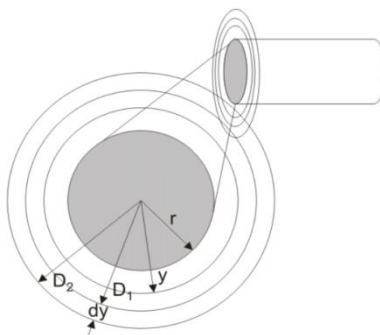


Figure II.5 : Liaison de flux entre D1 et D2.

Considérons  $d\Phi$  est le flux magnétique présent dans la portion  $dy$  entre D1 et D2 pour 1m de longueur, donc :

$$d\Phi = B_y dy = \frac{\mu_0}{2 \times \pi} \times \frac{I}{y} dy \text{ [Wb/m]} \quad (\text{II.13})$$

Et comme le courant circule près de la surface (présence d'effet de peau) nous avons :

$$d\lambda = d\Phi = \frac{\mu_0}{2 \times \pi} \times \frac{I}{y} dy \Rightarrow \lambda = \int_{D1}^{D2} d\lambda$$

$$\begin{aligned} \lambda &= \int_{D1}^{D2} d\lambda = \frac{\mu_0}{2 \times \pi} \times I \times \int_{D1}^{D2} \frac{1}{y} dy \\ &= \frac{\mu_0}{2 \times \pi} \times I \times \ln \frac{D2}{D1} \quad [\text{Wb/m}] \end{aligned}$$

Mais on doit considérer le flux pour n'importe quelle distance d près de la surface du conducteur, de r à D, On aura donc :

$$\lambda = \frac{\mu_0}{2 \times \pi} \times I \times \ln \frac{D}{r} \Rightarrow L_{\text{ext}} = \frac{\lambda}{I} = \frac{\mu_0}{2 \times \pi} \times \ln \frac{D}{r} \quad [\text{H/m}] \quad (\text{II.14})$$

$$L_{\text{ext}} = \frac{\mu_0}{2 \times \pi} \times \ln \frac{D}{r} \quad [\text{H/m}] \quad (\text{II.15})$$

#### II.3.1.4 Calcul de l'inductance due au flux totale

$$\begin{aligned} L_{\text{tot}} &= L_{\text{int}} + L_{\text{ext}} = \frac{\mu_0}{8 \times \pi} + \frac{\mu_0}{2 \times \pi} \times \ln \frac{D}{r} = \frac{\mu_0}{2 \times \pi} \times \left( \frac{1}{4} + \ln \frac{D}{r} \right) = \frac{\mu_0}{2 \times \pi} \times \left( \ln \left( e^{\frac{1}{4}} \right) + \ln \frac{D}{r} \right) \\ &= \frac{\mu_0}{2 \times \pi} \times \left( \ln \frac{D}{r} - \ln \left( e^{-\frac{1}{4}} \right) \right) \\ (e^{-\frac{1}{4}}) &= 0,7788 \quad <===== &= \frac{\mu_0}{2 \times \pi} \times \ln \frac{D}{e^{-\frac{1}{4}} \times r} = \frac{\mu_0}{2 \times \pi} \times \ln \frac{D}{0,7788 \times r} \\ 0,7788 \times r &= \text{RMG} \quad <===== &L_{\text{tot}} = \frac{\mu_0}{2 \times \pi} \times \ln \frac{D}{\text{RMG}} \quad [\text{H/m}] \quad (\text{II.16}) \end{aligned}$$



## II.3.2 Calcul de l'inductance d'une ligne monophasée

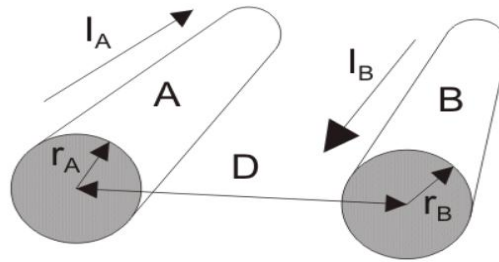


Figure II.6 : Ligne monophasée à deux conducteurs.

Supposons que le conducteur A, de la ligne, de rayon  $r_A$  traversé par un courant  $I_A$  qui est du sens opposé par rapport à  $I_B$  traversant le conducteur B de rayon  $r_B$ .

Les deux conducteurs A et B sont séparés par une distance D et sont de même longueur l. Ces deux conducteurs sont si proches qu'il y a création des flux d'une part et de l'autre à cause des effets électromagnétiques.

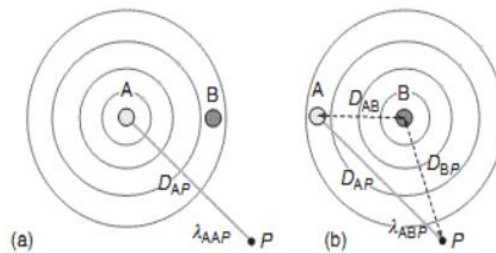


Figure II.7 : Flux créé en un point p par les deux conducteurs.

Prenons  $I_A = -I_B$

Considérons le point P situé au voisinage des deux conducteurs A et B, le flux en P est la somme du flux créé par A et le flux créé par B en ce point :

$$\lambda_P = \lambda_{AP} + \lambda_{BP} = (\lambda_{AAP} + \lambda_{ABP}) + (\lambda_{BBP} + \lambda_{BAP}) \quad (\text{II.17})$$

Avec :  $\lambda_{AAP}$  : flux au point P pour A du au courant  $I_A$ .

$\lambda_{ABP}$  : flux au point P pour A du au courant  $I_B$ .

$\lambda_{BBP}$  : flux au point P pour B du au courant  $I_B$ .

$\lambda_{BAP}$  : flux au point P pour B du au courant  $I_A$ .

$$\lambda_{AAP} = \frac{\mu_0}{2 \times \pi} \times I \times \ln \frac{D_{AP}}{RMGA} \quad [\text{Wb/m}]$$

$$\lambda_{BBP} = \frac{\mu_0}{2 \times \pi} \times I \times \ln \frac{D_{BP}}{RMGB} \quad [\text{Wb/m}]$$

$$\lambda_{ABP} = \int_D^{D_{BP}} B_{AP} dP = - \frac{\mu_0}{2 \times \pi} \times I \times \ln \frac{D_{BP}}{D} \quad [\text{Wb/m}]$$

$$\lambda_{BAP} = \int_D^{D_{AP}} B_{AP} dP = - \frac{\mu_0}{2 \times \pi} \times I \times \ln \frac{D_{AP}}{D} \quad [\text{Wb/m}]$$

En remplaçant ces grandeurs par leurs valeurs dans l'équation (II.17), on aura :

$$\begin{aligned} \lambda_P &= \frac{\mu_0}{2 \times \pi} \times I \times \ln \left( \frac{D_{AP}}{RMGA} \times \frac{D}{D_{AP}} \times \frac{D_{BP}}{RMGB} \times \frac{D}{D_{BP}} \right) \\ &= \frac{\mu_0}{2 \times \pi} \times I \times \ln \frac{D^2}{RMGA \times RMGB} \end{aligned}$$

Considérons  $r_A = r_B$  :

$$\lambda_P = \frac{\mu_0}{2 \times \pi} \times I \times \ln \frac{D^2}{RMG^2} = \frac{\mu_0}{2 \times \pi} \times I \times 2 \times \ln \frac{D}{RMG} = \frac{\mu_0}{\pi} \times I \times \ln \frac{D}{RMG} \quad [\text{Wb/m}] \quad (\text{II.18})$$

L'inductance par phase est alors :

$$L = \frac{\lambda_P}{I} = \frac{\mu_0}{\pi} \times \ln \frac{D}{RMG} \quad [\text{H/m}] \quad (\text{II.19})$$

### II.3.3 Calcul de l'inductance d'une ligne triphasée équilibrée à disposition équilatéral [18]

On a :  $D_{AB} = D_{BC} = D_{AC} = D$  et  $I_A + I_B + I_C = 0 \rightarrow I_A = -I_B - I_C$

$$\lambda_A = \frac{\mu_0}{2 \times \pi} \times [I_A \times \ln \frac{1}{RMGA} + I_B \times \ln \frac{1}{D} + I_C \times \ln \frac{1}{D}]$$

$$\lambda_A = \frac{\mu_0}{2 \times \pi} \times [I_A \times \ln \frac{1}{RMGA} + (I_B + I_C) \times \ln \frac{1}{D}] = \lambda_P = \frac{\mu_0}{2 \times \pi} \times [I_A \times \ln \frac{1}{RMGA} - I_A \times \ln \frac{1}{D}]$$

$$\lambda_A = \frac{\mu_0}{2 \times \pi} \times [I_A \times \ln \frac{D}{RMGA}] \quad [\text{Wb/m}] \quad (\text{II.20})$$

$$L_A = \frac{\lambda_A}{I_A} = \frac{\mu_0}{2 \times \pi} \times \ln \frac{D}{RMGA} \quad [\text{H/m}] \quad (\text{II.21})$$

En suivant le même raisonnement, on obtient :

$$\lambda_B = \frac{\mu_0}{2 \times \pi} \times [I_B \times \ln \frac{D}{RMGB}] \quad \text{et} \quad \lambda_C = \frac{\mu_0}{2 \times \pi} \times [I_C \times \ln \frac{D}{RMGC}] \quad \text{et ensuite :}$$

$$L_B = \frac{\lambda_B}{I_B} = \frac{\mu_0}{2 \times \pi} \times \ln \frac{D}{RMGB} \quad \text{et} \quad L_C = \frac{\lambda_C}{I_C} = \frac{\mu_0}{2 \times \pi} \times \ln \frac{D}{RMGC}$$

Pour une ligne triphasée équilibrée à disposition quelconque, il suffit de trouver la distance équilatérale  $D_{eq}$  correspondante à cette ligne par la formule suivante :

$$D_{eq} = \sqrt[3]{D_{12}D_{23}D_{13}}$$

Et ensuite la mettre à la place de la distance  $D$  dans les équations (1.5), on obtient :

$$L_A = \frac{\mu_0}{2 \times \pi} \times \ln \frac{DMG}{RMGA}$$

$$L_B = \frac{\lambda_B}{I_B} = \frac{\mu_0}{2 \times \pi} \times \ln \frac{D_{eq}}{RMGB}$$

$$L_C = \frac{\lambda_C}{I_C} = \frac{\mu_0}{2 \times \pi} \times \ln \frac{D_{eq}}{RMGC}$$

### II.3.3.1 Calcul de l'inductance des conducteurs composites

Considérons une ligne monophasée constituée de deux conducteurs composites  $x$  et  $y$ , comme indiqué dans Figure II.8. Le courant est supposé uniformément réparti sur les sous conducteur, et le courant dans chaque sous conducteur est  $\frac{I}{n}$  pour  $x$  et  $-\frac{I}{m}$  pour  $y$  (puisque les courant sont de sens opposés) [10].

