

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE

MINISTERE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR ET DE LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE

UNIVERSITE MOULOUD MAMMERI DE TIZI-OUZOU

FACULTE DE GENIE ELECTRIQUE ET DE L'INFORMATIQUE

DEPARTEMENT D'ELECTROTECHNIQUE



## mémoire de fin d'études

*En vue d'obtention du diplôme d'ingénieurs d'état en  
Electrotechnique, option Réseaux électriques*

THEME

Développement d'un programme de  
calcul informatique de  
dimensionnement optimal des  
jonctions triphasées

**Proposé et dirigé par :**

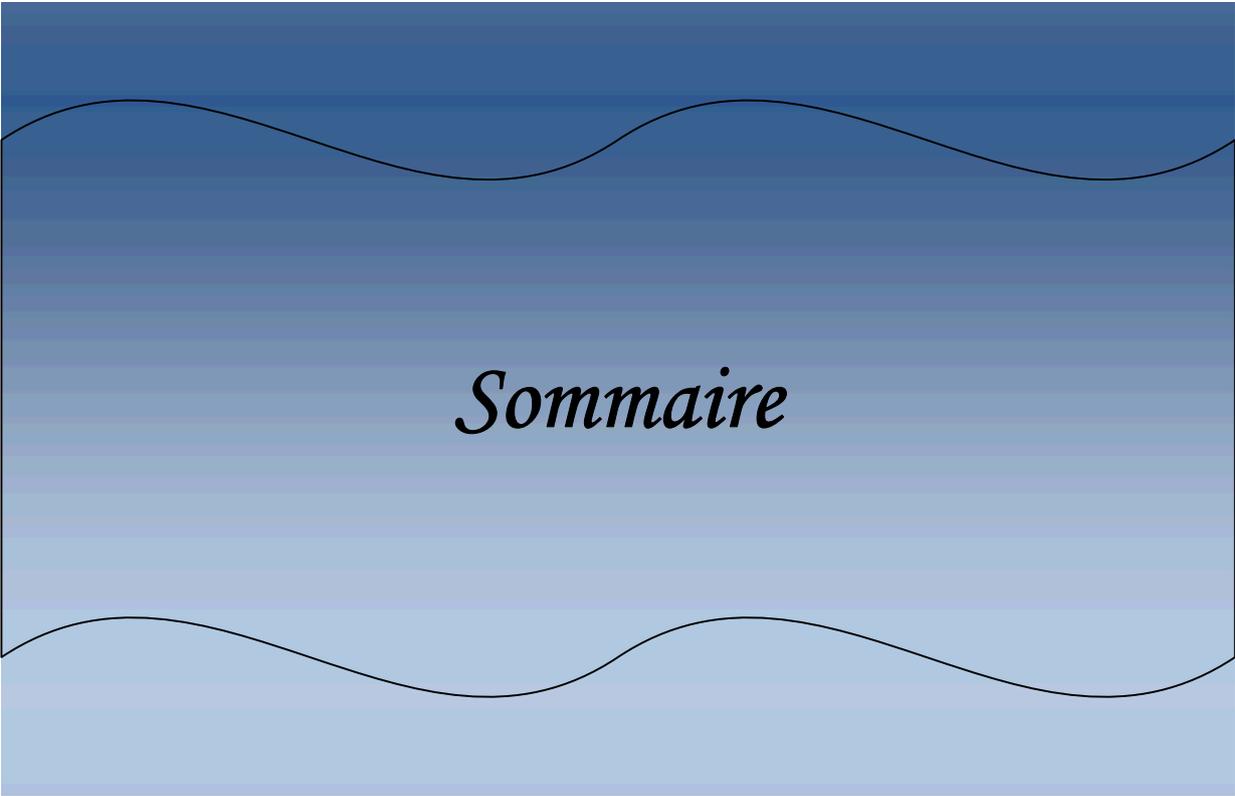
Mr : RACHEK M'hemed

**Etudié par :**

Mr : SADI Mourad

Mr : BOUKELLAL El-hocine

Promotion:2007/2008



# *Sommaire*

## Sommaire

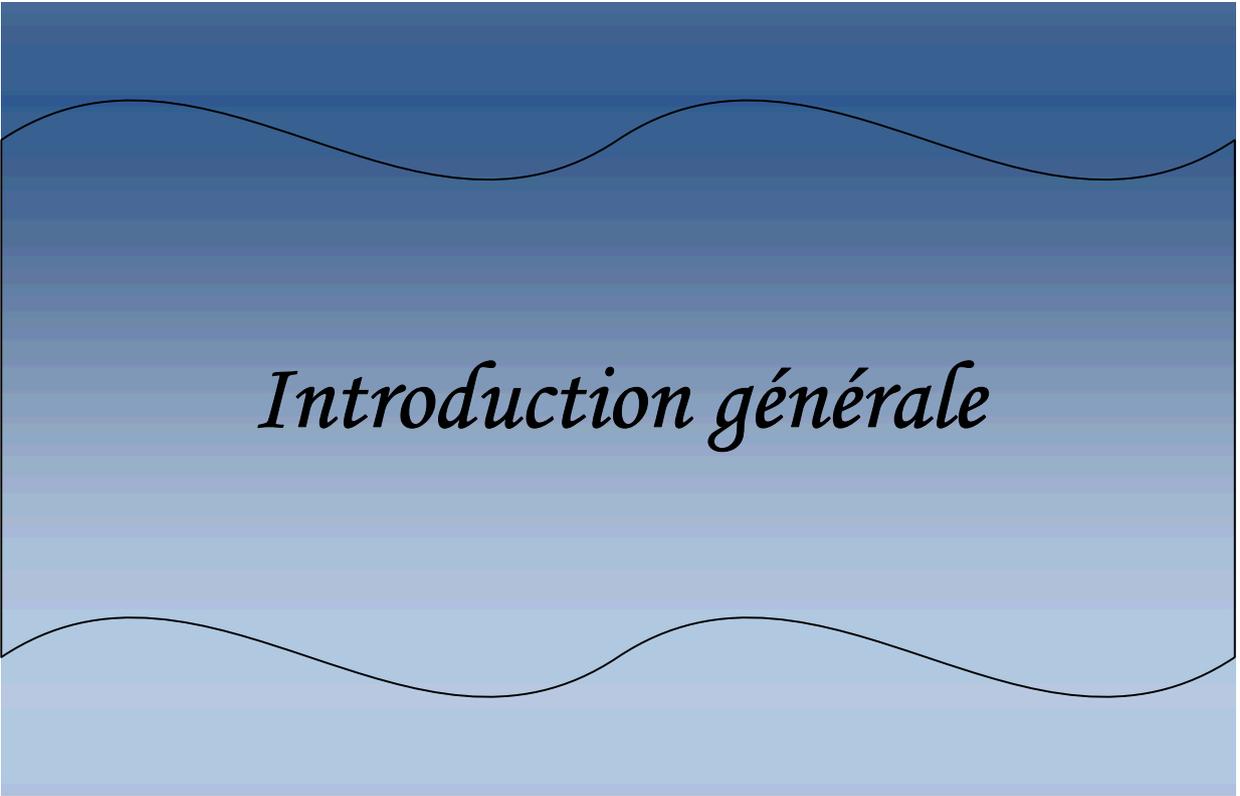
Introduction générale .....	01
Chapitre I : Généralités sur les lignes aériennes et les câbles souterrains	
I.1 Introduction .....	03
I.2 Hiérarchisation par niveau de tension .....	03
I.3 Elément constitutifs des lignes aériennes .....	03
I.3.1 Les conducteurs .....	03
I.3.2 Supports et fondations.....	05
I.3.2.1 Catégories et types de supports.....	05
I.3.3 Câble de garde.....	07
I.3.3.1 Rôle statique .....	07
I.3.3.2 Rôle dynamique.....	07
I.3.4 Isolateurs.....	08
I.4 Les câbles souterrains .....	09
I.4.1 Constitution des câbles souterrains .....	09
I.4.1.1 Câbles isolés au papier et imprégnés.....	11
I.4.1.2 Câbles à isolation synthétique.....	11
I.4.1.3 Vinyl et Nikol.....	11
I.4.1.4 Câbles à isolation gazeuse .....	12
I.5 Conclusion.....	12
Chapitre II : Dimensionnement des lignes aériennes	
II.1 Introduction.....	13
II.2 Etude des contraintes physiques.....	13
II.2.1 Choix de la section.....	13
II.2.2 Critère de courant nominal.....	14
II.2.3 Critère de courant de court-circuit .....	15
II.2.4 Intensités maximales de court-circuit.....	16
II.2.5 Critère économique .....	16
II.2.6 Critère de Chute de tension .....	18
II.2.7 Choix de la section optimale.....	19
II.3 Paramètres et représentation schématique d'une ligne électrique.....	20
II.3.1 Calcul des paramètres de la ligne.....	21
II.3.1.1 Résistance linéique.....	21
II.3.1.1.1 Variation de la résistance avec la température .....	22
II.3.1.1.2 Effet de peau .....	23
II.3.1.2 Conductance linéique .....	24
II.3.1.3 Inductance linéique et capacité linéique .....	25
II.3.2 Impédances propre et mutuelle .....	25
II.3.2.1 Impédance propre .....	26

## Sommaire

II.3.2.2 Impédance mutuelle.....	27
II.4 Etude des contraintes mécanique.....	28
II.4.1 Effort du vent.....	28
II.4.2 Calcul de la portée critique .....	30
II.4.3 Flèche maximale et hauteur des conducteurs .....	31
II.4.4 Détermination et choix de la longueur de la chaîne de suspension .....	32
II.4.4.1 Calcul de la Ligne de fuite des isolateurs .....	32
II.4.4.2 Degré de salinité.....	33
II.4.4.3 Tension nominale de tenue aux chocs de foudre « BIL ».....	34
II.4.5 Choix de la chaîne d'isolateurs.....	34
II.4.6 Calcul de la distance phase/phase D et phase/terre .....	37
II.5 Conclusion .....	38
Chapitre III : Calcul des champs électriques et magnétiques	
III.1 Introduction.....	39
III.2 Perturbation due à l'effet couronne .....	39
III.2.1 Effet couronne .....	39
III.2.2 Calcul des pertes .....	40
III.2.3 Remarque.....	40
III.2.4 Les manifestation de l'effet couronne.....	41
III.3 Calcul du champ électrique superficiel des conducteurs.....	41
III.4 Champ électrique pour les systèmes usuels.....	41
III.4.1 Conducteur cylindrique concentrique.....	41
III.4.2 Ligne bifilaire .....	43
III.4.3 Le système conducteur terre.....	44
III.4.4 Système à trois conducteurs.....	44
III.4.4.1 Méthode des images .....	45
III.5 Conducteur en faisceau.....	46
III.6 Calcul du champ magnétique.....	47
III.7 Induction magnétique pour un système triphasée .....	49
III.8 Conclusion.....	51
Chapitre IV : Calcul des paramètres caractéristiques d'une ligne	
IV.1 Introduction .....	52
IV.2 Systèmes équilibrés et déséquilibrés .....	52
IV.3 Les réseaux symétriques .....	53
IV.3.1 Méthode général de calcul. ....	54
IV.3.1.1 Schéma équivalent d'une ligne .....	54
IV.4 Etude des caractéristiques longitudinales .....	55
IV.4.1 Résistance longitudinale : .....	55
IV.4.2 Réactance longitudinale (Inductance) :.....	56
IV.4.3 Impédance propre $Z_{ii}$ et impédance mutuelle $Z_{ij}$ .....	57
IV.4.4 Matrices des résistances et des inductances longitudinales linéiques .....	57

## Sommaire

IV.5 Etude des caractéristiques transversales .....	57
IV.5.1 Réactance transversale (capacité) .....	58
IV.5.2 Matrice des coefficients de potentiel .....	58
IV.5.2.1 Coefficients de potentiel .....	59
IV.5.3 Matrice impédance .....	59
IV.5.4 Impédance séquentiel .....	60
IV.6 Calcul de la capacité séquentielle .....	61
IV.7 Conclusion .....	62
Chapitre V : Calcul des coûts et présentation de l'algorithme	
V.1 Introduction .....	63
V.2 Coût des pylônes .....	63
V.2.1 Calcul des efforts en tête .....	63
V.3 Coût de l'indemnisation .....	65
V.4 Coût des conducteurs .....	66
V.5 Coût du tirage des conducteurs .....	66
V.6 Présentation de l'algorithme. ....	66
V.7 Conclusion .....	71
Conclusion générale .....	75



*Introduction générale*

### **Introduction générale**

Les lignes électriques transportent de l'électricité produite dans les centrales jusqu'aux réseaux de distribution qui alimentent les consommateurs industriels, commerciaux et résidentiels. Dans un environnement urbain, les lignes de transport peuvent s'étendre sur quelques kilomètres seulement, tandis que celles qui transportent l'énergie à partir des centrales hydroélectriques éloignées mesurent parfois plus de 1000 km. Ces lignes se distinguent par la quantité d'électricité qu'elles transportent. Les exigences n'étant pas toujours les mêmes, plusieurs facteurs techniques, économiques et environnementaux influent sur la planification des nouvelles lignes de transport.

Le dimensionnement des lignes aériennes nécessite la connaissance de plusieurs facteurs, sur le plan technique, il faut tenir compte de la chute de tension, difficultés d'installation...etc. sur le plan économique il dépend du prix de l'installation et les valeurs des pertes cumulées (pertes de puissance et pertes par effet joule). Les facteurs environnementaux tels que la température qui fait varier la longueur du conducteur, ainsi que la pousse du vent fait chasser les conducteurs dans un plan très éloigné de la verticale. Le but de connaître tous ces facteurs, est d'exploiter les réseaux électriques dans les meilleurs conditions, de maintenir la fourniture à un bon niveau de qualité de l'énergie et rétablir la distribution d'électricité lorsque celle-ci à été interrompue.

Pour définir le développement d'un programme de calcul informatique de dimensionnement optimal des jonctions triphasées, nous avons répartis notre travail en cinq (05) chapitres :

**Chapitre I** : Généralités sur les lignes aériennes et câbles souterrains.

**Chapitre II** : Dimensionnement des lignes aériennes, ce chapitre est consacré à donner un dimensionnement optimal des lignes pour les contraintes physiques (section des conducteurs, résistance du conducteur,...etc.), et les contraintes mécaniques (la portée, la flèche maximale, la chaîne d'isolateurs,...etc.).

**Chapitre III** : Calcul des champs électriques et magnétiques, dans ce chapitre on a étudié le phénomène d'effet couronne et la perturbation due à ce dernier sur les lignes aériennes, en plus on a donné les équations du champ électrique et magnétique qui régissent les lignes aériennes.

## Introduction générale

**Chapitre IV :** Calcul des paramètres caractéristiques R, L, C, ce chapitre est consacré sur le calcul des impédances longitudinale et transversale des lignes aériennes, en plus on a donné les équations sur l'impédance et la capacité homopolaire des lignes.

**Chapitre V:** Ce chapitre est consacré au calcul des coûts et à la présentation de l'algorithme et les différents résultats obtenu par l'application du programme.