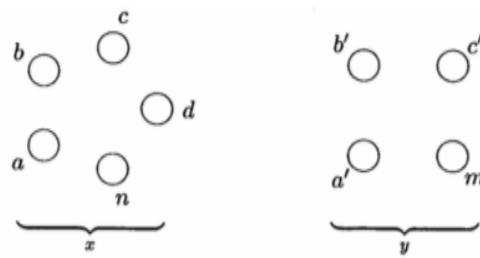


Figure II.8 : Deux conducteurs composites.

$$\lambda_a = \frac{\mu_0}{2 \times \pi} \times \frac{I}{n} \times \left( \ln \frac{1}{R'} + \ln \frac{1}{D_{ab}} + \ln \frac{1}{D_{ac}} + \dots + \ln \frac{1}{D_{an}} \right) - \frac{\mu_0}{2 \times \pi} \times \frac{I}{m} \times \left( \ln \frac{1}{D_{aa'}} + \ln \frac{1}{D_{ab'}} \right. \\ \left. + \ln \frac{1}{D_{ac'}} + \dots + \ln \frac{1}{D_{am}} \right)$$

$$\lambda_a = \frac{\mu_0}{2 \times \pi} \times I \times \ln \frac{\sqrt[n]{D_{aa'} \times D_{ab'} \times D_{ac'} \times \dots \times D_{am}}}{\sqrt[n]{R' \times D_{ab} D_{ac} \times \dots \times D_{an}}}$$

L'inductance du sous conducteur a est alors :

$$L_a = \frac{\lambda a}{I} = n \times \frac{\mu_0}{2 \times \pi} \times \ln \frac{\sqrt[n]{D_{aa'} \times D_{ab'} \times D_{ac'} \times \dots \times D_{am}}}{\sqrt[n]{R' \times D_{ab} \times D_{ac} \times \dots \times D_{an}}}$$

En suivant le même raisonnement, on obtiendra les inductances de tous les autres sous conducteurs :

$$L_n = \frac{\lambda n}{I} = n \times \frac{\mu_0}{2 \times \pi} \times \ln \frac{\sqrt[n]{D_{na'} \times D_{nb'} \times D_{nc'} \times \dots \times D_{nm}}}{\sqrt[n]{R' \times D_{na} \times D_{nb} \times D_{nc} \times \dots \times D_{nn}}}$$

L'inductance moyenne de n'importe quel sous conducteur du groupe x est :

$$L_{moy} = \frac{L_a + L_b + L_c + \dots + L_n}{n}$$

Puisque les sous conducteurs du conducteur x sont électriquement en parallèle, on peut écrire :

$$L_x = \frac{L_{moy}}{n} = \frac{L_a + L_b + L_c + \dots + L_n}{n^2}$$

En substituant  $L_a, L_b, L_c, \dots$  par leurs valeurs, on aura :

$$L_x = \frac{\mu_0}{2 \times \pi} \times \ln \frac{DMG}{RMG_x} \quad [H/m] \quad (II.22)$$

Avec:

$$DMG = \sqrt[n]{(D_{aa'} \times D_{ab'} \times D_{ac'} \times \dots \times D_{am}) \times \dots \times (D_{na'} \times D_{nb'} \times D_{nc'} \times \dots \times D_{nm})}$$

$$RMG = \sqrt[n^2]{(D_{aa} \times D_{ab} \times D_{ac} \times \dots \times D_{an}) \times \dots \times (D_{na} \times D_{nb} \times D_{nc} \times \dots \times D_{nn})}$$

### II.3.3.2 Calcul de l'inductance des lignes triphasées aux conducteurs en faisceaux



Figure II.9 : Conducteur en faisceaux avec 2,3 et 4 cordes.

l'inductance par phase des conducteurs en faisceau est :

$$L_x = \frac{\mu_0}{2 \times \pi} \times \ln \frac{DMG}{RMG_x} \quad [\text{H/m}] \quad (\text{II.23})$$

Avec :

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

$RMG_x$  : est le rayon moyen géométrique d'un conducteur en faisceaux (Tableau II.2)

### II.3.4 Calcul de l'inductance d'une ligne triphasée double circuit [9]

La ligne triphasée à double circuit se constitue de 3 conducteurs pour chaque circuit.

Comme les conducteurs de cette ligne ne sont pas à disposition équilatérale, pour calculer l'inductance de la ligne, les conducteurs doivent être transposés (comme montré sur la Figure II.10 ).

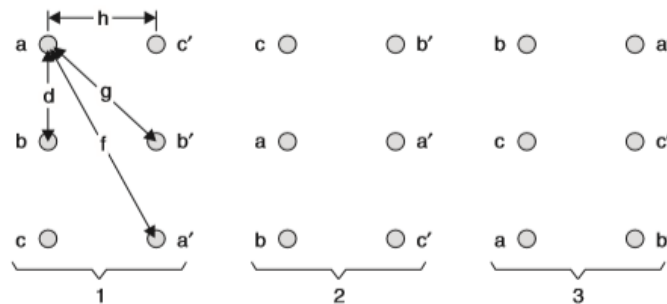


Figure II.10 : Arrangement des conducteurs d'une ligne triphasée à double circuit.

L'équivalent équilatéral d'une ligne est :

$$D_{\text{eq}} = \sqrt[3]{D_{ab} \cdot D_{bc} \cdot D_{ac}}$$

Avec :  $D_{ab}$  est la DMG entre les phases a et b dans la section 1 de la transposition :

$$D_{ab} = \sqrt[4]{(d \times g \times d \times g)} = \sqrt{d \times g}$$

$D_{bc}$  est la DMG entre les phases b et c dans la section 1 de la transposition :

$$D_{bc} = \sqrt{d \times g}$$

$D_{ac}$  est la DMG entre les phases a et c dans la section 1 de la transposition :

$$D_{ac} = \sqrt{2 \times d \times h}$$

$$D'_{\text{ou}} : D_{\text{eq}} = 2^{\frac{1}{6}} \times d^{\frac{1}{2}} \times g^{\frac{1}{3}} \times h^{\frac{1}{6}}$$

Le RMG de la phase a dans la section 1 :

$$D_{sa} = \sqrt[4]{(r' \times f \times r' \times f)} = \sqrt{r' \times f}$$

Les RMG pour les phases b et c dans la section 1 sont respectivement :

$$D_{sb} = \sqrt[4]{(r' \times h \times r' \times h)} = \sqrt{r' \times h} \quad ; \quad D_{sc} = \sqrt[4]{(r' \times f \times r' \times f)} = \sqrt{r' \times f}$$

$$\text{Le RMG}_{\text{eq}} \text{ est } D_s = \sqrt[3]{D_{sa} \times D_{sb} \times D_{sc}} = r'^{\frac{1}{2}} \times f^{\frac{1}{3}} \times h^{\frac{1}{6}}$$

L'inductance par phase est alors :

$$L = \frac{\mu_0}{2 \times \pi} \times \ln \frac{D_{\text{eq}}}{D_s} \quad (\text{II.24})$$

## II.4 Calcul de la capacité de la ligne [9]

### II.4.1 Calcul de la capacité d'une ligne monophasée

$$\text{On a par définition } C = \frac{q}{v}$$

Considérons un long conducteur rond du rayon  $r$  portant une charge  $q$  (C/m) (Figure II.11).

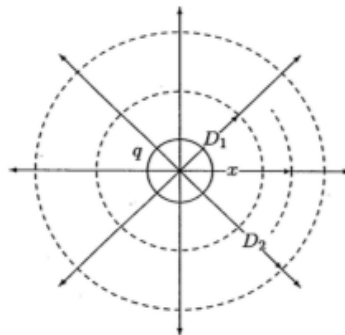


Figure II.11 : Champ électrique autour d'un fil conducteur long.

A partir du théorème de gauss, pour 1m de longueur, la densité de flux électrique  $D$  à un cylindre de rayon  $x$  est :

$$D = \frac{q}{s} = \frac{q}{2 \times \pi \times x} \rightarrow E = \frac{D}{\varepsilon_0} = \frac{q}{2 \times \pi \times \varepsilon_0 \times x}$$

Avec :  $E$  est l'intensité du champ électrique

$\varepsilon_0$  est la permittivité du vide

Par la suite, la différence du potentiel entre les cylindres de la position  $D1$  à  $D2$  est :

$$V_{12} = \int_{D1}^{D2} E \, dx = \int_{D1}^{D2} \frac{q}{2 \times \pi \times \varepsilon_0 \times x} \, dx = \frac{q}{2 \times \varepsilon_0 \times x} \times \ln \frac{D2}{D1}$$

Considérons une ligne monophasée de 1m de longueur constituée de deux conducteurs ronds chacun de rayon  $r$  (Fig. II.12) :

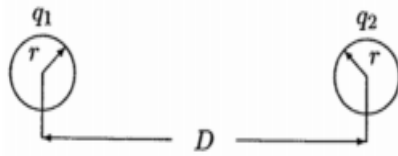


Figure II.12 : Ligne monophasée à deux fils.

Supposons que le conducteur 1 seul à avoir une charge  $q1$ , la tension entre les conducteurs 1 et 2 :

$$V_{12}(q1) = \frac{q1}{2 \times \pi \times \varepsilon_0} \times \ln \frac{D}{r} \quad [V]$$

Supposons à présent que le conducteur 2 seul à avoir une charge  $q2$ , la tension entre les conducteurs 1 et 2 est :

$$V_{21} = \frac{q2}{2 \times \pi \times \varepsilon_0} \times \ln \frac{D}{r} \quad [V]$$

Puisque  $V_{12}(q1) = -V_{21}(q2)$ , la d.d.p due aux deux charges est alors :

$$V_{12} = V_{12}(q1) + V_{12}(q2) = \frac{q1}{2 \times \pi \times \varepsilon_0} \times \ln \frac{D}{r} + \frac{q2}{2 \times \pi \times \varepsilon_0} \times \ln \frac{r}{D}$$

Pour une ligne monophasée  $q2 = -q1 = -q$  donc :

$$V_{12} = \frac{q}{\pi \times \varepsilon_0} \times \ln \frac{D}{r}, \text{ donc : } C_{12} = \frac{\pi \times \varepsilon_0}{\ln \frac{D}{r}} \quad [F/m] \quad (II.25)$$

Pour trouver la capacité entre chaque conducteur et le neutre, on a  $V_{1n} = \frac{1}{2} \times V_{12}$ , donc :

$$C = 2 \times C_{12} \rightarrow C = \frac{2 \times \pi \times \epsilon_0}{\ln \frac{D}{r}} \quad [\text{F/m}] \quad (\text{II.26})$$

## II.4.2 Calcul de la capacité des lignes triphasées

### II.4.2.1 Lignes triphasée à disposition équilatérale

La figure II.13 représente une ligne triphasée, de trois conducteurs identiques de rayon  $r$ , à disposition équilatérale.

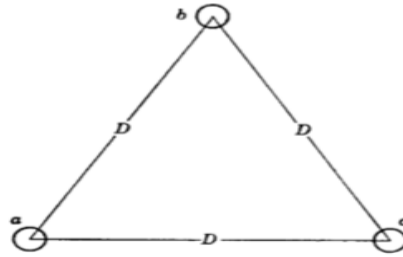


Figure II.13 : Ligne triphasée à disposition équilatérale.