# *CHAPITRE I*

## *Généralités sur les lignes aériennes et les câbles souterrains*

## **I.1 Introduction**

Les lignes hautes tension comprennent essentiellement des lignes aériennes, mais aussi des câbles souterrains, dont le rôle est d'assurer le transit de puissance fournie par les centrales électriques vers les centres de consommation qui en générale utilisent des niveaux de tension moyenne ou basse. Ce chapitre donne une description générale sur ces réseaux électriques et la constitution des lignes aériennes (conducteurs, support, isolateurs....etc.) et câbles souterrains (constitution des câbles, mode de pose,....etc.).

## **I.2 Hiérarchisation par niveau de tension des réseaux électriques**

Le réseau est structuré en plusieurs niveaux, assurant des fonctions spécifiques propres, et caractérisés par des tensions adaptées à ces fonctions. Les réseaux de transport à très haute tension « THT » transportent l'énergie des gros centres de production vers les régions consommatrices (de 150 à 800 kV). Ces réseaux sont souvent interconnectés, réalisant la mise en commun de l'ensemble des moyens de production à disposition de tous les consommateurs. Les réseaux de répartition à haute tension « HT » assurent, à l'échelle régionale, la desserte des points de livraison à la distribution (de 30 à 150 kV). Les réseaux de distribution sont les réseaux d'alimentation de l'ensemble de la clientèle, à l'exception de quelques gros clients industriels alimentés directement par les réseaux THT et HT. On distingue deux sous-niveaux : [Carrive 1998]

- les réseaux à moyenne tension « MT » : 3 à 33 kV.
- les réseaux à basse tension « BT » : 110 à 600 V.

## **I.3 Élément constitutifs des lignes aériennes**

Une ligne aérienne se compose des conducteurs de phase suspendus au moyen de chaînes d'isolateurs à des pylônes mis à la terre. Un ou plusieurs conducteurs supplémentaires appelés câble de garde connectés à la terre par chaque pylône assurent principalement la protection des conducteurs de phases contre les chutes de foudre.

### **I.3.1 Les Conducteurs**

L'énergie électrique étant transportée sous forme triphasée, on trouvera au moins 3 conducteurs par ligne. Pour une phase, on peut aussi trouver un faisceau de conducteurs (de 2 à 4) à la place d'un simple conducteur afin de limiter les pertes d'énergie réactive

dues au champ électrique. On utilise en général des conducteurs en alliage d'aluminium, ou une combinaison aluminium-acier pour les câbles plus anciens. Ce sont des conducteurs composés d'une âme centrale en acier sur laquelle sont tressés des brins d'aluminium. Les conducteurs sont nus, c'est-à-dire non revêtus d'un isolant, ou bien composé d'une enveloppe isolante.

Le transport de l'énergie électrique se fait par des lignes aériennes ou souterraines. Les conducteurs aériens sont soumis à l'action des facteurs atmosphériques: température, vent, pluie, verglas etc. Ces facteurs interviennent de façon importante dans le choix des paramètres d'une ligne haute tension: type de conducteur électrique (matériaux et géométrie), hauteur et distance des pylônes, tension mécanique maximale sur le conducteur afin de maintenir une garde au sol suffisant etc.

Le choix de ces paramètres a une grande influence sur les coûts de construction et d'entretien d'une ligne de transmission, ainsi que sur sa fiabilité et sur sa longévité.

Par contre les conducteurs souterrains ce sont des éléments composés d'une âme et de son enveloppe isolante. Le degré de protection requis pour un câble dépend de l'environnement dans lequel il sera posé et donc de son utilisation courante.

Le tableau.I.1 présente les caractéristiques géométriques, la masse par kilomètre et la portée de lignes équipées de différents types de conducteurs.

Type conducteur (matière)	Diamètre [mm]	Section [mm <sup>2</sup> ]	Nombre de conducteurs par phase	Poids par terre [t/km]	Portée pour chaque terre de 400 KV [MVA]
Aluminium/acier	31.5	585	3	5.9	2037
Aluminium/acier	40.5	967	2	6.5	1860
Aluminium/acier	56.26	1866	1	6.3	1390
Alliage aluminium	31.05	570	4	6.3	2700
Alliage aluminium	44.00	1144	2	6.3	2090
Alliage aluminium	52.00	1600	2	8.8	2600

Tableau.I.1 Exemple de caractéristiques principales des conducteurs pour les lignes à haute et très haute tension. [Cova 2005]

### I.3.2 Supports et fondations

Pour les lignes aériennes, les opérateurs de transport d'électricité, utilisent des pylônes, en général réalisés en treillis d'acier. Leur fonction est de supporter et de maintenir les conducteurs à une distance suffisante du sol et des obstacles, tout en permettant de garantir la sécurité et l'isolement par rapport à la terre.

Les fondations (Figure I.1) sont généralement superficielles, d'une profondeur du plan de pose de 3 à 5 m par rapport au niveau du sol et réalisées avec une dalle et un fût pour chaque montant ; le montant est raccordé à la fondation par un pied en charpente.



Figure I.1 Vue d'une fondation d'une ligne 400 kV. [Cova 2005]

#### I.3.2.1 Catégories et types de supports

Les supports des lignes triphasées peuvent classer selon le profil utilisé en deux catégories : [Michel 2004]

Dans la première catégorie on distingue les types des supports suivants :

- Poteaux à armement nappe-voûte.
- Pylônes ou portiques à nappe horizontale.
- Pylônes du type chat.

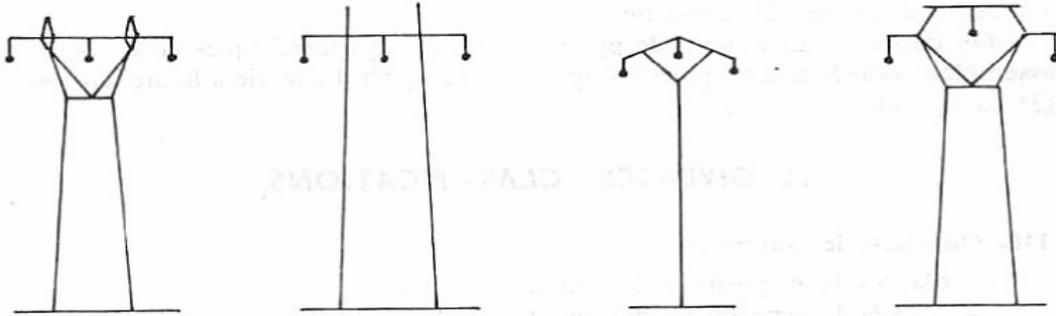


Figure. I.2 Pylônes ou portiques à armement nappe ou nappe-voute

Pour la seconde catégorie on rencontre les types suivants :

- Pylône triangle. (Figure.I.3.a)
- Pylône drapeau. (Figure. I.3.b)
- Pylône double drapeau. (Figure. I.3.c)
- Pylône double triangle. (Figure. I.3.d)

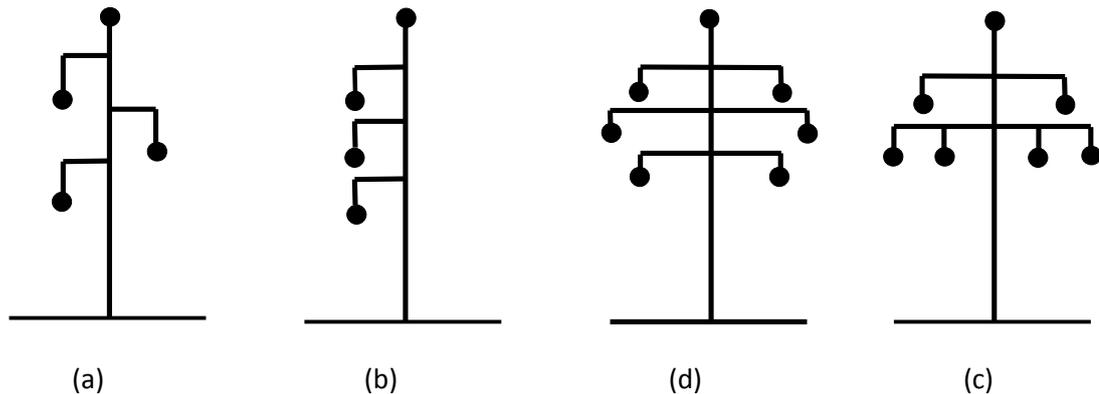


Figure. I.3 schéma de la seconde catégorie des types des pylônes

Cette dernière catégorie de supports est relativement plus haute que la précédente, mais pour une emprise au sol plus faible.

Une ligne comprend plusieurs tronçons appelle cantons comportant eux mêmes plusieurs portée, aux extrémités des quelles les conducteurs sont ancrés solidement pour éviter un renversement générale à la suite d'une rupture accidentelle des conducteurs. On distingue donc des supports d'alignement (appelés aussi porteurs) ou les conducteurs sont suspendus et des supports d'arrêts (appelés aussi porteurs d'ancrages ou tensions) ou les conducteurs sont ancrés. [Michel 2004]



Figure I.4 : Exemple de support d'une ligne de 225 kV double terre. [Cova 2005]

### I.3.3 Câble de garde

Le câble de garde est constitué d'un ou plusieurs conducteurs d'un diamètre inférieur ou équivalent au conducteur de phase d'une ligne. Il est situé parallèlement aux conducteurs de phase à un niveau supérieur à ceux-ci et relié à la terre par l'intermédiaire de chaque pylône.

Le câble de garde, dont le but initial est de protéger les conducteurs de phases d'une ligne ou d'un poste contre les impacts directs de la foudre, joue un certain nombre d'autres rôles parallèles :

- Rôle statique
- Rôle dynamique

#### I.3.3.1 Rôle statique

Le câble de garde contribue à la réduction du potentiel statique des conducteurs de phase d'une ligne placée sous un nuage orageux. Ceci n'est valable que si les conducteurs de phase sont laissés flottants, ce qui en pratique n'est jamais le cas. En effet, les lignes sont alimentées ou mises à la terre pour des raisons de sécurité.

#### I.3.3.2 Rôle dynamique

Les rôles dynamiques du câble de garde sont du type :

- Protection contre l'impact direct de la foudre.
- Amortissement des ondes de surtensions de foudre par abaissement de l'impédance caractéristique des conducteurs de phase.
- Blindage contre les surtensions induites par le transport d'énergies électrique en haute tension sur les lignes de télécommunications.

Un aperçu des principales caractéristiques des conducteurs de garde est reporté dans le tableau I.2 :

Le tableau I.2 représente les Principales caractéristiques des conducteurs de garde : [Cova 2005]

Type conducteur (matière)	Diamètre [mm]	Section [mm <sup>2</sup> ]	Poids [t /Km]
Acier zingué	11,5	78,9	0,64
Acier recouvert d'aluminium	11,5	80,6	0,54
Acier recouvert d'aluminium	20,3	245,5	1,65
Acier-alliage d'aluminium	15,75	147,1	0,56
Acier-alliage d'aluminium	19,6	228	0,87
Acier-alliage d'aluminium-aluminium	17,9	180	0,82
Acier-alliage d'aluminium-aluminium	22,6	290	1,90
Acier-alliage d'aluminium	19,2	157,4	0,92
acier-alliage d'aluminium	23,6	267,5	1,66

Tableau.I.2 Principales caractéristiques des conducteurs de garde. [Cova 2005]

### I.3.4 Isolateurs

L'action d'isolé est le moyen d'empêcher la conduction entre conducteurs électrique soumis à des tensions différentes. Cette isolation entre les conducteurs et les pylônes est assurée par des isolateurs réalisés soit en verre, ou céramique, soit en matériau synthétique, dont la conductivité électrique est pratiquement très faible voire nulle.

Les isolateurs en verre ou céramique généralement en forme d'assiette sont associés, entre eux pour former des chaînes d'isolateurs (Figure.I.4). Plus la tension de la ligne est élevée, plus le nombre d'assiettes dans la chaîne est important. [Michel 2004]

Le dimensionnement de la chaîne d'isolateurs est basé sur deux paramètres :

- La ligne de fuite ( $l_f$ ) qui est la distance la plus courte le long de la surface d'un isolant entre deux parties conductrices.
- La ligne de contournement ( $l_c$ ) qui est la distance la plus courte dans un gaz entre deux parties conductrices.



Figure. I.5 chaînes d'isolateurs. [Cova 2005]

#### I.4 Les câbles souterrains

L'usage de câbles souterrains est principalement réservé à des secteurs dans lesquels le passage des lignes aériennes interférerait avec d'autres activités (en zones urbaines par exemple). Ces câbles présentent, en effet, des inconvénients, en courant alternatif, un courant capacitif apparaît entre le conducteur et sa gaine métallique, comme dans un condensateur. Ce courant parasite encombre progressivement la section du câble et diminue d'autant sa capacité de transport.

##### I.4.1 Constitution des câbles souterrains

Les câbles sont constitués d'une âme conductrice en cuivre ou en aluminium, avec une isolation réalisée avec du « PRC » ou du papier imprégné (figure.I.6). Le domaine de tension et les normes font que la constitution d'un câble engendre l'utilisation de divers matériaux dans sa fabrication.

Pour différencier les câbles, ils sont classés par domaine de tension. Les câbles basse tension (230/400 volts), moyenne tension A (11 600/20 000 volts), haute tension (45 à 300 KV) et très haute tension (300 à 750 KV).

Les câbles se composent d'un ou plusieurs conducteurs centraux, d'une isolation dont la rigidité diélectrique est élevée, la permittivité et les pertes diélectriques les plus faibles possibles et d'un manteau conducteur en général à la terre. [Michel 2004]

La présence du manteau permet d'homogénéiser la répartition radiale du champ électrique (E) rendant les caractéristiques électriques du câble indépendantes du mode de pose.

On rencontre actuellement trois catégories principales des câbles à haute tension.

- Les câbles isolés au papier et imprégnés (PI).
- Les câbles à isolation synthétique.
- Les câbles à isolation gazeuse.

Tous ces câbles répondent à la norme française NFC-C33 xyz, où NF : norme française,

C : coulée et Les trois chiffres x, y et z ont la signification suivante :

Le premier chiffre « x » désigne la nature du conducteur, « 0 » c'est des généralités, « 1 » pour le cuivre, « 2 » est aluminium et « 3 » est la combinaison entre le cuivre et l'aluminium. Le deuxième chiffre « y » nous informe sur les qualités de l'isolant, Le chiffre « 1 » présente l'isolation à papier imprégné et « 2 » pour l'isolant synthétique ainsi que le troisième chiffre « z » sert à donner l'ordre chronologique de normes dans chaque groupe.

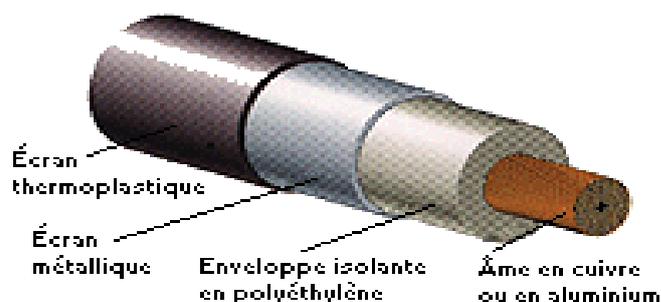


Figure. I.6 constitution d'un câble souterrain. [Cova 2005]

#### **I.4.1.1 Câbles isolés au papier et imprégnés (PI)**

Un tel câble est constitué d'un conducteur central en cuivre ou en aluminium, formé par une corde, ou d'un conducteur tubulaire qui peut, dans ce cas, être parcouru par un flux d'huile de refroidissement. L'isolation est formée par un guipage de papier imprégné de masse isolante (huile+résine) pour des tensions jusqu'à 60KV ou d'huile fluide pour des tensions plus élevées. Le manteau est constitué par une gaine de plomb protégée par une gaine de polychlorure de vinyle (PVC), à propos de ces câbles on propose quelque exemples tel que : NF C 33-100, CPI à ceinture (CPI : câble papier imprégné), CPI Unipolaires, CPI Tri plomb, CPI tripolaires métallisés (tri métallisés) et le Bleu blanc rouge et noir. [Michel 2004]

#### **I.4.1.2 Câbles à isolation synthétique**

Ces câbles sont constitués par un conducteur central formé par une corde de cuivre ou d'aluminium. Une couche de matière semi-conductrice est disposée à la surface du conducteur pour limiter et homogénéiser le champ électrique, et ceci afin de réduire le risque de destruction lente de l'isolant et tôt ou tard sa perforation. Ce matériau, présente des propriétés entre un conducteur et un isolant, est constituée par du noir carbone mélangé à un copolymère d'éthylène d'acétate de vinyle (Figure. I.6). Ce sont des câbles à champ radial avec un isolant synthétique et des âmes circulaires et un isolant polyéthylène réticulé (PR). Leurs mode de pose est à plein terre, le produit d'étanchéité utilisé est la poudre hygroscopique et ils ont des gaines en PVC, les seules paramètres qui différent les modèles de cette catégories des autres câbles sont l'année d'utilisation et la période de pose. Voici quelques modèles de cette catégorie de câbles: NF C 33-223 et NF C 33-226. [Michel 2004]

#### **I.4.1.3 Vinyl et Nikol :**

Pour le Vinyl et le Nikol ont le même type de semi conducteurs externe, mais la différence entre les deux modèles est le type de gaine car pour le Vinyl c'est le PVC par contre pour le Nikol c'est le polyéthylène (PE).

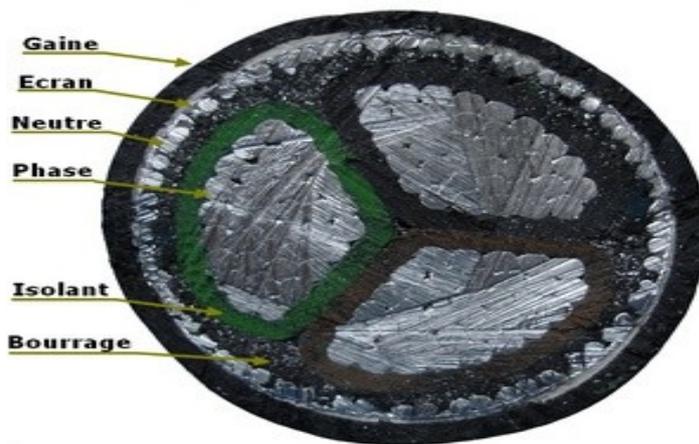


Figure. I.7 constitution d'un câble à isolation synthétique. [Cova 2005]

#### I.4.1.4 Câbles à isolation gazeuse

Les câbles à isolation gazeuse, comprennent deux tubes coaxiaux, le tube intérieur étant centré au moyen de viroles en résine époxy. L'isolation est obtenue au moyen d'un gaz possédant de bonnes caractéristiques diélectriques comme l'hexafluorure de surface. La rigidité diélectrique  $\text{SF}_6$  est de l'ordre de  $10\text{KV/mm}$ , c'est-à-dire environ trois fois la rigidité diélectrique de l'air aux conditions normales (pression  $760\text{ mm Hg}$ , température  $20\text{ }^\circ\text{C}$ , humidité  $11\text{gr/m}^3$ ). [Michel 2004]

#### I.5 Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons donné une description générale sur la structure des lignes, tel que les conducteurs qui sont les principaux éléments du transport d'énergie électrique, les isolateurs avec leurs fonctionnements de maintenir les conducteurs et les pylônes dans le but d'accrocher les chaînes d'isolateurs et d'isoler les conducteurs par rapport à la terre.

Après avoir donné une description générale sur les éléments qui constituent la ligne, le prochain chapitre sera consacré à l'étude et au calcul précis de tous les éléments.

## *CHAPITRE II*

# *Dimensionnement des lignes aériennes*

## II.1 Introduction

Les lignes électriques sont les éléments de la liaison entre les centrales de production de l'énergie et les utilisateurs. Les sites de production sont généralement éloignés des lieux d'utilisation, d'où la nécessité de transporter l'énergie avec des lignes électriques à haute tension. L'accroissement des pertes de puissance et les chutes de tension fait l'objet de la recherche, et de bien dimensionner ces lignes de transport.

Les lignes aériennes constituent le moyen actuel le plus économique de transport de l'énergie électrique à grande distance et pour cela, comment transmettre au moindre coût une certaine puissance active à partir d'une centrale électrique pour alimenter une charge, située à une certaine distance ?

Ce chapitre est réservé à l'étude de dimensionnement des lignes aériennes, dans le but est de donner une structure bien déterminée pour la ligne, en plus de bien pouvoir diminuer au maximum les pertes de puissance et les chutes de tension. Plusieurs facteurs, notamment atmosphériques, imposent des variations des conditions de tension mécanique aux conducteurs de lignes aériennes. Nous allons donc utiliser l'équation d'état pour déterminer la portée moyenne, mais aussi pour déterminer la tension mécanique ou la flèche en fonction des différentes hypothèses. Les contraintes économiques évaluent à présent le coût d'investissement total pour la ligne et sa durée d'utilisation, ainsi que la section qui minimiserait ce coût.

Pour cela il nous a semblé indispensable d'étudier ce phénomène en deux parties :

- L'étude des contraintes physiques (section du conducteur, résistance, inductance,...etc.).
- L'étude des contraintes mécaniques (les portées, la garde au sol,...etc.).

## II.2 Etude des contraintes physiques

### II.2.1 Choix de la section

Le dimensionnement d'une ligne aérienne dans le cadre d'un régime permanent se fait en deux parties : choix de la section et de gabarit des pylônes, le choix de la section est très important dans le dimensionnement. En service la ligne doit respecter quatre conditions :

- Le courant nominal qui circule dans la ligne aussi bien en début de mise en service qu'après plusieurs années.
- La ligne doit supporter le courant de court-circuit d'une durée prédéfinie.
- La chute de tension induite par la ligne doit toujours être inférieure à une valeur limite normalisée.
- La stabilité du réseau doit être respectée.

Pour avoir une section optimale de jonctions triphasées on a besoin de quatre (04) critères techniques nécessaires qui vont vérifier chacun des conditions mentionnées ci-dessus. [Charles 1984]

Afin de pouvoir effectuer tous ces calculs, il est nécessaire de disposer de certaines données qui sont :

La tension nominale  $U_n$  [KV].

La puissance nominale en début de vie :  $P_{\text{depart}}$  [MW]

Le facteur de puissance  $\cos(\varphi)$ .

L'augmentation annuelle de puissance prévue durant la durée d'utilisation :  $a_p$  [%/an].

La durée de vie planifiée :  $T$  [ans].

La puissance de court circuit :  $S_{cc}$  [MVA].

La durée du court circuit :  $t_{cc}$  [S].

Et la chute de tension relative maximale :  $\frac{\Delta U}{U_n}$  [%]

### II.2.2 Critère de courant nominal

Nous devons, bien entendu, dimensionner la ligne de telle façon qu'il puisse supporter le courant qui va circuler à la fin de la période d'utilisation prévue. En effet, c'est à ce moment que la puissance transportée sera la plus importante. Nous déterminons tout d'abord la puissance qui circulera dans la ligne après les « T » années d'utilisation projetées. Cette puissance «  $P_T$  », se calcule par la formule suivante : [Charles 1984]

$$P_T = P_{\text{depart}} (1 + a_p)^T \quad [\text{MW}] \quad (\text{II.1})$$

Nous en déduisons le courant circulant dans chaque phase de la liaison par :

$$I_T = \frac{P_T}{\sqrt{3} U_n \cos \varphi} \quad [A] \quad (II. 2)$$

### II.2.3 Critère de courant de court-circuit

Nous déduisons directement ce courant de la formule donnant la puissance de court-circuit. [Charles 1984]

$$I_{cc} = \frac{S_{cc}}{\sqrt{3} U_n} \quad [A] \quad (II. 3)$$

La puissance de court de circuit  $S_{cc}$  est fonction du réseau environnant la ligne étudiée, mais du point de vue dimensionnement, nous retenons souvent les valeurs ainsi représentées dans le tableau. II.1 suivant :

Tension phase/phase U [KV]	Puissance de court circuit $S_{cc}$ [MVA]	Courant de court circuit $I_{cc}$ [KA]
150	8000	30.8
70	2500	20.6
15	350	13.5
6	120	11.6

Tableau. II.1 puissance et courant de court circuit. [Lilien 2000]

Afin de trouver la section minimum permettant de supporter ce courant durant le temps  $t_{cc}$ , nous disposons de la formule suivante :

$$S = \frac{I_{cc} \sqrt{t_{cc}}}{b} \quad (\forall t < 5 \text{ second}) \quad [mm^2] \quad (II. 4)$$

b : facteur dépendant de type de matériau constituant l'âme du conducteur.

Les valeurs du paramètre b sont les suivantes : b = 105,3 pour le cuivre, b = 55,07 pour l'aluminium et b = 61,98 pour l'almelec (AMS). [Lilien 2000]

### II.2.4 Intensités maximales de court-circuit

Les intensités maximales de court-circuit ont été déterminées à partir de la relation

[II.5] suivante : [William A]

$$I_{cc \max} = \sqrt{\frac{Q_c(\beta + 20) \ln \frac{\theta_f - \beta}{\beta + \theta_i}}{\rho_{20}}} \quad [\text{KA}] \quad (\text{II. 5})$$

$Q_c$  : Capacité thermique volumique du matériau du conducteur [ $\text{J}/^\circ\text{Cmm}^3$ ].

$\beta$  : Inverse du coefficient de la résistivité à  $0^\circ\text{C}$ .

$\rho_{20}$  : Résistivité électrique du matériau du conducteur à  $20^\circ\text{C}$ .

$\theta_i$  : Température initiale du conducteur [ $^\circ\text{C}$ ].

$\theta_f$  : Température finale du conducteur [ $^\circ\text{C}$ ].

### II.2.5 Critère économique

Il faut évaluer le coût total de l'investissement pour l'achat, et son utilisation durant le nombre donné d'utilisations planifiées. En effet, la ligne continue à coûter de l'argent même après sa mise en service : sa résistance crée en permanence des pertes lors de son fonctionnement. Nous évaluerons également une section théorique qui minimiserait le coût global actualisé sur la durée de vie de la ligne.

Pourquoi une plus grosse section peut conduire en définitive à un coût global moindre ?

Dans certains cas, même si la ligne coûte plus cher à l'achat, il est plus économique à l'usage, vu sa moindre résistance (donc moins de pertes). Sur plusieurs années d'utilisation, le prix gagné sur les pertes peut compenser un plus gros investissement de départ. [Lilien 2000]

Soit une ligne de section  $S$  ( $\text{mm}^2$ ), de longueur  $L_L$  (km), de résistivité  $\rho$ . Si la ligne transite un courant  $I$ , les pertes par effet joule est comme suit : [Pays 1997]

$$W_j = \frac{3\rho}{S} I^2 L_L \quad (\text{II. 6})$$

Si l'on désigne par  $\gamma$  le coût annuel pour 1kw de perte au moment où la charge est maximale, le coût annuel des pertes s'écrit alors :

$$C_{an} = \gamma \frac{3\rho}{S} I_{max}^2 L_L \quad (II. 7)$$

L'optimisation de la ligne, pour une tension donnée, consiste à choisir la section permettant de minimiser le coût total actualisé (investissement et pertes).

Le cout capitalisé du kilowatt des pertes à la pointe vaut :

$$\Gamma = \gamma \sum_1^{t_v} \left[ \frac{(1 + \tau)^2}{1 + t_a} \right]^t = \gamma \alpha_1 \frac{\alpha_1^{t_v} - 1}{\alpha_1 - 1} \quad (II. 8)$$

En posant :

$$\alpha_1 = \frac{(1 + t_v)^2}{(1 + t_a)}$$

Avec :

$t_a$  : Taux d'actualisation.

$t$  : Temps.

$t_v$  : Durée de vie de l'ouvrage.

$\Gamma$  : Taux d'accroissement annuel de la charge.

Le coût d'une ligne de tension donnée peut s'exprimer par une relation de la forme :

$$\Gamma_0 = (a_1 + a_2 S) L_L \quad (II. 10)$$

$a_1$  et  $a_2$  étant des constantes (constante des prix).

Le coût total (investissement et pertes) vaut ainsi :

$$CT = \left[ a_1 + a_2 S + \Gamma \frac{3\rho}{S} I_{max}^2 \right] L_L \quad (II. 11)$$

En posant:

$$\Gamma 3\rho I_{max}^2 L_L = C_b, \quad a_2 L_L = B \quad \text{et} \quad a_1 L_L = A.$$

Donc :

$$CT = A + B.S + \frac{C_b}{S} \quad (II. 12)$$

Avec :

CT : Coût global sur les T années.

A : Frais fixe (pose, coût fixe pour les trois phases,.....).

B.S : Représente la partie du coût de la ligne qui est proportionnelle à la section « S ».

$\frac{C_b}{S}$  : Coûts d'actualisation et des pertes.

La section optimale économique ( $S_{OE}$ ) est celle qui annule la dérivée de « CT », nous pouvons déterminer directement :

$$S_{OE} = \sqrt{\frac{C_b}{B}} \quad [\text{mm}^2] \quad (\text{II. 13})$$

### II.2.6 Critère de Chute de tension

Afin de déterminer la chute de tension dans la ligne, nous nous basons sur le modèle classique de la figure. II.1. [Charles 1984]

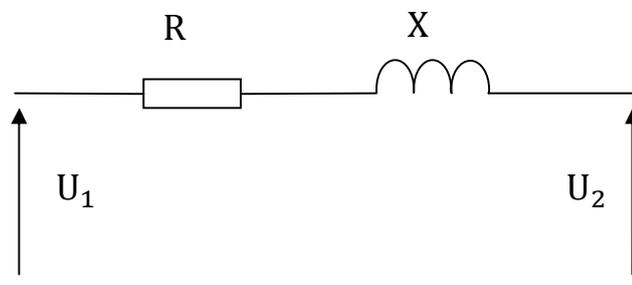


Figure. II.1 schéma d'une ligne électrique

Ou :

R : représente la résistance de la ligne.

X : inductance de la ligne

$U_1$  : La tension à l'entrée du câble.

$U_2$  : La tension à l'autre extrémité du câble.