Les expressions des tensions  $V_{ac}$  et  $V_{ab}$  sont données par :

$$V_{ab} = \frac{1}{2 \times \pi \times \epsilon_0} \times (q_a \times \ln \frac{D}{r} + q_b \times \ln \frac{r}{D} + q_c \times \ln \frac{D}{D})$$

$$V_{ac} = \frac{1}{2 \times \pi \times \epsilon_0} \times (q_a \times \ln \frac{D}{r} + q_b \times \ln \frac{D}{D} + q_c \times \ln \frac{r}{D})$$

En additionnant les deux équations, on aura :

$$V_{ab} + V_{ac} = \frac{1}{2 \times \pi \times \epsilon_0} \times [2 \times q_a \times \ln \frac{D}{r} + (q_b + q_c) \times \ln \frac{r}{D}] \quad [\text{V}]$$

Comme il n'y a pas de charges au voisinage, la somme des trois charges est nulle ( $q_a + q_b + q_c = 0$ ). Alors ( $q_b + q_c = -q_a$ ), substituée dans l'expression précédente on aura :

$$V_{ab} + V_{ac} = \frac{3 \times q_a}{2 \times \pi \times \epsilon_0} \times \ln \frac{D}{r} \quad [\text{V}]$$

Dans un système de tension triphasé équilibré, appliqué à une ligne, on a :

$$V_{ab} + V_{ac} = 3 \times V_{an} \quad [\text{V}]$$

$$3 \times V_{an} = \frac{3 \times q_a}{2 \times \pi \times \epsilon_0} \times \ln \frac{D}{r} \rightarrow V_{an} = \frac{q_a}{2 \times \pi \times \epsilon_0} \times \ln \frac{D}{r} \quad [\text{V}]$$

La capacité de la ligne avec le neutre est alors :

$$C_n = \frac{q_a}{V_{an}} = \frac{2 \times \pi \times \epsilon_0}{\ln \frac{D}{r}} \quad [\text{F/m}] \quad (\text{II.27})$$



### II.4.2.2 Lignes triphasée à disposition quelconque

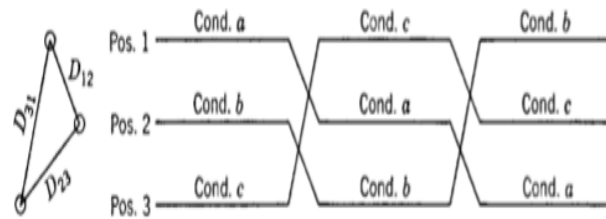


Figure II.14 : Ligne triphasée à disposition quelconque.

En suivant le même raisonnement qu'auparavant on aboutira au résultat suivant :

$$C_n = \frac{2 \times \pi \times \epsilon_0}{\ln \frac{D_{eq}}{r}} \quad [\text{F/m}] \quad \text{avec :} \quad D_{eq} = \sqrt[3]{D_{12} \times D_{23} \times D_{31}}$$

## II.5 La conductance des lignes triphasée aériennes

La conductance qui est due aux pertes diélectriques dans les isolateurs est souvent négligeable dans le calcul des aériennes [9].

## II.6 Calcul du paramètre mécanique de la ligne

### II.6.1 Calcul de la flèche

La détermination de la flèche et des tensions mécaniques, correspondantes aux différents conducteurs, sous différents types de conditions de température et de charges, est d'une importance primordiale dans le dimensionnement d'une électrique de transmission [19].

La flèche maximale est la distance verticale entre le point de l'attachement du conducteur et le conducteur dans son point le plus bas [20].

Les supports des conducteurs peuvent être au même niveau comme ils peuvent aussi être à différents niveaux.

### II.6.1.1 Supports au même niveau

La forme de la courbe que forme le conducteur est fonction du poids du conducteur par unité de longueur  $w$ , la tension horizontale  $H$ , la distance entre les deux supports  $S$ , et la flèche maximale  $D$  [21].

L'équation précise de la courbe représentant le conducteur est donnée par des fonctions hyperboliques. Relativement au point le plus bas de la courbe de la caténaire en figure II.15, la distance verticale,  $y(x)$ , en dessus de point le plus bas est donné par l'équation :

$$y(x) = \frac{H}{w} \times \cosh\left(\left(\frac{w}{H} \times x\right)\right)$$

La flèche maximale  $D$  et la distance entre deux supports  $S$  sont illustrées dans la figure II.15 Suivante :

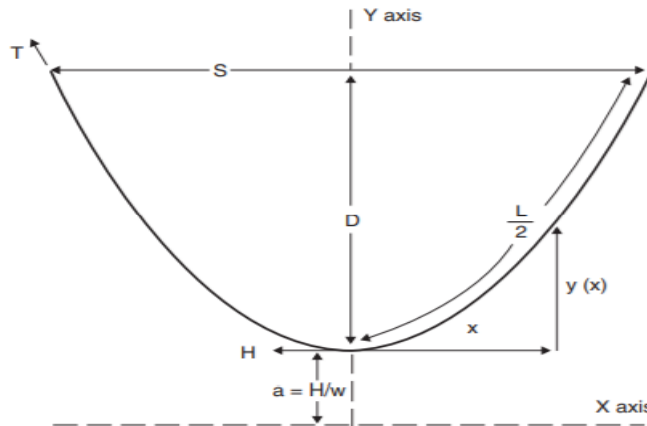


Figure II.15 : Supports au même niveau.

Pour les supports au même niveau, le point le plus bas est le centre (au milieu des deux supports), et la flèche maximale  $D$  est trouvée en substituant  $x$  par  $\frac{S}{2}$  dans l'équation précédente. L'expression exacte et approximative de l'équation parabolique de la flèche  $D$  est la suivante [21] :

$$D = \frac{H}{w} \left( \cosh\left(\frac{wS}{2H}\right) - 1 \right)$$

La fonction hyperbolique est souvent linéarisée autour de  $S=0$ , comme suit [20] :

$$D = D(0) + \frac{D'(0)}{1!} S - \frac{D''(0)}{2!} S^2 + \dots$$

$$D'(0) = \frac{\partial D}{\partial S} = \frac{1}{2} \sinh\left(\frac{wS}{2H}\right)$$

$$D''(0) = \frac{w}{4H} \cosh\left(\frac{wS}{2H}\right)$$

$$D = 0 + \frac{1}{2} (0) S + \frac{\frac{w}{4H}(1)}{2!} S^2 + \dots \cong \frac{wS^2}{8H}$$

$$D = \frac{wS^2}{8H} \quad [\text{m}] \quad (\text{II.28})$$

Avec :

$D$  : la flèche en [m].

$S$  : la portée horizontale en [m].

$w$  : le poids du conducteur par unité de longueur en [N/m].

$H$  : tension mécanique aux extrémités du conducteur en [N].

### II.6.1.2 Supports à différents niveaux

Les portées inclinées peuvent être analysées en utilisant, pratiquement, les mêmes équations utilisées pour les portées à niveau. Toutefois, la flèche se calcule en deux parties, chaque support a sa flèche qui lui correspond [21].

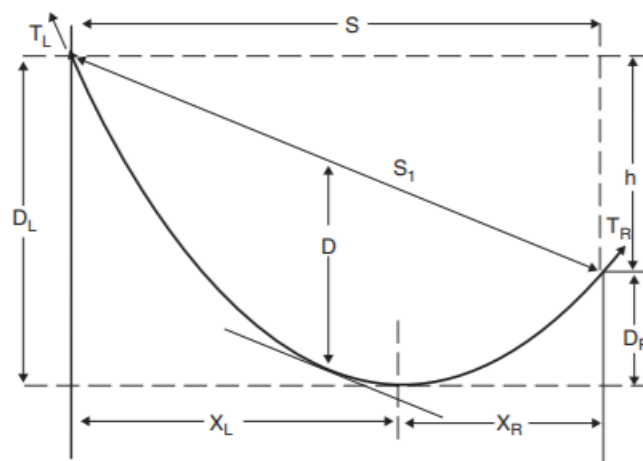


Figure II.16 : Supports à différents niveaux.

La distance horizontale,  $x_L$ , entre le support de gauche et le point le plus bas de la courbe est :

$$x_L = \frac{S}{2} \left(1 + \frac{h}{4D}\right)$$

La distance horizontale,  $x_R$ , entre le support de droite et le point le plus bas de la courbe est :

$$x_R = \frac{S}{2} \left(1 - \frac{h}{4D}\right)$$

Avec :

$S$  : la portée horizontale entre les sommets des supports en [m],

$h$  : la distance verticale entre les sommets des supports en [m],

$S_1$  : la distance directe entre les sommets des supports [m],

$D$  : flèche mesurée verticalement entre la portée  $S_1$  et la tangente au conducteur en [m].

La flèche par rapport au support de gauche est :

$$D_L = \frac{wx_L^2}{2H} \quad [\text{m}] \quad (\text{II.29})$$

La flèche par rapport au support de droite est :

$$D_R = \frac{wx_R^2}{2H} \quad [\text{m}] \quad (\text{II.30})$$

### II.6.1.3 Influence du vent et du givre

Quand le conducteur est couvert du givre et exposé au vent, le poids du conducteur par unité de longueur augmente. Aux moments de grande charge en givre ou en vent la flèche augmente considérablement, ainsi le conducteur et les supports peuvent être mis hors service [21].



Figure II.17 : Epaisseur du givre et impacte du vent sur le conducteur.

Le poids du givre par unité de longueur se calcule de la manière suivante :

$$w_i = D_i \times \frac{\pi}{4} [(d + 2t)^2 - d^2] \times 1$$

$$w_i = D_i \times \pi t (d+t) \quad [\text{N/m}] \quad (\text{II.31})$$

Avec :

$w_i$  : le poids du givre par unité de longueur en [N/m]

$D_i$  : la densité du givre

$d$  : diamètre du conducteur en [m]

$t$  : épaisseur du givre en [m]

La force du vent par unité de longueur se calcule de la manière suivante :

$$w_w = P_w \times [(d+2t) \times 1] \quad [\text{N/m}] \quad (\text{II.32})$$

Avec :

$w_w$  : la force du vent par unité de longueur en [N/m]

$p_w$  : la pression du vent en [Pa].

$d$  : diamètre du conducteur en [m]

$t$  : épaisseur du givre en [m]

Le poids total du conducteur par unité de longueur, sous la présence de la charge du givre et la force du vent se calcule par la formule suivante :

$$w_t = \sqrt{(w + w_i)^2 + w_w^2} \quad [\text{N/m}] \quad (\text{II.33})$$

Avec :

$w_t$  : le poids total du conducteur, en présence du givre et du vent, par unité de longueur en [N/m]

$w$  : le poids du conducteur par unité de longueur en [N/m]

$w_i$  : le poids du givre par unité de longueur en [N/m]

$w_w$  : la force du vent par unité de longueur en [N/m]

### **Conclusion**

On a vu dans ce chapitre les méthodes de calcul des paramètres, électriques et mécaniques, d'une ligne électrique aérienne.

Le calcul de ces paramètres s'avère indispensable pour bien dimensionner et concevoir la ligne électrique, à cause du besoin de ces 5 paramètres dans la majorité des calculs de la ligne électrique

# **Chapitre III :**

## **La tension et le courant à travers la ligne**

### III.1 Introduction

Les différents calculs d'une ligne électrique sont essentiellement fondés sur le calcul de sa tension et du courant qui y transite.

Nous allons voir dans ce chapitre les différentes méthodes de calcul de la tension et du courant à travers les différentes catégories de lignes, selon leurs longueurs, et voir aussi la différence entre ces méthodes et la possibilité de leur utilisation dans ces différentes catégories.

### III.2 Classification des lignes électriques

Les lignes électriques sont classifiées en 3 catégories selon leurs longueurs [18] :

- Les lignes courtes  $< 80$  km
- Les lignes moyennes  $80 \text{ km} < l < 160$  km
- Les lignes longues  $> 160$  km

Les systèmes triphasés équilibrés peuvent être analysés en les représentant par des schémas unifilaires monophasés dont l'impédance du fil neutre est nulle [18], ces schémas unifilaires sont des circuits quadripôles, deux pôles d'entrée et deux pôles de sortie, ces circuits peuvent être représentés par un modèle à constantes localisées (en T ou en  $\pi$ ), ou en modèle à constantes uniformément réparties (cas des lignes longues) [9].

### III.3 La relation entre les tensions et les courants dans un quadripôle [18]

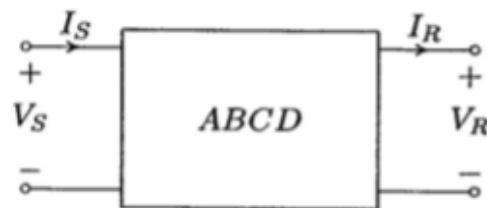


Figure III.1 : Représentation en quadripôle d'une ligne de transmission.

La relation entre les tensions et les courants à la source et à la charge sont données par :

$$V_s = AV_r + BI_r \quad (\text{III.1})$$

$$I_s = CV_r + DI_r \quad (\text{III.2})$$

ABCD sont des constants du réseau, on donne la



Signification de chaque constante :

$$A = \frac{V_s}{V_r} \mid I_r = 0$$

A est le rapport entre la tension coté source et la tension coté charge, quand le circuit est ouvert au coté charge, A est sans dimension.

$$B = \frac{V_s}{I_r} \mid V_r = 0$$

B est le rapport entre la tension coté source et le courant coté charge, quand le circuit est court-circuité au coté charge, c'est ce qu'on appelle l'impédance de transfert.

$$C = \frac{I_s}{V_r} \mid I_r = 0$$

C est le rapport entre le courant coté source et la tension coté charge, quand le circuit est ouvert au coté charge, C a la dimension d'une admittance.

$$D = \frac{I_s}{I_r} \mid V_r = 0$$

D est le rapport du courant coté source et le courant coté charge, quand le circuit est court-circuité au coté charge, D est sans dimension.

Ces quatre constantes sont reliées par la relation suivante :

$$A.D - B.C = 1$$

### III.4 Modèles des différents types de lignes

#### III.4.1 Les lignes courtes

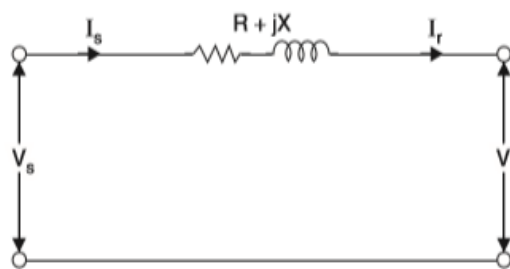


Figure III.2 : Modèle d'une ligne courte.

La capacité des lignes courtes peut souvent être négligée sans nuire à la précision du calcul des performances de la ligne [9].

On a du modèle de la ligne courte les équations suivantes :

$$V_s = V_r + I_r \cdot Z \quad (\text{III.3})$$

$$I_s = I_r \quad (\text{III.4})$$

Par identification des équations (III.3) et (III.4) et les équations (III.1) et (III.2), on trouve :

$$A = 1$$

$$B = Z$$

$$C = 0$$

$$D = A = 1$$

### III.4.2 Les lignes moyennes

Les expressions de la tension et du courant dans les lignes moyennes peuvent être trouvées en utilisant des modèles à constantes localisées (en T ou en  $\pi$ ), suite à la petitesse de la variation de la tension et du courant à travers ce type de ligne [9].

#### III.4.2.1 Modèle en T

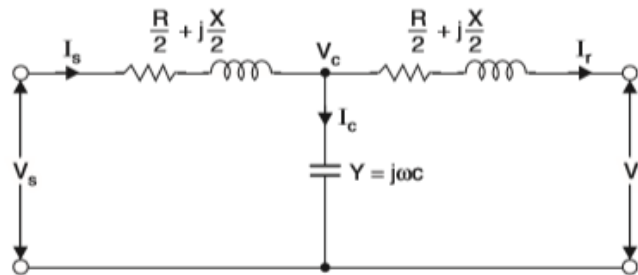


Figure III.3 : Modèle en T d'une ligne moyenne.

Les équations de la tension et du courant à travers la ligne du modèle en T sont donnés par les expressions suivantes :

$$V_c = V_r + I_r \cdot \frac{Z}{2}$$

$$I_c = V_c \cdot Y$$

D'après la loi des nœuds, on a :

$$I_s = I_r + I_c = I_r + V_c \cdot Y$$

$$I_s = I_r + (V_r + I_r \cdot \frac{Z}{2}) \cdot Y$$

$$I_s = I_r (1 + \frac{YZ}{2}) + V_r \cdot Y$$

$$I_s = Y \cdot V_r + (1 + \frac{YZ}{2}) \cdot I_r$$

D'après la loi des mailles, on a :

$$V_s = V_c + I_s \cdot \frac{Z}{2} = V_r + I_r \cdot \frac{Z}{2} + \{ I_r + (V_r + I_r \cdot \frac{Z}{2}) \cdot Y \} \cdot \frac{Z}{2}$$

$$V_s = V_r (1 + \frac{YZ}{2}) + I_r (\frac{Z}{2} + \frac{Z}{2} + \frac{YZ^2}{4})$$

$$V_s = (1 + \frac{YZ}{2}) V_r + Z (1 + \frac{YZ}{4}) \cdot I_r$$

$$V_s = (1 + \frac{YZ}{2}) V_r + Z (1 + \frac{YZ}{4}) \cdot I_r \quad (III.5)$$

$$I_s = Y \cdot V_r + (1 + \frac{YZ}{2}) \cdot I_r \quad (III.6)$$

Par identification des équations (III.5) et (III.6) avec les équations (III.1) et (III.2), nous obtenons les valeurs des constantes du réseau :

$$A = 1 + \frac{YZ}{2}$$

$$B = Z (1 + \frac{YZ}{4})$$

$$C = Y$$

$$D = A = (1 + \frac{YZ}{2})$$

#### III.4.2.2 Modèle en $\pi$

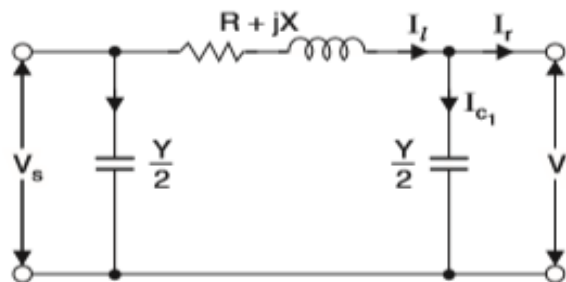


Figure III.4 : Modèle en  $\pi$  d'une ligne moyenne.

En appliquant la loi des mailles et la loi des nœuds sur le modèle en  $\pi$ , on aura les expressions suivantes :

$$I_{c1} = V_r \cdot \frac{Y}{2}$$

$$I_l = I_r + I_{c1} = I_r + V_r \cdot \frac{Y}{2}$$

$$V_s = V_r + I_l \cdot Z = V_r + (I_r + V_r \cdot \frac{Y}{2}) \cdot Z$$

$$V_s = (1 + \frac{YZ}{2}) \cdot V_r + Z \cdot I_r$$

$$I_s = I_l + I_{c2} = I_l + V_s \cdot \frac{Y}{2}$$

$$I_s = I_r + V_r \cdot \frac{Y}{2} + \{(1 + \frac{YZ}{2}) \cdot V_r + Z \cdot I_r\} \cdot \frac{Y}{2}$$

$$I_s = V_r (Y + \frac{Y^2 Z}{4}) + (1 + \frac{YZ}{2}) I_r$$

$$V_s = (1 + \frac{YZ}{2}) \cdot V_r + Z \cdot I_r \quad (\text{III.7})$$

$$I_s = V_r (Y + \frac{Y^2 Z}{4}) + (1 + \frac{YZ}{2}) I_r \quad (\text{III.8})$$

Par identification entre les équations (III.7) et (III.8) et les équations (III.1) et (III.2), on trouve les valeurs des constantes du réseau :

$$A = 1 + \frac{YZ}{2}$$

$$B = Z$$

$$C = Y + \frac{Y^2 Z}{4}$$

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

### III.4.3 Les lignes longues

En ce qui concerne les lignes longues, on doit utiliser le modèle à constantes uniformément réparties le long de la ligne [9], suite à la grande variation de la tension et du courant à travers elle, des calculs rigoureux sont requis comme on va voir par la suite.

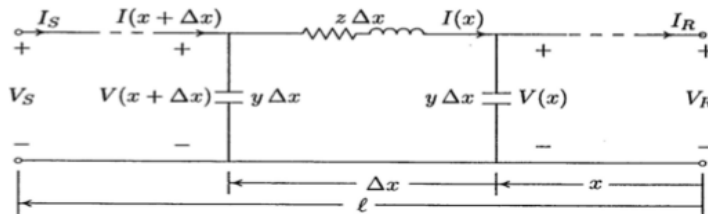


Figure III.5 : Ligne longue à constantes réparties.

Posons :

$z$  : Impédance série par unité de longueur

$y$  : admittance shunt par unité de longueur

$l$  : longueur de la ligne

$Z = z.l$  : Impédance série totale

$Y = y.l$  : admittance shunt totale

Prenons un élément de longueur  $\Delta x$  de la ligne à une distance  $x$  de l'extrémité coté charge. disons que la tension et le courant à une distance  $x$  sont  $V$  et  $I$ , et à une distance  $x+\Delta x$  sont respectivement  $V+\Delta V$  et  $I+\Delta I$ .

$$\left. \begin{array}{l} \Delta V = I. z. \Delta x \\ \Delta I = V. y. \Delta x \end{array} \right\} \quad (\text{III.9})$$

On déduit de l'équation (III.9), l'équation suivante :

$$\left. \begin{array}{l} \frac{\Delta V}{\Delta x} = I. z \\ \frac{\Delta I}{\Delta x} = V. y \end{array} \right\} \quad (\text{III.10})$$

Quand  $\Delta x$  tend vers 0 l'équation (III.10) se réduit à :

$$\left. \begin{array}{l} \frac{dV}{dx} = I. z \\ \frac{dI}{dx} = V. y \end{array} \right\} \quad (\text{III.11})$$

En dérivant l'équation (III.11) par rapport à  $x$  nous obtenons :

$$\frac{d^2 V}{dx^2} = z. \frac{dI}{dx} = z. V. y \quad \rightarrow \quad \frac{d^2 V}{dx^2} - z. V. y = 0$$

La solution de cette équation est :

$$V = A. e^{(\sqrt{yz}.x)} + B. e^{(-\sqrt{yz}.x)}$$

Avec :  $\gamma = \sqrt{yz}$

$$\frac{dV}{dx} = A \cdot \sqrt{yz} \cdot e^{(\sqrt{yz} \cdot x)} - B \cdot \sqrt{yz} \cdot e^{(-\sqrt{yz} \cdot x)}$$

$$\frac{dV}{dx} = A \cdot \gamma \cdot e^{(\gamma \cdot x)} - B \cdot \gamma \cdot e^{(-\gamma \cdot x)} = I \cdot Z$$

$$A \cdot e^{\gamma x} - B \cdot e^{(-\gamma \cdot x)} = \frac{I \cdot Z}{\gamma} \quad \Rightarrow \quad \frac{A}{Z_c} \cdot e^{\gamma x} - \frac{B}{Z_c} \cdot e^{(-\gamma \cdot x)} = I_x \quad \text{avec : } Z_c = \sqrt{\frac{z}{y}}$$

$$V_x = A \cdot e^{\gamma x} - B \cdot e^{(-\gamma \cdot x)} \quad (\text{III.12})$$

$$I_x = \frac{A}{Z_c} \cdot e^{\gamma x} - \frac{B}{Z_c} \cdot e^{(-\gamma \cdot x)} \quad (\text{III.13})$$

Les constantes A et B sont déterminées à partir de la condition suivante :  
lorsque  $x=0$ ,  $V_x=V_r$  et  $I_x=I_r$ .