Si la longueur de la liaison n'est trop important (inferieurs à environs 50 Km), nous pouvons négliger l'effet des capacités et la chute de tension se détermine alors directement à partir de diagramme vectoriel (Figure.II.2) régissant le transport de puissance dans la ligne :

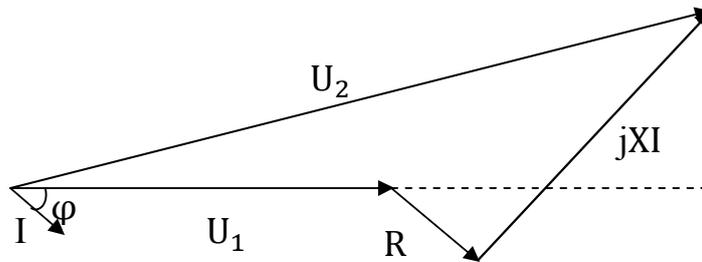


Figure. II.2 représentation vectorielle

Avec :

$\varphi$  : Le déphasage entre la tension et le courant.

$$\frac{\Delta U}{U} = \sqrt{3} \frac{I_n}{U_n} (RI \cos \varphi + XI \sin \varphi) \quad (\text{II. 14})$$

$$\frac{\Delta U}{U} = \frac{|U_2 - U_1|}{|U_2|} \quad (\text{II. 15})$$

### II.2.7 Choix de la section optimale

Si la chute de tension vient à dépasser la limite imposée, il faut choisir une section normalisée plus grande, car celle-ci présentera une résistance plus faible. Nous referons les calculs jusqu'à obtenir une section satisfaisant aux trois critères techniques.

Dans cette première étape de calcul on peut donner un algorithme qui décrira les étapes à suivre pour choisir une section optimale désirée (Figure. II.3).

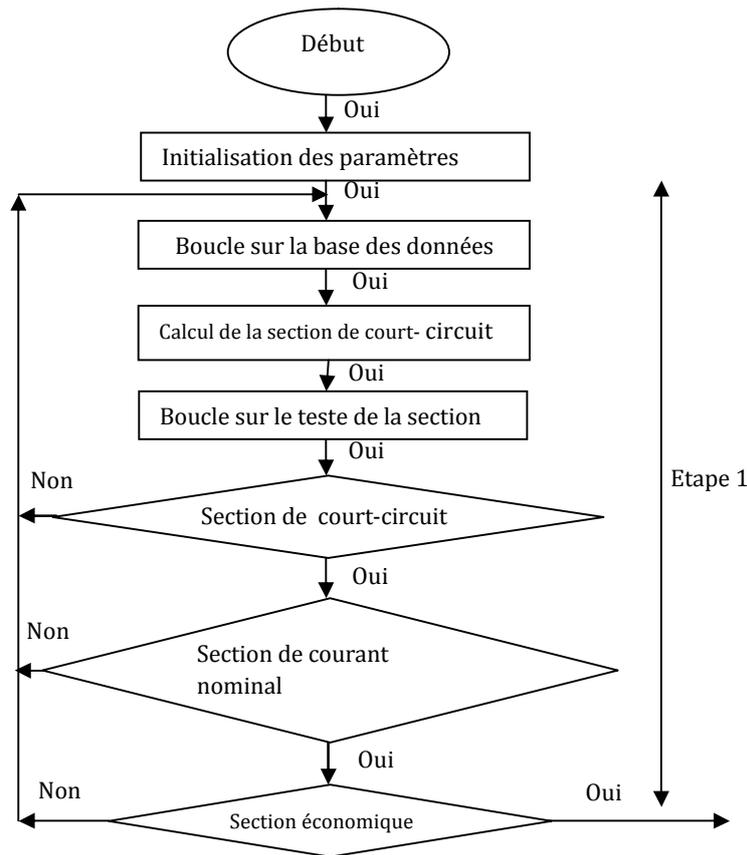


Figure.II.3 l’organigramme qui représente le choix de la section

### II.3 Paramètres et représentation schématique d’une ligne électrique

Considérons une ligne (figure. II.4) dont on isole un élément de longueur  $dx$ . Intéressons-nous au courant circulant dans les conducteurs et à la tension entre deux conducteurs (La fréquence des signaux appliqués est supposée assez faible pour qu’il soit possible de définir la notion de tension électrique entre deux points), [Escané 1997] [Debbel 2005]

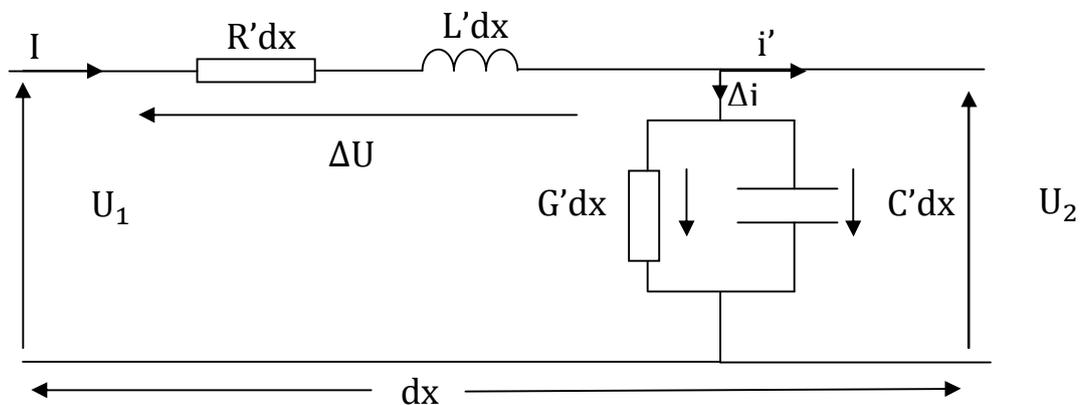


Figure. II.4 Schémas équivalent d’une ligne électrique

Tout élément de longueur  $dx$  est le siège d'une chute de tension longitudinale  $\Delta U$  et d'une dérivation de courant transversale  $\Delta i$ . Cette chute de tension et fuite de courant sont caractérisées par une inductance propre  $dl$ , une résistance série  $dr$ , une capacité entre les conducteurs  $dc$  et une conductance entre conducteurs  $dg$ . Comme la ligne est homogène, les éléments précédents sont uniformément répartis, permettant ainsi de définir les constantes linéiques (par unité de longueur).

$$\text{L'inductance linéique} \quad L' = \frac{dl}{dx}$$

$$\text{La résistance linéique} \quad R' = \frac{dr}{dx}$$

$$\text{La capacité linéique} \quad C' = \frac{dc}{dx}$$

$$\text{La conductance linéique} \quad G' = \frac{dg}{dx}$$

D'où :

$L'$  matérialise l'énergie magnétique emmagasinée par unité de longueur,  $R'$  caractérise les pertes longitudinales par effet Joule,  $C'$  matérialise l'énergie électrostatique et  $G'$  caractérise les pertes transversales par effet Joule.

### II.3.1 Calcul des paramètres de la ligne

Le calcul des paramètres de la ligne s'effectue à l'aide des caractéristiques géométrique tel-que le diamètre de conducteur, hauteur de conducteur...etc. [Pinson 1997]

#### II.3.1.1 Resistance linéique

En basse fréquence [Pinson 1997]

$$R' = \rho \frac{L_L}{NS} = \frac{4}{\pi} \frac{L_L}{G_{con} N d^2} \quad [\Omega/m] \quad (II. 16)$$

Avec :

$N$  : Nombre de conducteurs.

$d$  : Diamètre du conducteur [m]

$G_{con}$  : Est la conductivité du conducteur considéré [S/m].

En haute fréquence un effet électromagnétique repousse les lignes de courant vers la surface du conducteurs (l'effet de peau) la section utile (section réellement parcourue par le courant) diminue, donc la résistance augmente, on montre que :

$$R' = \sqrt{\frac{\mu_0 \mu_r}{\pi G_{\text{con}}}} \frac{\sqrt{f}}{d} \quad [\Omega/\text{m}] \quad (\text{II. 17})$$

Avec :

$\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7}$  Perméabilité magnétique du vide [H/m].

$\mu_r$  = perméabilité relative du matériau considéré.

### II.3.1.1.1 Variation de la résistance avec la température

Lorsque la température d'un conducteur augmente, l'agitation de ses atomes s'accroît. L'opposition au déplacement des électrons (courant) augmente parce que les collisions entre les électrons et les atomes se multiplient. C'est ce qui explique l'augmentation de la résistivité des métaux conducteurs avec la température. [Gilbert 2005]

Cette variation obéit à la loi suivante :

$$\rho_t = \rho_0 [1 + \alpha_0(\theta_c - \theta_{20})] \quad (\text{II. 18})$$

$\rho_t$  : Résistivité électrique à une température  $\theta_c$  [ $\Omega \cdot \text{m}$ ].

$\rho_0$  : Résistivité électrique à  $0^\circ\text{C}$ .

$\alpha_0$  : Coefficient de variation de la résistivité avec la température [ $\text{K}^{-1}$ ].

$\theta_{20}$  : Température à  $20^\circ\text{C}$ .

$\theta_c$  : Température donnée.

Le tableau. II.2 donne les caractéristiques des différents conducteurs.

Caractéristique	Conducteur			
	Cuivre	Aluminium	Almélec(AMS)	
Structure	torsadé	torsadé	lisse	torsadé
Module de Young $M_y$ [N/mm <sup>2</sup> ]	10 <sup>10</sup>	5 à 7,1.10 <sup>10</sup>	5à 7,1.10 <sup>10</sup>	
Masse spécifique [Kg/m <sup>3</sup> ]	8920	2703	2700	
Chaleur spécifique à 20°C $C_p$ [J/Kg.K]	393	924	924	
Coefficient de dilatation thermique $\alpha$ [K <sup>-1</sup> ]	1,6. 10 <sup>-5</sup>	2,24. 10 <sup>-5</sup>	2,4. 10 <sup>-5</sup>	
Résistivité à 20°C $\rho_{20}$ [Ω. m]	1,76. 10 <sup>-8</sup>	2,83. 10 <sup>-8</sup>	3,57. 10 <sup>-8</sup>	
Coefficient de variation de la résistivité avec la température $\alpha_0$ [K <sup>-1</sup> ]	3,8. 10 <sup>-3</sup>	4. 10 <sup>-3</sup>	4. 10 <sup>-3</sup>	
Limite de rupture en traction [N/mm <sup>2</sup> ]	210	80	245	
Coefficient CFI	0,75	0,75	1	
Température maximale admissible $\theta_{max}$ [°C]	150	120	150	
Coefficient aérodynamique $C_x$	1,45	1,45	1,2	1,45

Tableau.II.2 caractéristique des matériaux utilisés. [Lilien 2000]

### II.3.1.1.2 Effet de peau

L'augmentation de la densité de courant à la périphérie des conducteurs massifs, en courant alternatif est l'aspect le plus frappant de l'effet de peau. Les éléments longitudinaux de conducteur sont plus entourés par des lignes de force magnétique par rapport à son âme. Par ce résultat en a augmenter l'inductance vers le centre, la diminution superficielle de la conductivité cause l'augmentation de la résistance.

La formule [II.20] suivante nous donne une bonne approximation pour le calcul de l'effet de peau :

$$Y_{CS} = \frac{11.18}{R_{dc}^2 + 8.8} \quad (\text{II. 20})$$

$Y_{CS}$  : Effet de peau exprimer comme le nombre ajouter au (dc) résistance.

$R_{dc}$  : Résistance de conducteur en micro-ohms calculée en courant continu dc.

La résistance «  $R'$  » qui tient compte de l'effet de peau à la fréquence de service (50 Hz), est donnée par la relation suivante :

$$R' = R (1 + Y_{CS}) \tag{II. 21}$$

En régime variable, la densité de courant n'est plus uniforme à l'intérieur du conducteur, elle est plus grande en surface qu'à l'intérieur.

En première approximation, on tient compte de l'effet de peau en remplaçant le conducteur plein par un conducteur creux fictif de même rayon et d'épaisseur ( $\delta$ ).

$$\delta = \frac{1}{\sqrt{\mu_0 \mu_r \pi f G_{con}}} : \text{est la profondeur de peau.} \tag{II. 22}$$

**II.3.1.2 Conductance linéique**

La conductance transversale par unité de longueur caractérise les pertes diélectriques le long de la ligne. Sur les circuits aériens en fil nus, elle dépend de la qualité des isolateurs et de l'humidité de l'air ambiant. Sur les circuits en câble, elle dépend de la qualité de l'angle de pertes des isolants. [Pinson 1997]

$$G' = \frac{G}{L_L} \quad [S/m] \tag{II. 23}$$

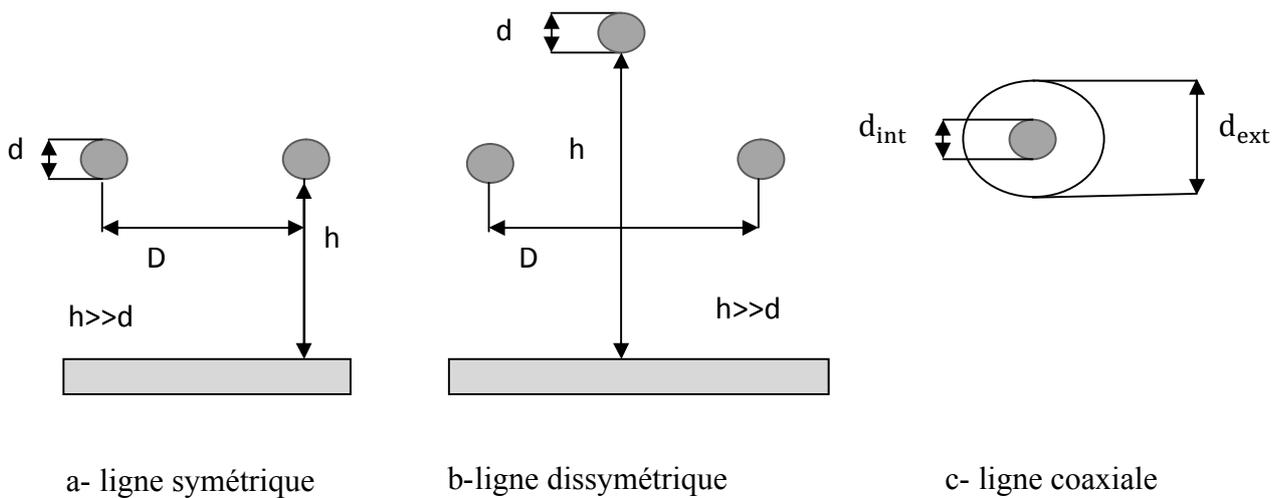


Figure. II.5 Différentes dispositions des lignes

Avec :

D : Distance entre phase [m].

h : Hauteur du conducteur par rapport au sol [m].

$d_{int}$  : Diamètre intérieur du conducteur coaxial [mm].

$d_{ext}$  : Diamètre extérieur du conducteur coaxial [mm].

### II.3.1.3 Inductance linéique et capacité linéique :

Le tableau (II.3) suivant représente les inductances et les capacités linéiques de différentes configurations géométriques de lignes données sur la figure.II.4.