Les équations (III.12) et (III.13) donnent :

$$V_r = A + B$$

$$I_r = \frac{1}{Z_c} \cdot (A - B)$$

$$\text{Donc : } A = \frac{1}{2} (V_r + Z_c \cdot I_r)$$

$$B = \frac{1}{2} (V_r - Z_c \cdot I_r)$$

En remplaçant A et B par leurs valeurs dans les équations (III.12) et (III.13), nous obtenons :

$$V_x = \left( \frac{V_r + Z_c \cdot I_r}{2} \right) \cdot e^{\gamma x} + \left( \frac{V_r - Z_c \cdot I_r}{2} \right) \cdot e^{-\gamma x} \quad (\text{III.14})$$

$$I_x = \left( \frac{\frac{V_r}{Z_c} + I_r}{2} \right) \cdot e^{\gamma x} - \left( \frac{\frac{V_r}{Z_c} - I_r}{2} \right) \cdot e^{-\gamma x} \quad (\text{III.15})$$

On arrange les équations (14) et (15) pour introduire les fonctions hyperboliques dans les expressions de la tension et du courant :

$$V_x = V_r \cdot \left( \frac{e^{\gamma x} + e^{-\gamma x}}{2} \right) + I_r \cdot Z_c \cdot \left( \frac{e^{\gamma x} - e^{-\gamma x}}{2} \right)$$

$$I_x = V_r \cdot \frac{1}{Z_c} \cdot \left( \frac{e^{\gamma x} - e^{-\gamma x}}{2} \right) + I_r \cdot \left( \frac{e^{\gamma x} + e^{-\gamma x}}{2} \right)$$

$$V_x = V_r \cosh(\gamma x) + I_r \cdot Z_c \sinh(\gamma x)$$

$$I_x = I_r \cosh(\gamma x) + V_r \cdot \frac{1}{Z_c} \sinh(\gamma x)$$

Lorsque  $x=l$ ,  $V_x=V_s$ ,  $I_x=I_s$  :

$$V_s = V_r \cosh(\gamma l) + I_r Z_c \sinh(\gamma l) \quad (\text{III.16})$$

$$I_s = I_r \cosh(\gamma l) + V_r \cdot \frac{1}{Z_c} \sinh(\gamma l) \quad (\text{III.17})$$

Par identification des équations (III.16) et (III.17) avec les équations (III.1) et (III.2), on aura les valeurs des constantes du réseau A,B,C et D :

$$A = \cosh(\gamma x)$$

$$B = Z_c \sinh(\gamma x)$$

$$C = \frac{1}{Z_c} \sinh(\gamma x)$$

$$D = \cosh(\gamma x)$$

On a :

$$\cosh(\gamma x) = 1 + \frac{\gamma^2 l^2}{2!} + \frac{\gamma^4 l^4}{4!} + \frac{\gamma^6 l^6}{6!}$$

$$\sinh(\gamma x) = \gamma x + \frac{\gamma^3 l^3}{3} + \frac{\gamma^5 l^5}{5} + \frac{\gamma^7 l^7}{7!}$$

Généralement, c'est les trois premiers termes qui sont requis, et pour les lignes aériennes inférieures à 500 km de longueur, les expressions des constantes A,B,C et D sont approximativement [22] :

$$A = D = 1 + \frac{ZY}{2}$$

$$B = Z \cdot (1 + \frac{ZY}{6})$$

$$C = Y \cdot (1 + \frac{ZY}{6})$$

### III.4.3.1 Représentation des circuits équivalents d'une ligne longue

#### III.4.3.1.1 Représentation du circuit en $\pi$ équivalent

Supposons que les deux conditions terminales (tensions et courants à la source et à la charge) peuvent être représentés par le circuit suivant :

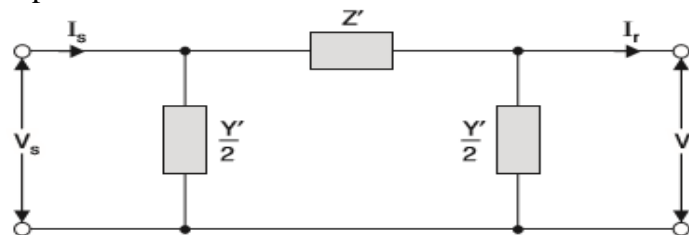


Figure III.6 : Modèle en  $\pi$  d'une ligne longue.

On a du schéma (Figure III.6 ) les relations suivantes :

$$V_s = (1 + \frac{Z'Y'}{2})V_r + Z'I_r$$

$$I_s = Y'(1 + \frac{Z'Y'}{4})V_r + (1 + \frac{Z'Y'}{2})I_r$$

Par identification de ces équations avec les équations (III.16) et (III.17), on aura :

$$1 + \frac{Z'Y'}{2} = \cosh \gamma l \quad (III.18)$$

$$Z' = Z_c \sinh \gamma l \quad (III.19)$$

$$Y'(1 + \frac{Z'Y'}{4}) = \frac{\sinh \gamma l}{Z_c} \quad (III.20)$$

$$1 + \frac{Z'Y'}{2} = \cosh \gamma l \quad (III.21)$$

Prenons l'équation (III.19) :

$$\begin{aligned} Z' &= Z_c \sinh \gamma l \\ &= \sqrt{\frac{Z}{y}} \cdot 1 \cdot \frac{\sinh \gamma l}{\sqrt{y} \cdot l} \cdot \sqrt{Y} \\ &= \sqrt{\frac{Z}{y}} \cdot 1 \cdot \frac{\sinh \gamma l}{\sqrt{zy} \cdot l} \cdot \sqrt{zy} \\ &= z \cdot l \cdot \frac{\sinh \gamma l}{\gamma l} = Z \cdot \frac{\sinh \gamma l}{\gamma l} \\ Z' &= Z \cdot \frac{\sinh \gamma l}{\gamma l} \end{aligned}$$

Pour déterminer les valeurs des éléments shunt pour le circuit en  $\pi$  équivalent, on substitue  $Z'$  dans l'équation (III.18) :

$$1 + \frac{Z'Y'}{2} = \cosh \gamma l$$

$$1 + \frac{Y'}{2} \cdot Z_c \sinh \gamma l = \cosh \gamma l$$

$$\frac{Y'}{2} \cdot Z_c \sinh \gamma l = \cosh \gamma l - 1$$

$$\frac{Y'}{2} \cdot Z_c \sinh \gamma l = 2 \sinh^2(\frac{\gamma l}{2})$$

$$Y' \cdot Z_c \cdot \sinh(\frac{\gamma l}{2}) \cdot \cosh(\frac{\gamma l}{2}) = 2 \sinh^2(\frac{\gamma l}{2})$$

$$\frac{Y'}{2} = \frac{1}{Z_c} \cdot \tanh(\frac{\gamma l}{2}) = \sqrt{\frac{y}{z}} \cdot \frac{\sqrt{yz}l}{2} \cdot \frac{\tanh(\frac{\gamma l}{2})}{\frac{\sqrt{yz}l}{2}}$$



$$\frac{Y'}{2} = \frac{Y}{2} \cdot \frac{\tanh(\frac{\gamma l}{2})}{\frac{\gamma l}{2}}$$

Alors le schéma en  $\pi$  équivalent est le suivant :

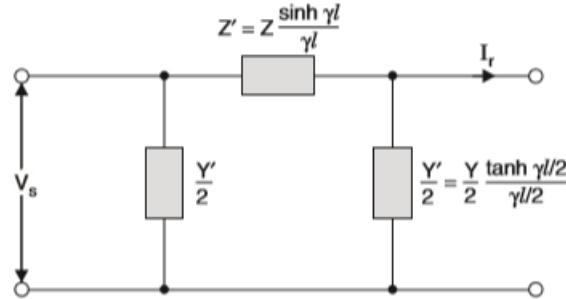


Figure III.7 : Schéma équivalent en  $\pi$  d'une ligne longue.

#### III.4.3.1.2 Représentation du circuit en T équivalent

Pour déterminer le circuit en T équivalent, on considère le schéma suivant :

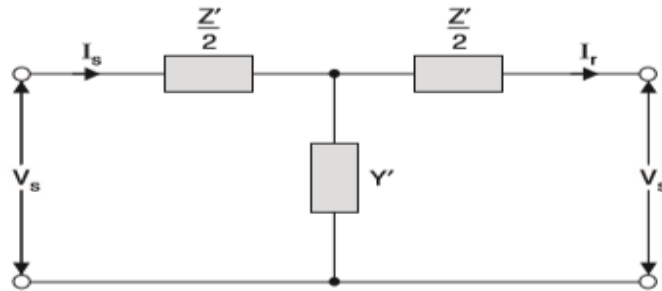


Figure III.8 : Modèle en T d'une ligne longue.

du schéma (Figure III.8 ), on peut tirer les relations

suivantes (en se référant aux équations (III.5) et (III.6)) :

$$V_s = \left(1 + \frac{Y'Z'}{2}\right) V_r + Z' \left(1 + \frac{Y'Z'}{4}\right) \cdot I_r$$

$$I_s = Y' \cdot V_r + \left(1 + \frac{Y'Z'}{2}\right) \cdot I_r$$

Par identification avec les équations de ces équations avec les équations (III.16) et (III.17), on aura :

$$1 + \frac{Y'Z'}{2} = \cosh \gamma l \quad (\text{III.22})$$

$$Z' \left(1 + \frac{Y'Z'}{4}\right) = Z_c \sinh \gamma l \quad (\text{III.23})$$

$$Y' = \frac{\sinh \gamma l}{Z_c} \quad (\text{III.24})$$

$$\left(1 + \frac{Y' Z'}{2}\right) = \cosh \gamma l \quad (\text{III.25})$$

Pour déterminer l'admittance shunt  $T'$  du circuit en T équivalent, prenons l'équation (III.24) et développons la :

$$\begin{aligned} Y' &= \frac{\sinh \gamma l}{Z_c} = \sqrt{\frac{y}{z}} \cdot l \cdot \frac{\sinh \gamma l}{\sqrt{y z} l} \\ &= y \cdot l \cdot \frac{\sinh \gamma l}{\gamma l} \\ Y' &= Y \cdot \frac{\sinh \gamma l}{\gamma l} \end{aligned}$$

Et pour obtenir l'impédance série  $Z'$  du circuit en T équivalent, on substitue  $Y'$  par sa valeur dans l'équation (III.22), on aura :

$$\begin{aligned} 1 + \frac{Z'}{2} \cdot \frac{\sinh \gamma l}{Z_c} &= \cosh \gamma l \\ \frac{Z'}{2} \cdot 2 \cdot \frac{\sinh \frac{\gamma l}{2} \cdot \cosh \frac{\gamma l}{2}}{Z_c} &= \cosh^2 \frac{\gamma l}{2} + \sinh^2 \frac{\gamma l}{2} - \cosh^2 \frac{\gamma l}{2} + \sinh^2 \frac{\gamma l}{2} \\ \frac{Z'}{2} \cdot 2 \cdot \frac{\sinh \frac{\gamma l}{2} \cdot \cosh \frac{\gamma l}{2}}{Z_c} &= 2 \cdot \sinh^2 \frac{\gamma l}{2} \\ \frac{Z'}{2} = Z_c \cdot \tanh \frac{\gamma l}{2} &= \sqrt{\frac{z}{y}} \cdot \frac{\sqrt{z y} l}{2} \cdot \frac{\tanh \frac{\gamma l}{2}}{\frac{\sqrt{z y} l}{2}} \\ \frac{Z'}{2} = \frac{Z}{2} \cdot \frac{\tanh \frac{\gamma l}{2}}{\frac{\gamma l}{2}} \end{aligned}$$

Alors le schéma en T équivalent est le suivant :

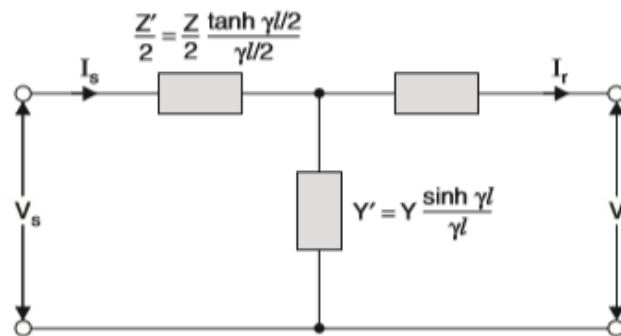


Figure III.9 : Schéma équivalent en T d'une ligne longue.