Configuration de la ligne	inductance linéique [ $\mu\text{H}/\text{m}$ ]	Capacité linéique [pF/m]
Ligne symétrique	$L' = \frac{\mu_0 \mu_r}{\pi} \ln \frac{2D}{d}$ $L' = 0.92 \log_{10} \frac{2D}{d}$	$C' = \frac{12\epsilon_r}{\log_{10} \frac{2D}{d}}$
Ligne dissymétrique à plan de masse	$L' = 0.46 \log_{10} \frac{4h}{d}$	$C' = \frac{24\epsilon_r}{\log_{10} \frac{4h}{d}}$
Ligne coaxiale	$L' = \frac{\mu_0 \mu_r}{2\pi} \ln \frac{d_{ext}}{d_{int}}$ $L' = 0.46 \log_{10} \frac{d_{ext}}{d_{int}}$	$C' = \frac{24\epsilon_r}{\log_{10} \frac{D}{d}}$

Tableau II.3 Inductances et capacités linéiques. [Pinson 1997]

### II.3.2 Impédances propre $Z_{ii}$ et mutuelle $Z_{ij}$

On peut utiliser, pour le calcul des inductances propre et mutuelle L et l , la théorie classique des images électriques (Figure .II.6). Si l'on introduit dans les formules le module de  $\delta$ , les flux magnétiques calculés, et par conséquent les inductances, sont réels.

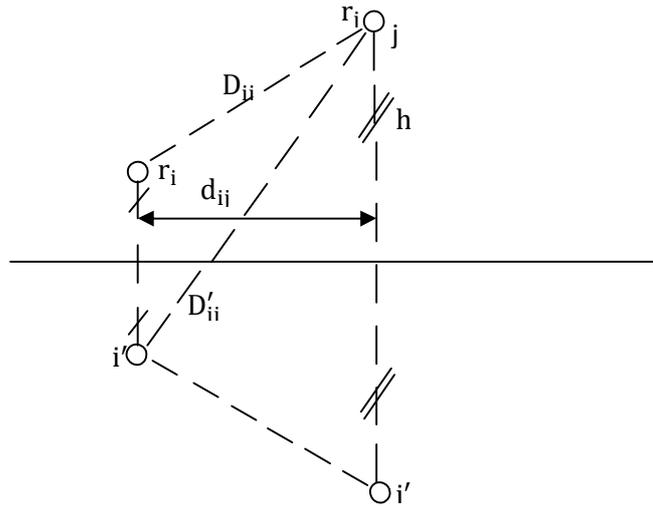


Figure .II.6 Méthode des images.

Mais si l'on introduit la valeur complexe de  $\delta$ , les flux et les inductances prennent eux-mêmes une valeur complexe. [Debu 1997]

### II.3.2.1 Impédance propre $Z_{ii}$

L'expression qui exprime l'impédance propre  $Z_{ii}$  dans la ligne électrique est donnée par la relation (II.24) suivante :

$$Z_{ii} = R_{ii} + j\omega(L + l) \tag{II. 24}$$

Avec

$l$  : Inductance propre du conducteur par rapport au sol.

$L$  : Inductance interne du conducteur.

$R_{ii}$  : Résistance interne du conducteur à la fréquence considérée.

On calcule  $L$  et  $L_{ij}$  par :

$$L = \frac{\mu_0}{8 \pi N} \tag{II. 25}$$

$$l = \frac{\mu_0}{2\pi} \ln \left[ \frac{2(h_i + \delta)}{r_i} \right] \tag{II. 26}$$

Avec :

$h_i$ : Hauteur moyenne du conducteur par rapport au sol [m] :

$$h_i = H - \frac{2}{3}F_L \tag{II. 27}$$

H : Hauteur d'ancrage.

$F_L$  : La flèche [m] qui sera calculée prochainement.

$r_i$  : Rayon du conducteur ou rayon équivalent pour les conducteurs en faisceau.

On obtient la relation générale de l'impédance propre :

$$Z_{ii} = R_{ii} + \omega \frac{\mu_0}{2\pi} \arctan\left(\frac{|\delta|}{\sqrt{2} h_i + \delta}\right) + j\omega \frac{\mu_0}{2\pi} \left( \ln \frac{2\sqrt{h_i^2 + \sqrt{2} h_i |\delta| + |\delta|^2}}{r_i} + \frac{1}{4N} \right) \quad (\text{II. 28})$$

Pour la fréquence industrielle «  $\delta$  » est très grand devant «  $h_i$  », On peut se contenter d'utiliser «  $\delta$  », ce qui revient à négliger les pertes, alors très faibles dans le sol et permet d'obtenir la formule simplifiée :

$$Z_{ii} = R_{ii} + \omega \frac{\mu_0}{2\pi} \ln\left(\frac{2|\delta|}{r_i}\right) \quad (\text{II. 29})$$

### II.3.2.2 Impédance mutuelle $Z_{ij}$

De façon générale, on a :

$$Z_{ij} = j\omega l$$

$L_{ij}$  : L'inductance mutuelle de deux conducteurs en présence du sol ; la relation s'écrit

$$l = \frac{\mu_0}{4\pi} \ln \left[ \frac{(h_i + h_j + 2|\delta|)^2 + d_{ij}^2}{(h_j - h_i)^2 + d_{ij}^2} \right] \quad (\text{II. 30})$$

Avec :

$d_{ij}$  : distance horizontale de ces deux conducteurs (distance qui sépare leurs projections sur le sol).

$h_j, h_i$  : hauteur moyenne des conducteurs au-dessus du sol.

L'impédance mutuelle s'écrit alors :

$$Z_{ij} = \omega \frac{\mu_0}{4\pi} \left( \arctan \frac{B_1}{A_1} + j \ln \frac{\sqrt{A_1^2 + B_1^2}}{(h_j - h_i)^2 + d_{ij}^2} \right) \quad (\text{II. 31})$$

Avec :

$$A_1 = (h_j + h_i)(h_j + h_i + 2\sqrt{2}|\delta|) + d_{ij}^2$$

$$B_1 = 2|\delta|(\sqrt{2}(h_j + h_i) + 2|\delta|)$$

## II.4 Etude des contraintes mécanique

Le calcul des contraintes mécanique (portées, flèche maximale, hauteur du conducteur...etc.) de la ligne dépend de plusieurs facteurs, climatique et atmosphérique. Notre étude consiste à faire un bon calcul de ces contraintes en tenant compte de ces facteurs dans le but d'avoir un bon dimensionnement pour une ligne électrique.

### II.4.1 Effort du vent

La force du vent dépend de sa vitesse et de la forme de l'obstacle, d'autre part une grande ligne ne subit pas une poussée égale en tous ses points. Par ailleurs les vents de poussées trop violentes et trop rapides sont contrariés par l'inertie des conducteurs et fait chasser ces derniers dans un plans très éloigné de la verticale. Certains vent se manifestes et produisent des vibrations transversales dans les conducteurs, il en résulte la naissance des contraintes mécanique alternées qui peuvent parfois entraînés la rupture de la ligne.

L'équation qui exprime l'effort du vent sur les lignes aériennes est donnée par la relation [II.32] : [Lilien2000]

$$F_R = C_x \cdot q \cdot w \quad [N /m] \quad (II. 32)$$

Avec :

$C_x$ : Est le coefficient aérodynamique donné en tableau.II.2

$w$  : La surface en  $m^2$  que l'élément présente au vent perpendiculairement à la direction dans la quelle il souffle.

$q$  : est la pression dynamique (en pascal).

Ou «  $q$  » se déduit de la pression de base «  $q_b$  », donnée en fonction de la vitesse du vent (fonction de la hauteur au-dessus du sol) dans le tableau.II.4 (page 30). Elle se calcule par la formule:

$$q_b = \frac{\rho_s \cdot V^2}{2g} \quad (II. 33)$$

Avec :

$p_s$  : Représente le poids spécifique de l'air [ $1,2 \text{ Kg/m}^3$ ] ;

$V$  : Est la vitesse du vent en [ $\text{m/s}$ ]

$g$  : Est l'accélération de la pesanteur [ $9,81 \text{m/s}^2$ ].

L'équation (II.34) peut se réécrire, dans le cas des lignes :

$$F_R = C_y \cdot q \cdot d$$

Avec :

$C_y$  : Est le coefficient de traînée de la ligne.

Par l'application d'un facteur correctif «  $f_c$  » la pression dynamique «  $q$  » peut se réécrire :

$$q = f_c \cdot q_b \quad (\text{II. 34})$$

Les valeurs de ce facteur «  $f_c$  » sont : [Lilien2000]

- Pour le calcul de l'effort du vent sur les supports, traverses, isolateurs :
  - 0.8 pour le vent horizontal maximum normal ;
  - 1.6 pour le vent horizontal maximum exceptionnel ;
- Pour le calcul de l'effort du vent sur les conducteurs actif, de garde et de terre :
  - pour les portées inférieures à 100m :
    - 0.7 pour le vent horizontal normal ;
    - 1.4 pour le vent horizontal exceptionnel ;
  - pour les portées supérieures à 100m :
    - 0.5 pour le vent horizontal normal ;
    - 1 pour le vent horizontal exceptionnel ;

Le tableau II.4 illustre la vitesse du vent et la pression dynamique en fonction de la hauteur. [Lilien2000]

Hauteur au-dessus du sol [m]	Vitesse du vent [m/s]	Pression dynamique de base « $q_b$ » [Pa]
Jusque 25	35	750
De 25 à 50	36,6	800
De 50 à 75	37,27	850
De 75 à 100	38,36	900
De 100 à 125	39,41	950
De 125 à 150	40,43	1000
De 150 à 175	41,43	1050
De 175 à 200	42,21	1100

Le tableau II.4 vitesse du vent et pression dynamique en fonction de la hauteur. [Lilien2000]

#### II.4.2 Calcul de la portée critique

Pour chaque type de conducteur, il existe une portée critique (Figure .II.7) en dessous de laquelle l'hypothèse hiver (-15°C et vent réduit) sera plus défavorable, tandis qu'au dessus ce sera l'hypothèse été (+15°C et de force maximale normale) qui conduira aux contraintes les plus élevées. Cette portée critique se calcule à l'aide de l'équation d'état (dite de Blondel) en exprimant que les tensions dans le conducteur doivent être égales pour les deux hypothèses en utilisant la tension maximale admissible, c'est-à-dire un tiers de la tension de rupture. [Lilien 2000]

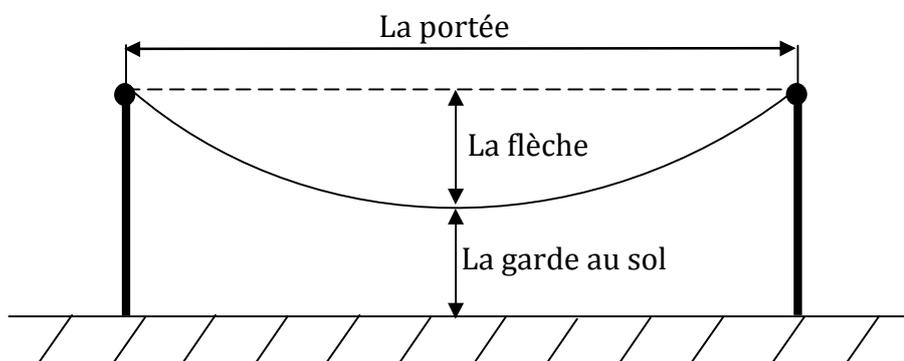


Figure .II.7. représente les différentes contraintes mécaniques de la ligne

Nous avons alors :

$$P_C = \sqrt{\frac{24 \alpha (\theta_{\text{été}} - \theta_{\text{hiver}}) T_{\text{MAX}}^2}{P_{\text{équ,été}}^2 - P_{\text{équ,hiver}}^2}} \quad [\text{m}] \quad (\text{II. 35})$$

Avec :

$$T_{\text{MAX}} = 1/3 T_{\text{rupture}} .$$

$T_{\text{MAX}}$  : L'effort de traction maximal admissible [N].

$T_{\text{rupture}}$  : L'effort de traction à la rupture de la ligne.

Dans le cas où la portée moyenne est inférieure à la portée critique, c'est la constante  $A_a$  associée à l'hypothèse hiver qui sera retenue, sinon ce sera celle associée à l'hypothèse été. Pour la calculer, nous utiliserons l'équation d'état:

$$\frac{P_{\text{équ}}^2 P_{\text{moy}}^2}{24 T_c^2} - \frac{T_c}{M_y S} - \alpha \theta = A_a \quad (\text{II. 36})$$

Où

$P_{\text{équ}}$  : Est le poids équivalent dans l'hypothèse retenue [N/m] ;

$P_{\text{moy}}$  : La portée moyenne [m] ;

$$T_c \cong T_{\text{max}}$$

$M_y$  : Est le module de Young [N/mm<sup>2</sup>] ;

$\theta$  : la température dans l'hypothèse retenue [°C].

Ceci donne un paramètre «  $A_a$  » adimensionnel.

### II.4.3 Flèche maximale et hauteur des conducteurs

Nous devons tout d'abord déterminer la tension qui règne dans notre portée. Pour cela nous prendrons l'équation d'état, qui se réduit à une équation du 3<sup>eme</sup> degré à 1 inconnue « $T_c$ ». Nous obtenons les trois racines (numériquement et/ou analytiquement).

[Lilien 2000]

$$\frac{P_{\text{équ}}^2 P_{\text{moy}}^2}{24 T_c^2} - \frac{T_c}{M_y S} - \alpha t = A_a \Leftrightarrow -\frac{T_c^3}{M_y S} - (A_a + \alpha t) T_c^2 + \frac{P_{\text{équ}}^2 P_{\text{moy}}^2}{24} = 0 \quad (\text{II. 37})$$

Des trois racines obtenues, deux sont complexes et nous les rejetterons. La tension de référence dans notre câble est donc déterminée. Maintenant, grâce à l'équation d'état, nous pouvons calculer les tensions dans notre câble pour les hypothèses été et hiver.

La formule qui suit exprime la flèche maximale en fonction de la tension :

$$F_{L \max} = \frac{P_{\text{éq}}^2 P_{\text{moy}}^2}{8 T_{H3}} \quad [\text{m}] \quad (\text{II. 38})$$

Les conducteurs devront être accrochés à une hauteur supérieure à

«  $F_{\max} + \text{garde au sol}$  ».

Pour la garde au sol, une hauteur de base de 6 m.

Soit, pour une ligne HT, la garde au sol peut s'écrire :

$$H_{\text{sol}} = 7 + \frac{U_n - 50}{100} \quad [\text{m}] \quad (\text{II. 39})$$

Le pylône bénéficie de fondations pour toute tension supérieure à 1 kV. La profondeur d'enfouissement est :

$$\text{Prof} = \frac{h}{10} + 1 \quad [\text{m}] \quad (\text{II. 40})$$

Avec un maximum de 3 m.

#### II.4.4 Détermination et choix de la longueur de la chaîne de suspension

Une chaîne de suspension, est une chaîne d'isolateurs qui est verticale ou oblique, à laquelle est suspendu le conducteur au pylône d'alignement. Elle peut être simple, double, ou en A ou en V.

Pour dimensionner la chaîne de suspension il faut tout d'abord calculer les paramètres suivants :

- La ligne fuite.
- Degré de salinité
- Tension nominale de tenue aux chocs de foudre « BIL » (basic insulation level) est l'effort de la rigidité diélectrique fréquemment donné en termes des niveaux d'isolement de base définis par les standards internationaux.

##### II.4.4.1 Calcul de la Ligne de fuite des isolateurs

La longueur de la ligne de fuite des isolateurs se calcule par la formule (II.41):

$$L_f = 1.1 U_M U_c \quad [\text{mm}] \quad (\text{II. 41})$$

$U_M$ : Tension la plus élevée pour le matériel [ $\text{KV}_{\text{eff}}$ ].

$U_c$  : Tension de contournement [ $\text{cm/kV}$ ].

Nous devons calculer le nombre d'assiettes nécessaires au maintien de la distance de contournement. Pour une approche rapide, nous utilisons le tableau. II.5 qui sui:

Tension $U_c$ [kV]	15	90	120	150
Nombre d'assiettes	1 à 2	5 à 6	6 à 7	7 à 8

Tableau. II.5 Choix du nombre d'assiettes en fonction du niveau de tension.

[Lillien 2000]

Pour avoir la longueur de la chaîne d'isolateur nous déterminons tout d'abord le degré de salinité, ensuite la tension de tenue aux chocs de foudre « BIL » et finalement la longueur de fuite "théorique" «  $L_f$  » qui devra être respectée par la chaîne de façon à protéger la ligne de façon correcte. [Lilien 2000]

En fonction de la zone de pollution retenue, nous allons pouvoir attribuer une valeur à la tension de contournement «  $U_c$  » [cm/kV] (tableau.II.6 page 34).

#### II.4.4.2 Degré de salinité

Les isolateurs pollués par un dépôt (naturel ou industriel) deviennent conducteurs lorsqu'ils sont humides, sur les parties diélectriques les plus résistantes où la densité de perte de courant est plus élevée, l'eau de la couche conductrice s'évapore sous l'effet de chaleur du courant.

Une "bande sèche" se forme sur ces surfaces, le plus souvent près des accessoires dont les extrémités sont métalliques. Des arcs de surface relient les bords des bandes sèches, pouvant ainsi amener le contournement complet avec un arc de puissance, si le niveau d'isolation de la chaîne d'isolateurs ne tient pas compte de l'importance de la pollution du site.

L'arc sur la bande sèche peut être éliminé ou minimisé par un contrôle approprié de la gradation de tension, de façon à réduire la contrainte électrique sur la surface.

Le tableau. II.6 nous indique le degré de salinité en fonction de la zone de pollution et les tensions de contournement correspondantes.

	Zone de pollution		
Salinité [kg/m <sup>3</sup> ]	7	20	80
Niveau	Faiblement polluée	moyennement polluée	fortement polluée
Localisation	majeure partie du territoire	Zones éloignée de quelque kilomètre du bord de mer ou des industries	bord de mer et proximité d'industries
U <sub>c</sub> [cm/kV]	1.48	1.83	2.34

Tableau. II.6 représente le degré de salinité en fonction de la zone de pollution.

[Lilien 2000]

#### II.4.4.3 Tension nominale de tenue aux chocs de foudre « BIL »

Cette méthode, fait intervenir d'autres critères de dimensionnement (en plus de la tension nominale). Nous avons, d'une part, la tension la plus élevée admissible par le matériel [U<sub>M</sub>] et, d'autre part, la tension nominale de tenue aux chocs de foudre « BIL » (Basic Insulation Level). Les normes C.E.I. ont établi le tableau. II.7:

#### II.4.5 Choix de la chaîne d'isolateurs

Nous déterminons le « BIL » (à partir de U<sub>c</sub>, tableau.II.6), le niveau de pollution (définit la valeur de U<sub>c</sub>) et l'effort de traction maximal « T<sub>MAX</sub> » (par l'équation (II.36)) auquel la chaîne sera soumise.

Nous considérons d'abord des assiettes de type « standard ». En fonction de l'effort de traction « T<sub>MAX</sub> » que la chaîne devra supporter, nous choisissons, parmi les modèles d'assiettes convenant, celui de pas le plus petit parmi la liste proposée au tableau.II.8 (page 36).

En se référant au tableau.II.9 (page 36), nous déterminons le nombre « N<sub>1</sub> » d'assiettes nécessaires via le modèle d'assiette (le pas) et le « BIL ». [Lilien 2000]

Nous déterminons le nombre « N<sub>2</sub> » en vérifiant que la longueur de la ligne de fuite est suffisante :

$$N_2 = \frac{L_f}{\text{longueur de fuite effective d'une assiette}} \quad (\text{II. 42})$$

Comparant  $N_1$  et  $N_2$ , si le module de leur différence est inférieur à 5, alors le nombre d'assiettes est la plus grande des deux valeurs «  $N_1$  » et «  $N_2$  ». Dans le cas contraire, nous considérons que les conditions sont néfastes et avons recours à des assiettes de type « Antifog ». Ces dernières sont surdimensionnées au point de vue de la ligne de fuite par rapport aux assiettes « standard ». Dans ce cas, nous recommençons le calcul en se basant sur les tableaux. II.9 et II.10 (page 36 et 37).

Une fois les caractéristiques de pas et masse de l'assiette ainsi que le nombre d'assiettes déterminées, nous pouvons calculer la longueur « SL » et le poids de la chaîne d'isolateurs.

	Tension nominale de la ligne $U_n$ [KV <sub>eff</sub> ]	Tension la plus élevée pour le matériel $U_M$ [KV <sub>eff</sub> ]	Tension nominale de tenue aux chocs de foudre BIL [KV <sub>crête</sub> ]
Classe A $1 \leq U_m \leq 52$	3	3.6	40
	6	7.2	60
	10	12	75
	15	17.5	95
	20	24	125
	30	36	170
Classe B $52 \leq U_m \leq 300$	50	52	250
	70	72.5	325
	110	123	450
	130	145	550
	150	170	650
	220	245	750

Tableau.II.7 Tension nominale de tenue aux chocs de foudre. [Lilien 2000]

Type standard	Effort en tête						
	70	100	120	160	210	240	300
Caractéristiques d'une assiette	F70/120	F100/127	F120/127	F160/146	F210/170	F240/170	F300/195
Pas [mm]	127	127	127	146	170	170	195
Ligne de fuite [mm]	320	318	315	380	380	380	485
Masse [kg]	3.5	3.7	3.8	6.0	7.1	7.4	10.9

Tableau.II.8 Caractéristiques d'assiettes standard. [Lilien 2000]

Type standard	Pas [mm]			
	127	146	170	195
Nombre d'assiettes	BIL [KV]			
2	190	190	205	225
3	260	270	285	315
4	320	340	360	405
5	380	410	440	495
6	435	480	520	580
7	490	550	600	665
8	550	620	675	745
9	615	690	755	830
10	675	760	835	910
11	735	830	915	990
12	795	900	990	1070

Tableau.II.9. Nombre d'assiettes (standard) vis- à- vis de BIL. [Lilien 2000]

Type Antifog	Effort en tête					
	100	120	160	210	240	300
Caractéristiques d'une assiette	F100P/146	F120P/146	F160P/170	F210P/170	F240P/170	F300P/195
Pas [mm]	146	146	170	170	170	195
Ligne de fuite [mm]	445	445	545	530	530	690
Masse [kg]	5.6	6.7	8.5	9.5	10.4	15.2

Tableau.II.10 : Caractéristiques d'assiettes Antifog. [Lilien 2000]

Type Antifog	Pas [mm]		
	146	170	195
Nombre d'assiettes	BIL [KV]		
2	235	270	280
3	320	370	390
4	390	450	495
5	465	540	600
6	545	625	700
7	620	710	810
8	695	800	910
9	775	890	1015
10	855	980	1120
11	935	1070	1230
12	1015	1170	1340

Tableau.II.11 : Nombre d'assiettes (Antifog) vis-à-vis de BIL. [Lilien 2000]

**II.4.6 Calcul de la distance phase/phase D et phase/terre h**

L'écartement vertical entre phases,  $E\phi\phi$ , vaut : [Lilien 2000]

$$D = \frac{U_n}{150} + CFI\sqrt{F_{L_{max}} + SL} \quad [m] \quad (II.43)$$

Où

CFI : Coefficient qui dépend de la nature du conducteur.

SL : la longueur de la chaîne d'isolateur [m].

La distance verticale minimale entre phases et terre vaut :

$$h = \frac{U_n}{150} \quad [\text{m}] \quad (\text{II. 44})$$

## II.5 Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons donné les principales formules qui permettent d'établir un dimensionnement correct et les différentes contraintes qui interviennent sur les lignes aériennes, parmi eux les contraintes physiques qui nous amènent aux calculs des différents paramètres qui constituent la ligne (résistance, inductance, capacité, conductance), et le choix de la section optimale qui repose sur le calcul des critères techniques (courant nominale, courant de court-circuit, et la chute de tension), les contraintes atmosphériques et mécaniques sont regroupées dans une équation d'état dite équation de Blondel afin de déterminer les portées (été, hiver, critique), ainsi que la tension mécanique avec laquelle le conducteur est soumis par les pylônes qui doivent être inférieure à la tension de rupture.

Pour dimensionner une chaîne d'isolateur il faut tenir compte de degré de salinité de la région considéré qui définit la valeur de la tension de contournement. Pour ne pas avoir des décharges entre les conducteurs et la terre il faut avoir des écartements horizontaux (entre phase) et verticaux (entre terre et phase), ces distances sont proportionnelles à la tension transportée, ainsi que la hauteur et le gabarit des pylônes.

L'influence des lignes aériennes sur l'environnement fait l'objet de nombreuses études, pour nous donner une idée de cette influence nous nous intéressons au calcul des champs électriques et magnétiques dans notre prochain chapitre.



# *CHAPITRE III*

## *Calcul des champs électriques et magnétiques*

### III.1 Introduction

Les conséquences du transport d'énergie électrique à des hauts niveaux de tension est l'apparition de l'effet couronne, qui est à l'origine des pertes électrique importante et des vibrations mécaniques. Les oscillations électromagnétique occupent une place importante, et au cours de ces oscillations, les grandeurs électrique et magnétique varient périodiquement (les charges, les courants, les champs magnétique et électrique). On sait que le champ électrique dépend de la charge de la ligne, l'induction magnétique est directement proportionnel au courant, donc il est indispensable de connaître leurs profils pour des raisons de sécurité (éviter tout contournement électrique), pour maintenir entre toute structure est les conducteurs une distance suffisante, et d'indiquer le niveau maximum qui peuvent atteindre vis-à-vis de l'exposition permanente du grand publique.

Nous allons présenter dans ce chapitre les différents phénomènes (effet couronne, champs électrique et magnétique) et les résultats du calcul obtenu par les différentes formules.

### III.2 Perturbation due à l'effet couronne

#### III.2.1 Effet couronne

Effet couronne désigne l'ensemble des phénomènes liés à l'apparition d'une conductivité suite à l'ionisation d'un gaz entourant un conducteur porté à une haute tension. L'appellation effet couronne vient du fait qu'autour d'un fil apparait, à partir d'une certaine valeur de potentiel, une gaine lumineuse bleu-violet dont l'épaisseur augmente avec la tension.

L'effet couronne est lié à l'apparition d'avalanches électronique localisé au voisinage immédiat des conducteurs soumis à une haute tension, au voisinage de fil plus épais, comme les câbles industriels, les avalanche prennent la forme d'aigrettes dont la longueur peut atteindre une dizaine de centimètres. Ces avalanches sont toujours issues des diverses aspérités portées par les conducteurs, pollution, insectes, gouttes d'eau quand il pleut, ou il existe un renforcement local du champ électrique.

Les décharges couronne peut se produire non seulement autour des conducteurs filiformes mais aussi près de tout conducteur présentant une forte courbure telles que les pointes, les arrêtes, etc....

Le calcul de la valeur de l'effet couronne consiste à vérifier que le champ superficiel reste bien inférieur à  $18\text{KV}_{\text{eff}}/\text{cm}$ . Ce champ  $E_{\text{max}}$  se calcul par la formule (III.1) : [Lilien 2000]

$$E_{\text{MAX}} = \frac{U_{\text{eff}}}{r \ln \left( \frac{2 h D}{r \sqrt{4h^2 + D^2}} \right)} \quad [\text{KV}_{\text{eff}}/\text{cm}] \quad (\text{III. 1})$$

Avec :

$h$  : représente la distance minimale entre un conducteur et le sol[m].

$U_{\text{eff}}$  : la valeur efficace de la tension nominale[ $\text{KV}_{\text{eff}}$ ].

$r$  : rayon du conducteur[cm].

### III.2.2 Calcul des pertes

Les pertes de puissance active par phase dû à l'effet couronne peuvent être approximativement pour une ligne triphasée symétrique par la formule(III.2) suivante : [Michel 1]

$$P_C = 2.41 \frac{f + 25}{\rho_{\text{air}}} \sqrt{\frac{r}{D}} (V_s - V_c)^2 \quad \left[ \frac{\text{W}}{\text{Km}} \cdot \text{phase} \right] \quad (\text{III. 2})$$

Avec:

$V_s$  : tension simple du réseau triphasé symétrique[ $\text{KV}_{\text{eff}}$ ].

$V_c$  : tension simple d'apparition de l'effet couronne[ $\text{KV}_{\text{eff}}$ ].

$\rho_{\text{air}}$  : densité de l'air.

### III.2.3 Remarque

La formule (III. 2) est valable pour  $\frac{V_s}{V_c} < 1.8$  des fréquences proches à des fréquences industrielles (50 ou 60) Hz.

Le tableau.III.1 qui suit représente les pertes pour différentes tensions de service en fonction de la section du conducteur. [Pirotte 1972]

### III.2.4 Les manifestations de l'effet couronne

Au niveau du transport de l'énergie électrique, l'effet de couronne est la source de pertes électriques, d'interférences radiophoniques et télévisuelles, de bruits audibles, de la détérioration de l'état de surface des composantes et de vibrations mécaniques. De plus, les sous-produits de l'effet de couronne dans les milieux isolants de certains disjoncteurs (SF6) et transformateurs (huile), diminuent leur pureté et leurs propriétés isolantes. Les décharges électriques dans l'air génèrent aussi de l'ozone.

### III.3 Calcul du champ électrique superficiel des conducteurs

Connaissant les charges superficielles  $Q$  des conducteurs, on en déduit facilement les gradients superficiels de tension par application du théorème de Gauss. [Debu 1997]

Dans le cas d'un conducteur de rayon  $r_G$ , le champ électrique est :

$$E = \frac{Q}{2\pi\epsilon_0 r_G} \quad (\text{III. 3})$$

Avec :

$E$  : champ superficiel [V/Cm].

$Q$  : charge superficielle par unité de longueur [c/m].

$\epsilon_0 = \frac{1}{36\pi} 10^{-9}$  : est la permittivité du vide en [f / m].

$r_G$  : rayon de Gauss [Cm].

### III.4 Champ électrique pour des systèmes usuels

Pour des systèmes usuels simples. Le champ électrique peut être calculé en utilisant le théorème de Gauss ou la méthode des images électriques. [Legros 1997]

#### III.4.1 Conducteur cylindrique concentrique

Pour  $r_1 \leq r_G \leq r_2$  :

$$E(r_G) = \frac{U}{r_G \ln \frac{r_2}{r_1}} \quad (\text{III. 4})$$

$$E_{\max} = E(r_1) = \frac{U}{r_1 \ln \frac{r_2}{r_1}} \quad (\text{III. 5})$$

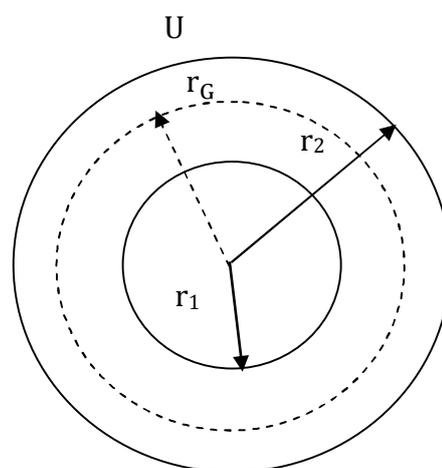


Figure .III.1 Conducteur cylindrique

Avec :

U : tension du conducteur.