**Conclusion**

Dans ce chapitre on a pu voir comment calculer la tension et le courant à travers différentes catégories de lignes électriques en détails.

On peut conclure que ces calculs ne se font pas de la même manière sur toutes les catégories des lignes, mais ils se diffèrent, selon la catégorie, entre un calcul approximatif et un calcul rigoureux.

## **Chapitre IV :**

### **Description du programme et applications**

## IV.1 Introduction

Le calcul des paramètres électriques et mécaniques des lignes électriques, aériennes, en utilisant des logiciels est une étape très importante pour l'analyse des réseaux électriques.

Le programme réalisé dans ce travail permet de calculer les différents paramètres, électriques et mécaniques, pour différents types de lignes, pour des conducteurs à différentes dispositions. L'objectif visé d'ailleurs n'est plus la comparaison entre les résultats obtenus pour les différents types de lignes, mais plutôt d'offrir un maximum de choix pour l'utilisateur.

Notre travail, dans ce chapitre, se fera en deux étapes. Dans la première étape on présentera le fonctionnement du programme et la deuxième étape on fera des exemples d'application en utilisant ce programme.

## IV.2 Description du fonctionnement du Programme

### IV.2.1 Calcul des paramètres électriques

Les différents choix offerts par ce programme pour le calcul des paramètres électriques sont résumés dans le tableau IV.1 suivant :

Type du circuit	Simple circuit						Double circuit		
Type des conducteurs	pleins		toronnés		En faisceaux		Pleins	toronnés	en faisceaux
Disposition des conducteurs	Equilibrée	Quelconque	Equilibrée	Quelconque	Equilibrée	Quelconque	Quelconque	Quelconque	Quelconque

**Tableau IV.1 :** Les différents choix offerts par le programme de calcul des paramètres électriques.

Dans le but de calculer ces paramètres électriques d'une ligne électrique triphasée par ce programme Matlab, on procède par les calculs préliminaires suivants :

Le calcul de la résistance de la ligne à courant continu à une température de 20°C par la formule suivante :

$$R_{dc} = \frac{\rho(T) \times l}{S} \quad [\Omega] \quad (IV.1)$$

Le calcul de la résistance en courant alternatif, en prenant considération du taux d'augmentation

de la résistance par effet de peau par la formule suivante :

$$R_{ac} = k \times R_{dc} \quad (IV.2)$$

Avec k est le coefficient de Kelvin, on l'a calculé par la formule suivante :

$$k = \sqrt[6]{\left(\frac{3}{4}\right)^6 + \left(\frac{S}{p\delta}\right)^6} + 0.25 \quad (IV.3)$$

L'effet du spiralage d'un conducteur fait augmenter la résistance de 1% environ pour les conducteurs à 3 brins et de 2% environ pour les conducteurs de brins supérieure [11]. Pour prendre en compte l'effet du spiralage on a utilisé les formules suivantes :

$R = R_{ac} \times (1 + 1\%)$  pour les conducteurs à 3 brins.

$R = R_{ac} \times (1 + 2\%)$  pour les conducteurs au nombre brins supérieure à 3.

Le calcul des RMG des différents types des conducteurs est représenté dans le tableau Tableau IV.2 suivant:

Type du conducteur	pleins	toronnés	En faisceaux		
			à 2 cordes	à 3 cordes	à 4 cordes
Expression du RMG	$r \times e^{-\frac{1}{4}}$	$C_{st} \times \sqrt{S}$	$\sqrt{rmg \cdot d}$	$\sqrt[3]{rmg \cdot d^2}$	$1.09 \cdot \sqrt[4]{rmg \cdot d^3}$

**Tableau IV.2** : RMG des différents types des conducteurs

Avec :  $C_{st}$  est une constante, dépendant du nombre de brins, elle est donnée par le constructeur (voir Tableau II.1).

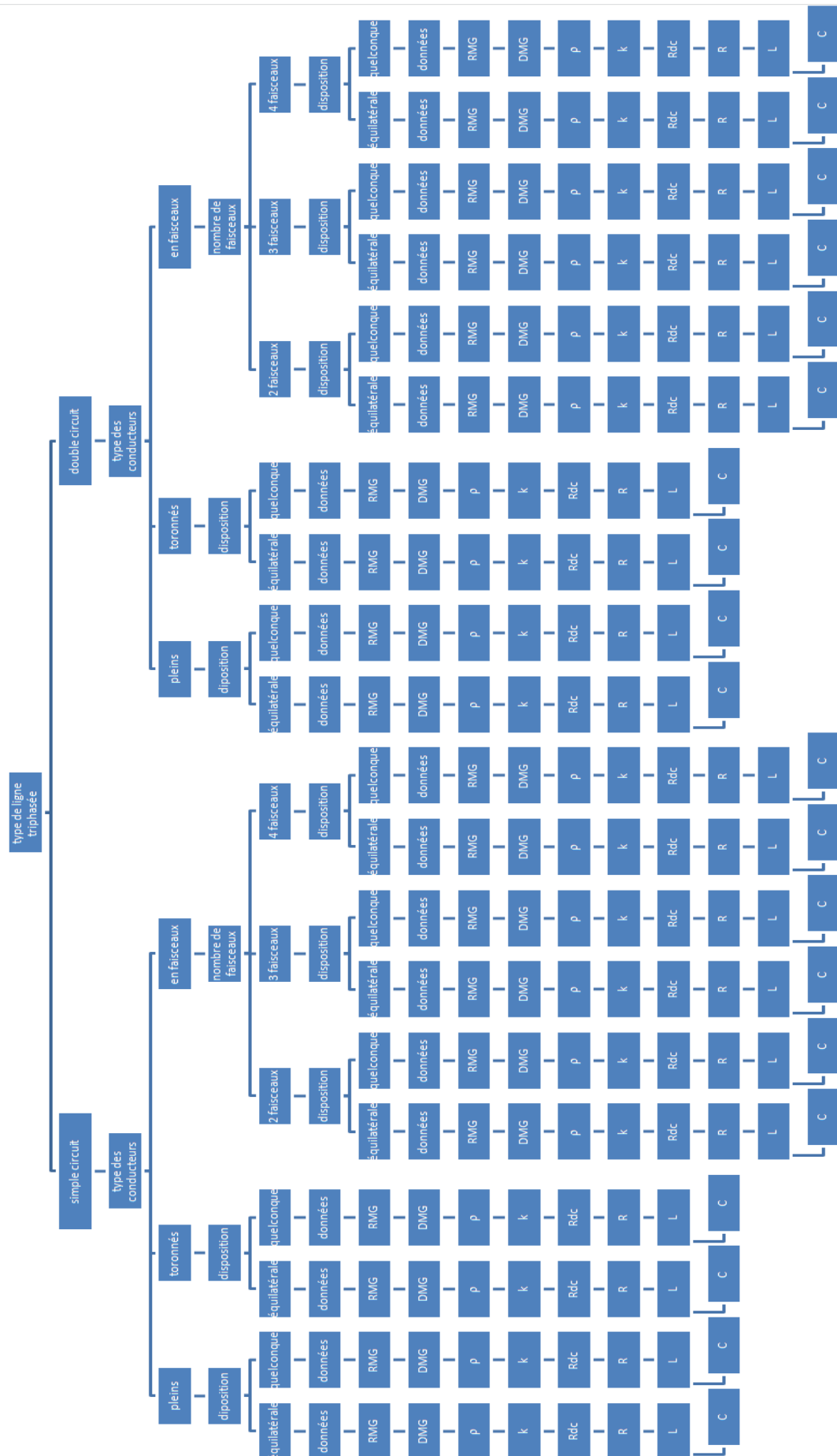


Figure IV.1 : Organigramme de calcul des paramètres électriques de la ligne.

### IV.2.2 Calcul de la flèche

Les différents choix offerts par ce programme pour le calcul de la flèche sont résumés dans le tableau Tableau IV.3 suivant :

Support au même niveau		Support à différents niveaux	
En absence du vent et du givre	En présence du givre	En absence du vent et du givre	En présence du givre

**Tableau IV.3 :** Les différents choix offerts par le programme de calcul du paramètre mécanique.

Les formules de calcul de ce paramètre (la flèche) sous différentes conditions sont données dans le chapitre II (pages 38, 39, 40, 41).

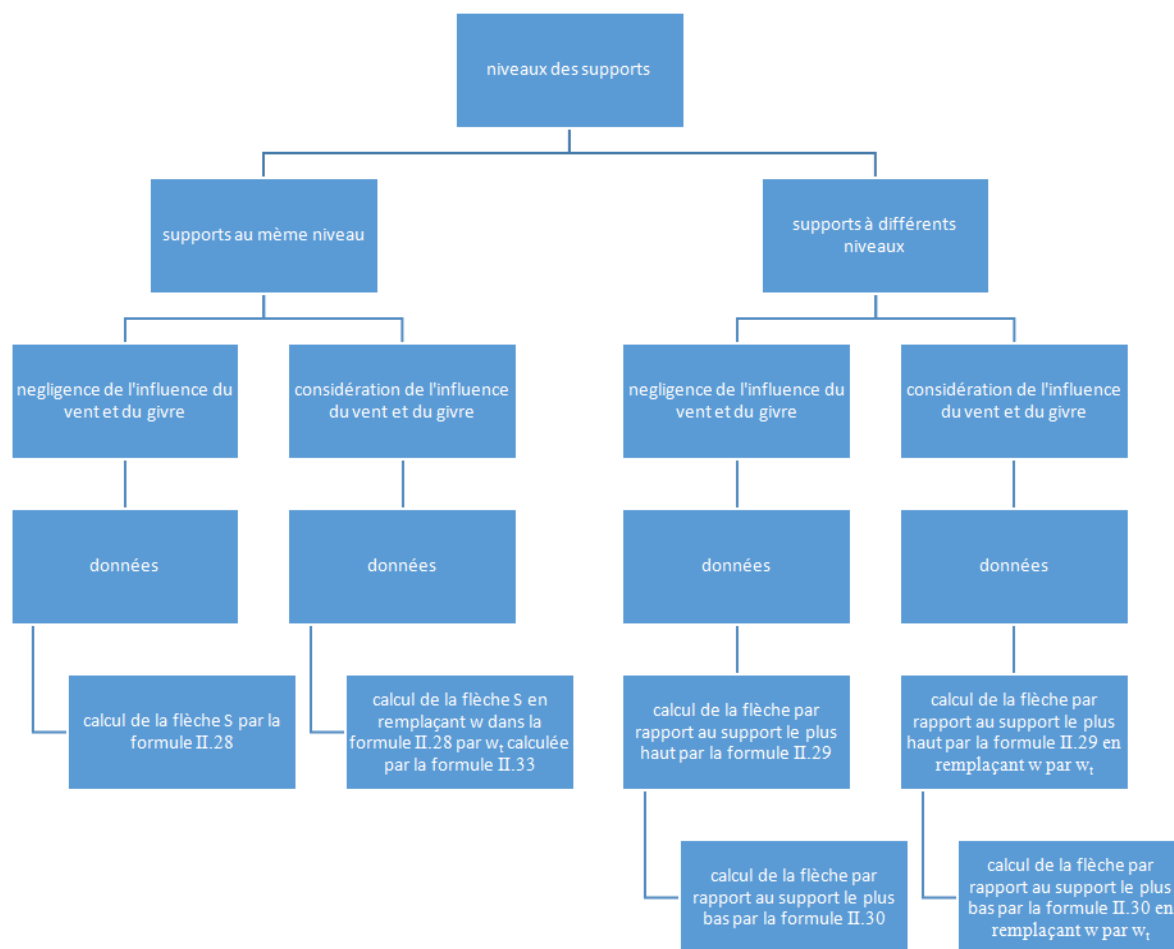


Figure IV.2 : Organigramme de calcul de la flèche.