$r_1$  : rayon intérieure du conducteur cylindrique.

$r_2$  : rayon extérieure du conducteur cylindrique.

Section du conducteur (mm <sup>2</sup> )	Nombre de conducteur par phase	Champ électrique KV/Cm	$\Delta P_{\text{COURONNE MAX}}$ KW/Km	$\Delta P_{\text{COURONNE Min}}$ KW/Km
Tension de service 220 KV				
240	1	25,2	2,7	1,2
300	1	23,5	2,0	0,8
400	1	20,7	1,0	0,4
500	1	19,0	0,7	0,3
Tension de service 330 KV				
240	2	25,7	6,3	2,7
300	2	23,9	4,6	1,9
400	2	21,2	2,5	1,0
500	2	19,3	1,6	0,5
Tension de service 500 KV				
240	3	25,4	11,5	4,9
300	3	24,0	12,2	5,2
400	3	21,8	7,5	3,0

Tableau.III.1 les pertes pour différentes tensions de service en fonction de la section du conducteur.

### III.4.2 Ligne bifilaire

On considère que la ligne est constituée de deux conducteurs cylindriques d'axe parallèles de même rayon ( $r$ ) et isolée de tout corps, nous supposons aussi que  $D \gg r$  (Figure. III.2), ceci pour pouvoir considérer que la charge se répartit uniformément à la surface de chacun des conducteurs. [Legros 1997]

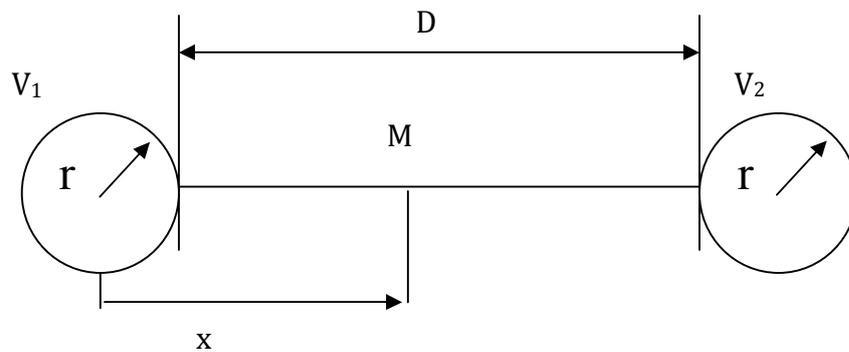


Figure. III.2 Ligne bifilaire

On désigne par :

$V_1$  : le potentiel porté par le conducteur 1,

$V_2$  : le potentiel porté par le conducteur 2,

$M$  : un point quelconque entre les deux conducteurs.

$x$  : étant la distance qui sépare le conducteur 1 au point  $M$ .

L'intensité du champ électrique «  $E$  » en un point quelconque «  $x$  » situé sur le plan des axes des deux conducteurs a pour expression :

$$E(x) = \frac{U}{2 \ln \frac{D+r}{r}} \left[ \frac{1}{x} + \frac{1}{D+2r-x} \right] \quad (\text{III. 6})$$

Avec :

$$V_1 - V_2 = U$$

Le champ maximum est obtenu à la surface du conducteur à ( $x = r$ )

$$E(r) = E_{\max} = \frac{U}{2 \ln \frac{D+r}{r}} \left[ \frac{1}{r} + \frac{1}{D+r} \right] \quad (\text{III. 7})$$

Comme  $D \gg r$  :

$$E_{\max} = \frac{U}{2r \ln \frac{D}{r}} \quad (\text{III. 8})$$

### III.4.3 Le système conducteur terre

L'intensité du champ électrique  $E$  en un point quelconque  $Y_y$  tenu compte que  $h \gg r$  (Figure. III.3) pour pouvoir considérer que la charge électrique se répartie uniformément sur le conducteur est donnée par l'expression (III.9): [Legros 1997]

$$E(x) = \frac{U}{\text{Ln} \frac{2h-r}{r}} \left[ \frac{1}{Y_y} - \frac{1}{2h-Y_y} \right] \quad (\text{III.9})$$

Avec :

$U$  : potentiel du conducteur par rapport au sol.

$Y_y$ : c'est la distance qui sépare le conducteur au point  $y'$ .

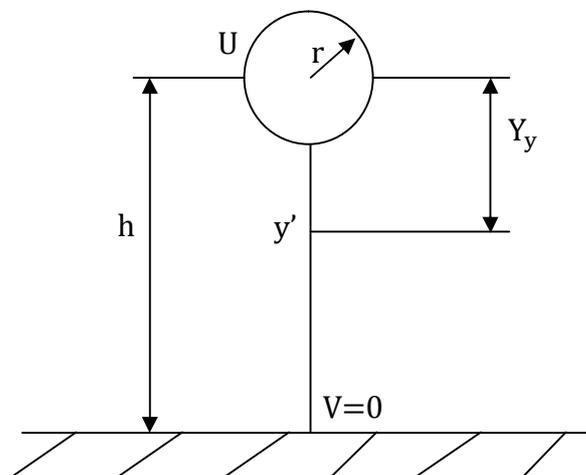


Figure. III.3 Système conducteur terre

La relation (III.9) peut être établie en utilisant la méthode des images électriques.

Le champ maximum ( $Y_y=r$ ) dans le cas où  $h \gg r$  :

$$E(r) = E_{\max} = \frac{U}{r \text{Ln} \frac{2h}{r}} \quad (\text{III.10})$$

### III.4.4 Système à trois conducteurs

Pour calculer le champ créé par trois conducteurs, on va utiliser la méthode des images.

### III.4.4.1 Méthode des images

La première étape consiste à calculer les coefficients de potentiel par l'application directe de la théorie des images. Le sol, au potentiel zéro, est remplacé par des conducteurs par rapport à ce plan. [Pirotte 1972]

Soient  $i, j, \dots$  les conducteurs réelles et  $i', j', \dots$  les conducteurs images, en se référant à la figure. II.5 il vient :

$$D_{ij} = \sqrt{(h_j - h_i)^2 + d_{ij}^2} \quad (\text{III. 11})$$

$$D'_{ij} = \sqrt{(h_j + h_i)^2 + d_{ij}^2} \quad (\text{III. 12})$$

Avec :

$D'_{ij}$  : la moyenne géométrique des distances d'un conducteur de l'image de l'autre.

$D_{ij}$  : la distances entre les conducteurs  $i, j$ .

Les coefficients de potentiel de Maxwell s'écrivent en m/F :

$$\lambda_{ii} = \frac{1}{2\pi\epsilon_0} \ln \frac{2h_i}{r_i} \quad (\text{III. 13})$$

$$\lambda_{ij} = \frac{1}{2\pi\epsilon_0} \ln \frac{D'_{ij}}{D_{ij}} \quad (\text{III. 14})$$

Dans le cas d'une ligne triphasée à un terne sans câble de garde la matrice carrée des coefficients de potentiel prend la forme.

$$\lambda = \begin{bmatrix} \lambda_{11} & \lambda_{12} & \lambda_{13} \\ \lambda_{21} & \lambda_{22} & \lambda_{23} \\ \lambda_{31} & \lambda_{32} & \lambda_{33} \end{bmatrix} \quad (\text{III. 15})$$

Par inversion, on obtient la matrice des capacités qui, multipliée par la matrice colonne des potentiels exprimés en V, donnera les charges linéiques portées par les conducteurs respectifs en C/m.

$$Q = [C] [V] \quad (\text{III. 16})$$

Considérons une ligne triphasée en triangle (figure.III.5). Compte tenu des conventions pour les courants choisis, le champ électrique en un point P de coordonnées  $(x, y, z)$  s'écrit d'après le théorème de Gauss:

$$E = \frac{Q}{2\pi\epsilon_0 r_G} \quad (\text{III. 17})$$

Avec :

$$\vec{r}_G = (x_m - x_n)\vec{i} + (y_m - y_n)\vec{j} \quad (\text{III. 18})$$

La composante horizontal suivant l'axe des « x » du champ électrique « E » créée par les trois conducteurs est :

$$E = \frac{Q}{2\pi\epsilon_0 \sqrt{(x_m - x_n)^2 + (y_m - y_n)^2}} \quad (\text{III. 19})$$

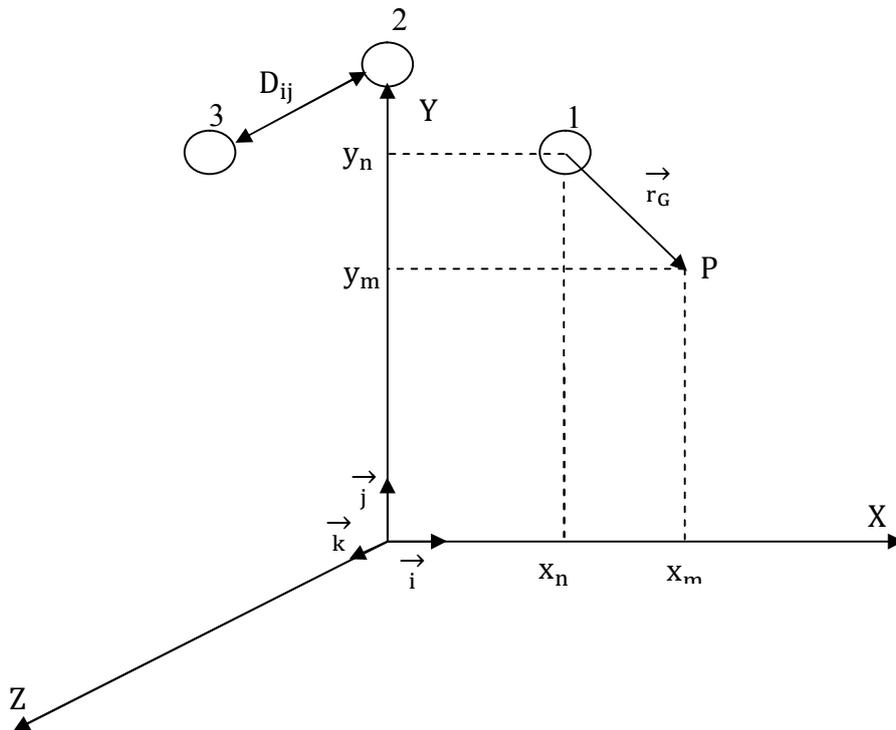


Figure.III.4 le champ électrique crée à un point P dans l'espace.

### III.5 Conducteurs en faisceau

Les lignes à très haute tensions, supérieure à 300KV, sont équipées presque exclusivement de faisceaux de plusieurs conducteurs par phase (Figure. III.5). Cette disposition permet de maintenir les champs superficiels des conducteurs à des valeurs admissibles.

Un faisceau est caractérisé par les grandeurs suivantes :

$r_{eq}$ : rayon équivalent du faisceau ;

$r$  : rayon de cercle circonscrit au faisceau (cercle passant par les centres de tous les conducteurs).



La première loi fondamentale de la magnétostatique nous donne d'après le théorème d'ampère :

$$\oint \vec{H} \cdot d\vec{l} = NI \quad (\text{III. 22})$$

H : c'est le champ magnétique.

d $l$  : élément élémentaire de longueur  $L_L$  .

Nous allons l'appliquer dans le cas du fil long et rectiligne parcouru par un courant donné I.

Considérons un cercle de contour (c), dans un plan perpendiculaire à l'axe du conducteur, centré sur celui-ci (Figure.III.6). Pour des raisons de symétrie, le champ magnétique H est constant tout au long du cercle.

Si le rayon de celui-ci est r, le champ magnétique sera donné par :

$$H = \frac{I}{2\pi r} \quad [\text{A/m}]$$

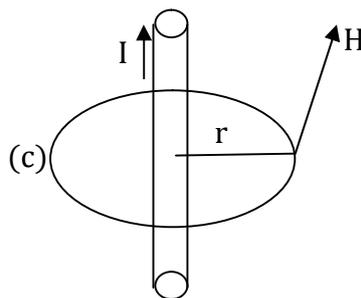


Figure.III.6 circulation d'un champ magnétique le long d'une courbe fermée

La relation qui relie le champ et l'induction magnétique est donnée par :

$$\vec{B} = \mu \vec{H} \quad (\text{III. 23})$$

Avec :

$\mu$ : est la perméabilité du matériau qui vaut  $\mu = \mu_0 \mu_r$

La densité de flux magnétique (ou champ d'induction magnétique) est alors :

$$B = \frac{\mu I}{2\pi r} \quad [\text{T}] \quad (\text{III. 24})$$

B est dirigé tangentiellement aux cercles centrés sur le conducteur et est contenu dans le plan perpendiculaire à celui-ci.

Le calcul précis du champ magnétique nécessite un sol parfaitement conducteur. Dans la plupart des applications, il suffit de considérer les conducteurs de phase en espace libre, sans tenir compte des images.

En système triphasé équilibré on a :

$$\bar{I} = I \begin{bmatrix} 1 + j0 \\ -\frac{1}{2} + j\frac{\sqrt{3}}{2} \\ -\frac{1}{2} - j\frac{\sqrt{3}}{2} \end{bmatrix} \quad (\text{III. 25})$$

D'où on en déduit :

$$\bar{B}_i = \frac{\mu_0 I_i}{2\pi r_i} \quad i = 1,2,3 \quad [\text{T}] \quad (\text{III. 26})$$

Et les termes «  $\bar{B}_i$  » et «  $I_i$  » ont des valeurs complexes. [Maddock 1992]

### III.7 Induction magnétique pour un système triphasé

Considérons une ligne triphasée (figure.III.7).l'induction magnétique créée par les trois phases s'écrit d'après le théorème de Biot et savart (III. 26):

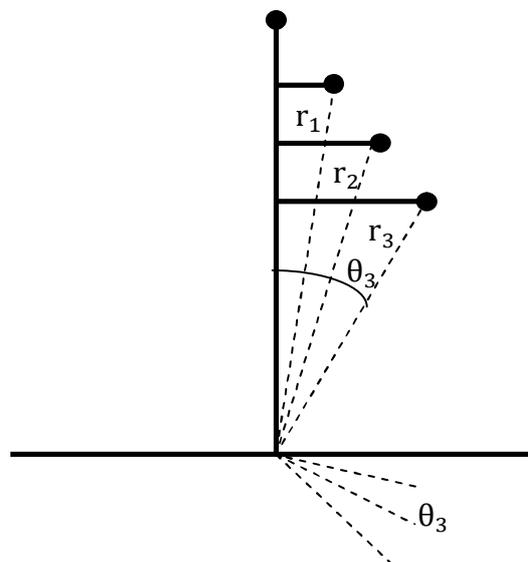


Figure.III.7 schéma de calcul du champ magnétique total

Les composantes verticales et horizontales du champ d'induction magnétique s'expriment alors par les relations (III.27) et (III.28) suivantes:

$$B_x = B_1 \cos(\theta_1) + B_2 \cos(\theta_2) + B_3 \cos(\theta_3) \quad (\text{III. 27})$$

$$B_y = -[B_1 \sin(\theta_1) + B_2 \sin(\theta_2) + B_3 \sin(\theta_3)] \quad (\text{III. 28})$$

Ou :

$\theta_1, \theta_2, \theta_3$  c'est les angles qui forment les conducteurs avec l'axe du pylône.