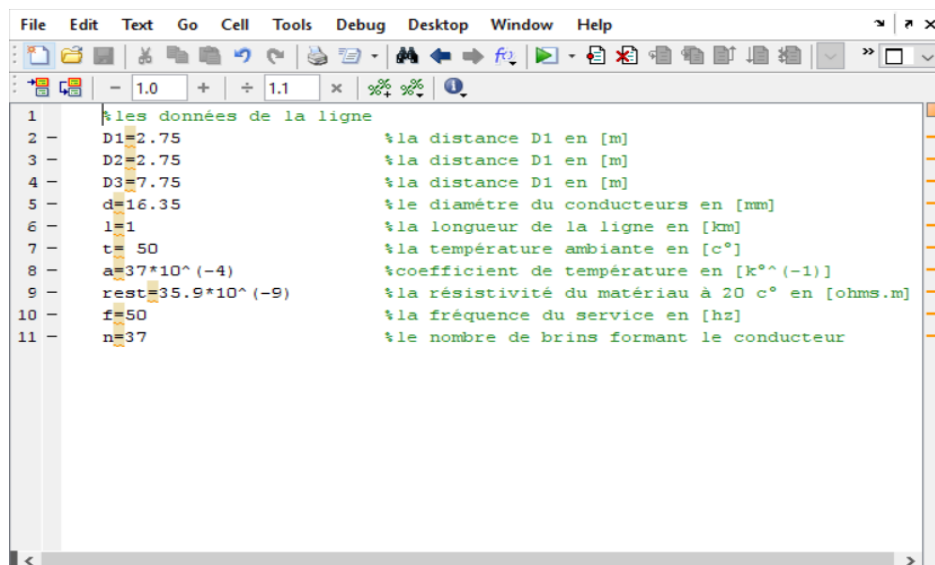


### IV.3 Exemples d'applications

#### IV.3.1 Calcul des paramètres électriques

##### IV.3.1.1 Ligne triphasée aux conducteurs toronnés à disposition quelconque

Pour le calcul des paramètres linéiques, Résistance, Inductance et Capacité, de cette ligne électrique triphasée, on utilise les données suivantes [23]:



```

1 %les données de la ligne
2 D1=2.75 %la distance D1 en [m]
3 D2=2.75 %la distance D1 en [m]
4 D3=7.75 %la distance D1 en [m]
5 d=16.35 %le diamètre du conducteurs en [mm]
6 l=1 %la longueur de la ligne en [km]
7 t=50 %la température ambiante en [c°]
8 a=37*10^(-4) %coefficient de température en [k°^(-1)]
9 rest=35.9*10^(-9) %la résistivité du matériau à 20 c° en [ohms.m]
10 f=50 %la fréquence du service en [hz]
11 n=37 %le nombre de brins formant le conducteur
  
```

Figure IV.1 : Données de la ligne triphasée aux conducteurs toronnés.

Nos résultats de calculs, par phase, sont présentés dans le tableau suivant :

R ( $\Omega/\text{km}$ )		L (H/km)	C (F/km)
La résistance en continu à $t=50\text{ c}^\circ$	0.1900	$13 \times 10^{-4}$	$9.0216 \times 10^{-9}$
Le facteur de kelvin k	1.0008		
L'effet du spirilage	0.02		
La résistance en alternatif	0.1940		

**Tableau IV.4:** Nos résultats de calcul des paramètres d'une ligne aux conducteurs toronnés.

R ( $\Omega/\text{km}$ )		L (H/km)	C (F/km)
La résistance en continu à $t=20\text{ }^{\circ}\text{C}$	0.1710	0.0013	$8.8433 \times 10^{-9}$
Effet du spiralage	0.1744		
Effet de température	0.1955		
Facteur de Kelvin	0.2711		
Résistance en alternatif	0.1744		

**Tableau IV.5 :** Résultats obtenus en littérature [23].

### Comparaison des résultats :

On constate que les résultats obtenus pour l'inductance et la capacité sont très proches. Quant à la résistance on remarque une différence due à la différence de la température ambiante utilisée dans les deux cas, ainsi que la méthode suivie pour son calcul :

Nous avons pris en charge, en premier lieu, l'influence du facteur du kelvin ensuite rajouté la hausse due à l'effet du spiralage, tandis qu'en littérature on a calculé l'influence de chaque paramètre tout seul.

Nous pouvons conclure que notre méthode, pour le calcul de la résistance, est plus précise que celle suivie en littérature, grâce à la prise en charge simultanée de tous les paramètres influençant la résistance.

#### IV.3.1.2 Ligne triphasée aux conducteurs en faisceaux à 3 sous conducteurs

Pour le calcul des paramètres linéiques, Résistance, Inductance et Capacité, de cette ligne électrique triphasée, on utilise les données suivantes [23]:

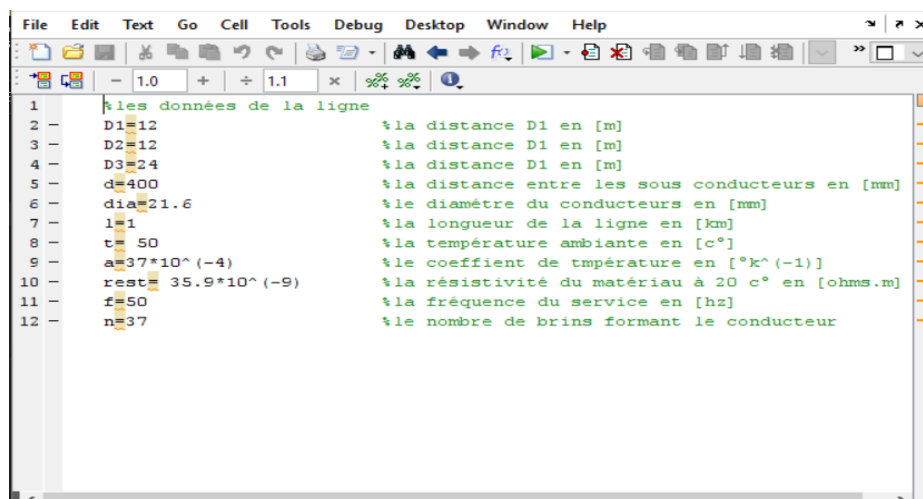


Figure IV.2 : Données d'une ligne triphasée aux conducteurs en faisceaux à 3 sous conducteurs.

Les résultats de calcul, par phase, sont présentés dans le tableau suivant :

R ( $\Omega/\text{km}$ )		L (H/km)	C (F/km)
La résistance en continu à $t=30\text{ }^{\circ}\text{C}$	0.3123	$15 \times 10^{-4}$	$7.6691 \times 10^{-9}$
Le facteur de kelvin k	1.0041		
L'effet du spiralage	0.02		
La résistance en alternatif	0.3344		

**Tableau IV.6:** Résultats de calcul, par phase, des paramètres d'une ligne aux conducteurs en faisceaux à 3 sous conducteurs.

R ( $\Omega/\text{km}$ )		L (H/km)	C (F/km)
La résistance en continu à $t=20\text{ }^{\circ}\text{C}$	0.0981	$9.3937 \times 10^{-4}$	$11.8339 \times 10^{-12}$
Effet du spiralage	0.10		
Effet de température	0.1122		
Facteur de Kelvin	0.3579		
Résistance en alternatif	0.10		

**Tableau IV.7:** Résultats en littérature, par conducteur, des paramètres d'une ligne aux conducteurs en faisceaux à 3 sous conducteurs [23].

### Comparaison des résultats :

On remarque que les résultats obtenus pour la résistance et l'inductance sont très proches, rappelons que la résistance, que nous avons trouvé, par conducteur est ( $0.3123/3=0.1041\text{ }\Omega/\text{km}$ ).

Quant à la capacité, on constate une énorme différence qui est probablement due à une erreur de conversion des unités en littérature.

## IV.3.1.3 Ligne triphasée aux conducteurs en faisceaux à 2 sous conducteurs

## Exemple 1

Pour le calcul des paramètres linéiques, Résistance, Inductance et Capacité, de cette ligne électrique triphasée, on utilise les données suivantes [17]:

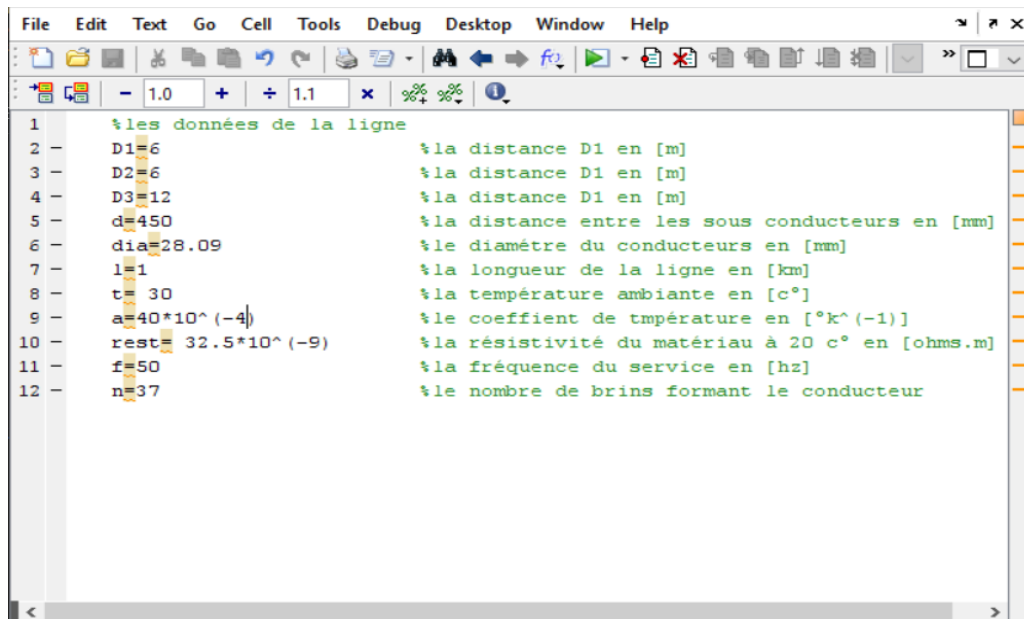


Figure IV.3 : Données d'une ligne triphasée aux conducteurs en faisceaux à 2 sous conducteurs à 37 brins.

Les résultats de calculs sont présentés dans le tableau suivant :

R ( $\Omega/\text{km}$ )		L (H/km)	C (F/km)
La résistance en continu à $t=30\text{ c}^\circ$	0.1088	$9.2340 \times 10^{-4}$	$12.0440 \times 10^{-9}$
Le facteur de kelvin k	1.0303		
L'effet du spiralage	0.02		
La résistance en alternatif	0.1143		

**Tableau IV.8:** Résultats de calcul, par phase, des paramètres d'une ligne aux conducteurs en faisceaux à 2 sous conducteurs à 37 brins

Les résultats trouvés en littérature sont :

$$R = 0.334 \text{ } \Omega/\text{km}, \quad L = 10.57 \cdot 10^{-4} \text{ } \Omega/\text{km}$$

## Exemple 2

Pour le calcul des paramètres linéiques, Résistance, Inductance et Capacité, de cette ligne électrique triphasée, on utilise les données suivantes [17]:

```

1 %les données de la ligne
2 - D1=12 %la distance D1 en [m]
3 - D2=12 %la distance D1 en [m]
4 - D3=24 %la distance D1 en [m]
5 - d=450 %la distance entre les sous conducteurs en [mm]
6 - dia=27.5 %le diamètre du conducteurs en [mm]
7 - l=1 %la longueur de la ligne en [km]
8 - t= 30 %la température ambiante en [c°]
9 - a=40*10^(-4) %le coefficient de température en [°k^(-1)]
10 - rest= 32.5*10^(-9) %la résistivité du matériau à 20 c° en [ohms.m]
11 - f=50 %la fréquence du service en [hz]
12 - n=61 %le nombre de brins formant le conducteur
  
```

Figure IV.4 : Données d'une ligne triphasée aux conducteurs en faisceaux à 2 sous conducteurs à 61 brins

Les résultats de calculs sont présentés dans le tableau suivant :

R ( $\Omega/\text{km}$ )		L (H/km)	C (F/km)
La résistance en continu	0.1134	$11 \times 10^{-4}$	$10.4580 \times 10^{-9}$
à $t=30\text{ c}^\circ$			
Le facteur de kelvin k	1.027		
L'effet du spiralage	0.02		
La résistance en alternatif	0.1189		

**Tableau IV.9:** Résultats de calcul, par phase, des paramètres d'une ligne aux conducteurs en faisceaux à 2 sous conducteurs à 61 brins

### IV.3.2 Calcul de la flèche

Dans cette partie on va voir l'influence de la portée horizontale entre deux pylônes successifs, au même niveau, et de la tension de pose sur la variation de la flèche.

Les données de cette ligne sont tirées d'une étude de l'Entreprise de Réalisation d'Ouvrages Electriques.

#### IV.3.2.1 Pour une portée de 72 m

**a-** Pour une tension de pose égale à  $4.55 \text{ kg/mm}^2$  (à  $5^\circ \text{C}$ ) :

$$h = 4.55 \times 34.4 = 156.52 \text{ kg} = 1533.9 \text{ N}.$$

$$w = 94 \text{ kg/km} = 0.9212 \text{ N/m}.$$

le résultat obtenu après l'exécution du programme est :

$$S = 0.3892 \text{ m} \approx 40 \text{ cm}$$

**b-** Pour une tension de pose égale à  $2.475$  (à  $35^\circ \text{C}$ ) :

$$h = 2.475 \times 34.4 = 85.14 \text{ kg} = 834.4 \text{ N}$$

$$w = 94 \text{ kg/km} = 0.9212 \text{ N/m}.$$

le résultat obtenu après l'exécution du programme est :

$$S = 0.7154 \text{ m} \approx 72 \text{ cm}$$

#### IV.3.2.2 Pour une portée de 35 m

**a-** Pour une tension de pose égale à  $4.55 \text{ kg/mm}^2$  (à  $5^\circ \text{C}$ ) :

$$h = 4.55 \times 34.4 = 156.52 \text{ kg} = 1533.9 \text{ N}.$$

$$w = 94 \text{ kg/km} = 0.9212 \text{ N/m}.$$

le résultat obtenu après l'exécution du programme est :

$$S = 0.0920 \text{ m} \approx 9.2 \text{ cm}$$

**b-** Pour une tension de pose égale à  $2.475$  (à  $35^\circ \text{C}$ ) :

$$h = 2.475 \times 34.4 = 85.14 \text{ kg} = 834.4 \text{ N}$$

$$w = 94 \text{ kg/km} = 0.9212 \text{ N/m}.$$

le résultat obtenu après l'exécution du programme est :

$$S = 0.1691 \text{ m} \approx 17 \text{ cm}$$

### **Conclusion**

Dans ce chapitre on a vu l'influence des différentes caractéristiques spécifiques à chaque type de ligne, ainsi que la disposition des conducteurs, que ce soit sur les paramètres électriques linéiques, ou sur le paramètre mécanique.

On peut conclure aussi que le programme écrit sous MATLAB, dans ce travail, a donné des résultats logiques, et cohérents avec ceux obtenus dans la littérature.

## **Conclusion générale**



### Conclusion générale

L'objectif visé dans notre présent mémoire était le calcul par ordinateur, sous le logiciel MATLAB, des paramètres électriques et mécaniques, d'une ligne aérienne de transport de l'énergie électrique. Ce logiciel nous a permis d'écrire un simple programme dont le but est de faciliter à l'utilisateur le calcul des paramètres électriques et mécanique des lignes électriques aériennes, et de réduire le temps, ainsi que le risque d'erreurs à chaque fois qu'il souhaite faire ce calcul sur les lignes aériennes.

Notre travail a été réalisé en deux parties, la première partie a été consacrée pour la réalisation du programme de calcul des paramètres électriques des lignes électriques dont le programme a offert plusieurs choix à l'utilisateur, et la deuxième partie a été consacrée au calcul de l'unique paramètre mécanique abordé dans notre projet (la flèche).

Le programme développé dans ce mémoire offre une multitude de choix entre les différents types de lignes, ainsi que les différents types de conducteurs et à différentes dispositions.

On peut conclure aussi que les résultats obtenus par le programme réalisé sont logiques et cohérents avec les résultats des sources utilisées.

Nous espérons que notre travail sera utile pour des futurs étudiants, et qu'ils le développeront davantage pour créer une interface graphique GUI servant à simplifier les tâches à l'utilisateur.

## **Bibliographie :**

- [1] Djamel LABED, “ Production décentralisée et couplage au réseau “, thèse de doctorat d'état de l'Université de Mentouri de Constantine, Anne 2008.
- [2] André CHANAL, “ Lignes aériennes : Présentation et calcul des lignes “, Techniques de l'Ingénieur D4 420.
- [3] Christien PURET, “Les réseaux de distribution publique MT dans le monde“, CT 155 édition septembre 1991.
- [4] Mohamed ZELLAGUI, “étude des protections des réseaux électriques MT (30 & 10 kV)“, mémoire de magistère, UNIVERSITE MENTOURI CONSTANTINE, 2010.
- [5] André CHANAL, Jean-Pierre LÉVÊQUE, “Lignes aériennes: matériels. Conducteurs et câbles de garde“. Techniques de l'ingénieur D 4 422.
- [6] Jean-François DIDIERLAURENT, “Lignes aériennes: matériels; Supports“. Techniques de l'ingénieur D 4 424.
- [7] Dominique NAUD, “Lignes aériennes: matériels; Fondations des supports“. Techniques de l'ingénieur D 4 425.
- [8] Xavier DUCOURET, “Lignes aériennes : matériels ; Isolateurs“. Techniques de l'ingénieur D 4 423.
- [9] D.P. Kothari and I.J. Nagrath, “Modern Power System Analysis“, Third Edition, Tata McGraw-Hill, 2003.
- [10] Manuel RETA-HERNANDEZ, “Transmission Line Parameters“, by Taylor & Francis Group, LLC, 2006.
- [11] William D. STEVENSON, Jr. “Elements of Power System Analysis“, first edition, McGraw-Hill Publisher Company, 1955.
- [12] André DUCLUZAUX, “Pertes supplémentaires dans les conducteurs pour forte intensité par effet de peau et de proximité“, CT n° 83, Schneider electric.
- [13] Igor GUTMAN, Johan LUNDENGARD, Vivendhra NAIDOO, Boris ADUM, “Technologies to reduce and remove ice from phase conductors and shield wires: applicability for Norwegian conditions“, IWAIS 2019 - Reykjavík, June 23 – 28
- [14] Pierre ESCANÉ & Jean-Marie ESCANÉ, “Réseaux électriques linéaires à constantes réparties“, Techniques de l'Ingénieur, traité Génie électrique D 1 100.

- [15] Claude GARY, “Effet couronne sur les réseaux électriques aériens“, Techniques de l’Ingénieur, traité Génie électrique D 4 440.
- [16] Crescent ONYEBUCHI OMEJE, “Corona Loss Minimization on High Voltage Transmission Line Network using Bundled Conductors“, International Journal of Engineering and Advanced Technology (IJEAT) ISSN: 2249 – 8958, Volume-9 Issue-3, February, 2020.
- [17] Jeans-Louis LILIEN, “Transport et distribution de l’énergie électrique“, Université de Liège, 2012-2013.
- [18] C.L Wadhwa, “Electrical Power Systems “, New Academic Science Limited, 2012.
- [19] Holland H. FARR, “Transmission Line Design Manual “, A Water Resources Technical Publication, STATES GOVERNMENT PRINTING OFFICE DENVER: 1980.
- [20] James SLEGERS, “Sag Calculations and High-Temperature Conductor Technologies “, IOWA STATE UNIVERSITY 2011.
- [21] D.A. Douglass and Ridley THRASH, “Sag and Tension of Conductor “, by Taylor & Francis Group, LLC, 2006.
- [22] B.M. Weedy, B.J. Cory N. JeNkiNs, J.B. ekaNayake, G. strBaC, “Electric Power Systems “, fifth Edition, John Wiley & Sons Ltd, 2012.
- [23] Lyazid HADDAD, Khodir HAMI, “Calcul des paramètres et caractéristiques des lignes électriques triphasées“, Université Abderrahmane Mira - Béjaia, mémoire de Master 2014/2015.

### Résumé

Le transport de l'énergie électrique, des centrales de production aux centres de consommation, se fait généralement au biais des lignes électriques aériennes qui sont constituées d'un ensemble d'infrastructures dont les plus significatifs sont les conducteurs électriques et leurs supports.

Ces conducteurs électriques sont caractérisés par des paramètres électriques, tel que la résistance, l'inductance et la capacité, qui se diffèrent selon le type de la ligne, le type des conducteurs, et leurs disposition sur les pylônes, et des paramètres mécaniques qui dépendent de la portée et la nature du conducteur.

Notre objectif consiste à écrire un programme sous MATLAB qui calcule ces paramètres, en choisissant le type de la ligne, le type des conducteurs ainsi que leurs dispositions sur les supports.

**Mots clé :** lignes aériennes, inductance, résistance électrique, capacité, fléchissement des conducteurs.

### Abstract

The transmission of electric energy, from production plants to the consumption ones, is insured by overhead electric transmission lines that are constituted by several infrastructures like electric conductors and their supports.

These electric conductors are caraterised by electric parameters, like resistance, inductance and capacity, which differs according to the type of the line, the type of conductors, and their disposition upon the supports. And mechanical parameters wich depend on the span and the nature of the conductor.

Our objective consists about writing a MATLAB program allowing the calculation of these parameters, choosing the type of the line, the type of conductors and their disposition upon their supports.

**Key words :** overhead lines, inductance, capacitance, eletrical resistance, sag of conductors.