Nous allons exprimer ces deux composantes sous la forme de la relation (III.29) :

$$\begin{cases} B_X = a_x + jb_x \\ B_Y = c_y + jd_y \end{cases} \quad (\text{III. 29})$$

On peut voir immédiatement que si la condition  $a_x \cdot d_y = b_x \cdot c_y$  est satisfaite, le vecteur-champ à une et une seule direction. Sinon il est elliptique. Nous allons donc déterminer le module et l'inclinaison du grand axe et du petit axe de l'ellipse (figure.III.8). [Maddock 1992]

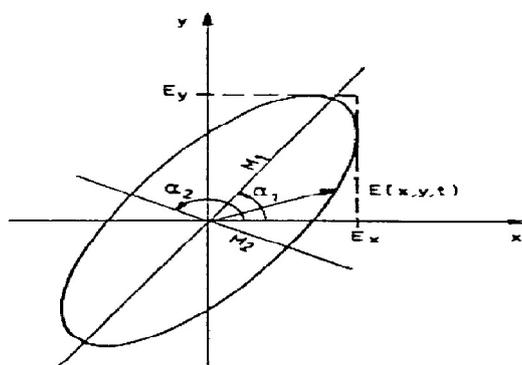


Figure.III.8 représentation vectorielle d'un champ elliptique

Le module du vecteur-champ s'exprime en fonction du temps à partir de (III.30) par :

$$M^2 = B_X^2 + B_Y^2 \quad (\text{III. 30})$$

$$M^2 = (a_x^2 + c_y^2)\cos^2(\omega t) + (b_x^2 + d_y^2)\sin^2(\omega t) + 2(a_x \cdot b_x + c_y \cdot d_y)\cos(\omega t)\sin(\omega t)$$

Les extremums de  $M_2$  seront obtenus en utilisant la relation (III.31):

$$\frac{dM^2}{d(\omega, t)} = 0 \quad (\text{III. 31})$$

Soit :

$$2[(b_x^2 + d_y^2) - (a_x^2 + c_y^2)]\sin(\omega t)\cos(\omega t) + 2(a_x b_x + c_y d_y)(\cos^2(\omega t) - \sin^2(\omega t)) = 0$$

En divisant la relation (III.31) par  $\cos^2(\omega t)$  et en posant  $\text{tg}(\omega t) = \rho_1$  on obtient :

$$\rho_1 = \frac{k \pm \sqrt{k^2 + 4}}{2} \quad (\text{III. 32})$$

Avec :

$$k = \frac{(b_x^2 + d_y^2) - (a_x^2 + c_y^2)}{(a_x \cdot b_x + c_y \cdot d_y)}$$

D'autre part :

$$\cos(\omega t) = \frac{1}{\sqrt{1 + \rho_1^2}} \quad \text{et} \quad \sin(\omega t) = \frac{\rho_1}{\sqrt{1 + \rho_1^2}}$$

Les deux solutions de  $r$  fournissent les deux inclinaisons  $\alpha_1$  et  $\alpha_2$  des deux axes, soit :

$$\text{tg}\alpha_1, \text{tg}\alpha_2 = \frac{a_x + b_x \cdot \rho_1}{c_y + d_y \cdot \rho_1}$$

Avec :

$$\text{tg}\alpha_1 \cdot \text{tg}\alpha_2 = -1$$

Ainsi que leurs modules :

$$M_1, M_2 = \sqrt{\frac{1}{1 + \rho_1^2} [(a_x^2 + c_y^2)\rho_1^2 + (b_x^2 + d_y^2) + 2(a_x \cdot b_x + c_y \cdot d_y)\rho_1]} \quad (\text{III. 33})$$

C'est la valeur maximale de  $M_1$  et  $M_2$  qui nous intéresse et que nous garderons comme valeur de l'intensité du champ magnétique.

### III.8 Conclusion

Dans ce chapitre on a donné les différents phénomènes principaux qui peuvent influencer sur les lignes d'énergie électrique, lors de l'effet couronne, l'énergie dissipée est à l'origine de pertes électriques et les impulsions électriques associées aux aigrettes entraînent des perturbations radioélectriques, en plus on a donné les lois et les niveaux maximum des profils des champs magnétique et électrique dans le but d'avoir un bon dimensionnement et une sécurité, soit pour notre ligne de maintenir entre toute les différents structures (phase-phase et phase-terre) une distance suffisante, soit pour le grand public et leurs exposition permanent vis-à-vis de ces lignes électrique.

Dans le prochain chapitre on va étudier les caractéristiques des lignes (caractéristique RLC), ainsi que le calcul des impédances transversales et longitudinales, on plus on va définir les lois de l'impédance et la capacité homopolaire des lignes électriques aériennes.

## *CHAPITRE IV*

### *Calcul des paramètres caractéristiques d'une ligne*

### IV.1 Introduction

Les lignes aériennes constituent des circuits de transmission des réseaux triphasés reliant des générateurs aux charges. Chacune possède ses propres caractéristiques résistive, inductive et capacitive. Nous allons étudier les caractéristiques longitudinales (les résistances des conducteurs et les inductances entre les conducteurs) et les caractéristiques transversales (la capacité des conducteurs) d'une ligne aérienne.

Les résultats d'une analyse des caractéristiques R, L et C d'une ligne sont vitales dans le cadre de la modélisation d'un réseau. Avant d'entamer le calcul des ces paramètres, on donne un aperçu sur les systèmes équilibrés et déséquilibrés ainsi pour les réseaux symétriques.

### IV.2 Systèmes équilibrés et déséquilibrés

Les réseaux sont dit « parfaitement équilibré » si les amplitudes des courants de chaque phase ainsi que les amplitudes des tensions entre phases et terre sont égales ( $I_1 = I_2 = I_3 = I$  et  $U_1 = U_2 = U_3 = U$ ). [Turan 1988]

Pour un système triphasé parfaitement équilibré, ceci se traduit par le système d'équations :

$$\begin{cases} i_1 = I \sin \omega t \\ i_2 = I \sin(\omega t - \frac{2\pi}{3}) = a i_1 \\ i_3 = I \sin(\omega t - \frac{4\pi}{3}) = a^2 i_1 \end{cases} \quad [A] \quad (IV. 1)$$

Ou :

$$a = e^{-j\frac{2\pi}{3}} \quad ; \quad I = \sqrt{2} I_{\text{eff}}. \quad [A]$$

Et donc:

$$\sum_{K=1}^3 i_K = 0$$

Ce qui signifie que la somme des courants de phase est nulle.

$$\begin{cases} U_{1n} = U \sin(\omega t + \varphi) \\ U_{2n} = U \sin(\omega t + \varphi - \frac{2\pi}{3}) = aU_{1n} \\ U_{3n} = U \sin(\omega t + \varphi - \frac{4\pi}{3}) = a^2U_{1n} \end{cases} \quad [V] \quad (IV.2)$$

Ou :

$$U = \sqrt{2} \cdot U_{\text{eff}} \quad [V]$$

Et donc:

$$\sum_{k=1}^3 U_{Kn} = 0.$$

Ce qui signifie que la somme des tensions phase /neutre est nulle.

En haute tension, on peut considérer le réseau comme équilibré (U et I) en régime de fonctionnement normal.

Lors d'une perturbation sur une ligne (chute de la foudre, défaut à la terre ;...), les courants de phase ou les tensions de phase/terre ne sont plus égales. Nous avons un courant de retour qui circule par le fil de garde (s'il existe) ou par la terre.

En pratique, il est impossible d'obtenir un équilibre parfait. Les systèmes déséquilibrés géométriquement (différence des impédances mutuelles entre conducteurs de phases) peuvent être compensés par des méthodes de transposition. Les systèmes déséquilibrés électriquement sont traité par les méthodes de composantes. Dans ce cas, il faut tenir compte des conducteurs de phases mais aussi du fil de garde et de la terre. [Turan 1988]

### IV.3 Les réseaux symétriques

Tous les réseaux électriques peuvent être représentés à l'aide d'une matrice impédance « Z »:

Tous les réseaux équilibrés peuvent être découplés et finalement être étudiés sur la base d'un seul circuit monophasé équivalent dont les impédances dites «effectives» incluent les couplages entre phases.

La résolution de ce seul circuit donne alors immédiatement la solution globale du circuit triphasé complet, il suffit de considérer un déphasage de  $120^\circ$  entre les différentes phases. Par contre tous les réseaux déséquilibrés peuvent également être découplés, mais ceci nécessite l'analyse de trois circuits séparés (régimes directe, inverse et homopolaire) dont les impédances sont différentes. L'intérêt de ce découplage est qu'il permet de supprimer les impédances mutuelles qui maintiennent un couplage fort entre phases. [Turan 1988]

La notion mathématique de diagonalisation de matrice trouve ici une application concrète et un intérêt primordial, et dont l'interprétation physique est évidente tant en régime équilibré (un seul système : direct) que déséquilibré (trois système : direct, inverse et homopolaire). Finalement, le système équilibré peut se réduire à trois relations identiques (déphasé de  $120^\circ$ ) si la matrice d'impédance « Z » est de symétrie circulaire, soit :

$$\begin{bmatrix} U_1 \\ U_2 \\ U_3 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} Z_A & Z_B & Z_C \\ Z_C & Z_A & Z_B \\ Z_B & Z_C & Z_A \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_1 \\ i_2 \\ i_3 \end{bmatrix} \quad (\text{IV. 3})$$

Avec :

$Z_A, Z_B$  et  $Z_C$  : représentent respectivement les impédances des phases 1, 2 et 3.

$U_1, U_2$  et  $U_3$  : sont les tensions de phases.

$i_1, i_2$  et  $i_3$  : sont les courants de phases.

L'analyse du système total se réduit alors à l'étude d'une phase unique (gain de temps).

Si la matrice d'impédance est de symétrie complète ( $Z_B = Z_C$ ), le système se réduit à trois relations identiques et nous pouvons, de nouveau, analysé en une phase.

### IV.3.1 Méthode général de calcul

#### IV.3.1.1 Schéma équivalent d'une ligne

Une ligne aérienne (de longueur inférieure à 100 Km) peut se mettre sous la forme du schéma équivalent en  $\pi$  (Figure.IV.1) suivant : [Lilien 2000]

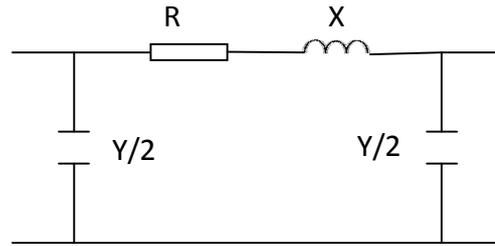


Figure.IV.1 Modèle d'une ligne électrique

Le schéma est composé par :

- L'impédance effective longitudinale (composée de la résistance linéique  $R'$  et de la réactance linéique  $X'=j\omega L'$ ) :

$$Z'_{\text{longitudinale}} = R' + jX' \quad [\Omega/\text{m}] \quad (\text{IV. 4})$$

- L'impédance effective transversale composée de la susceptance linéique :

$$Y' = j\omega C' \quad [\text{s}/\text{m}] \quad (\text{IV. 5})$$

#### IV.4 Etude des caractéristiques longitudinales

Pour rendre compte des effets produits par la résistivité des métaux constituant les conducteurs d'une ligne électrique et par la résistivité du sol (conducteur numéroté « n »), nous allons introduire les notions des résistances linéiques:  $R'_1, R'_2, \dots, R'_n$  [ $\Omega/\text{m}$ ]. Ainsi que, pour les effets des flux d'induction magnétique circulant autour et entre les conducteurs ; voire à l'intérieur même de ceux-ci, nous introduisons également les notions d'inductances linéiques propres et mutuelles :  $L', l'$  [ $\text{H}/\text{m}$ ].

##### IV.4.1 Résistance longitudinale

Partons de la loi d'ohm locale :

$$\vec{j} = \sigma \cdot \vec{E} \quad (\text{IV. 6})$$

Où :  $J$  est la densité de courant [ $\text{A}/\text{m}^2$ ].

$\sigma$  : est la conductivité électrique [ $\Omega^{-1}\text{m}^{-1}$ ].

Appliquée à un conducteur de longueur «  $L_L$  » [ $\text{m}$ ], de section «  $S$  » [ $\text{m}^2$ ] et de conductivité «  $\sigma$  » [ $\Omega^{-1}\text{m}^{-1}$ ], parcouru par un courant alternatif d'intensité «  $I$  » [ $\text{A}$ ].

On a :

$$\vec{J}S = \vec{I} \Rightarrow JS = I \quad (\text{IV. 7})$$

$$\vec{E} = -\text{grad } \vec{U} \Rightarrow E = -\frac{dU}{dl} \Rightarrow \int_{L_L}^0 -E dl = \int_0^U dU \quad (\text{IV. 8})$$

$$\Rightarrow E L_L = U$$

On remplace dans la loi d'ohm locale (IV. 3):

$$I = \frac{\sigma S}{L_L} \cdot U \quad (\text{IV. 9})$$

La résistance d'un conducteur se définit de la manière suivante :

$$R = \frac{L_L}{\sigma S} \Rightarrow R = \frac{\rho L_L}{S} [\Omega] \quad (\text{IV. 10})$$

Avec :

$$\rho = \frac{1}{\sigma} [\Omega m]$$

#### IV.4.2 Réactance longitudinale (Inductance)

Une induction (supposée linéaire) est toujours le quotient entre le flux embrassé par la boucle conductrice et le courant qui la parcourt. Elle est déterminée par la relation :

$$L = \frac{\Phi}{I} \quad [H] \quad (\text{IV. 11})$$

Ou :

$\Phi$  : Est le flux induit par le courant [wb].

Nous avons deux types d'inductances :

- L'inductance propre (ou self-inductance) d'un conducteur électrique parcouru par un courant est définie ; à un instant donné; comme étant le rapport entre les valeurs du flux induit par le courant et ce courant lui-même.
- L'inductance mutuelle se manifeste par l'interaction entre les conducteurs de phases, entre les conducteurs des différents ternes est entre tous les conducteurs parcourus par un courant tel que le fil de garde et le retour par la terre.

### IV.4.3 Impédance propre $Z_{ii}$ et impédance mutuelle $Z_{ij}$

On considère que la géométrie des trois phases de la ligne est symétrique (même mutuelles et résistances), Dans ce cas, Après avoir donné le calcul des Impédance propre  $Z_{ii}$  et impédance mutuelle  $Z_{ij}$  dans le chapitre.II, l'analyse est identique pour chaque phase.

L'étude d'un seul circuit donne directement la solution globale du système triphasé.

$$-U = Z'_{\text{eff}} \cdot I = (R' + jX') \cdot I \quad (\text{IV. 12})$$

Où  $(R' + jX')$  est l'impédance effective  $[\Omega/\text{m}]$ .

$X' = \omega (L' - l')$  la réactance effective  $[\Omega/\text{m}]$ .

$R'$  est la résistance linéique du conducteur  $[\Omega/\text{m}]$ .

$L'_{ii}$  : est la self inductance linéique  $[\text{H}/\text{m}]$ .

$L'_{ij}$  : est l'inductance mutuelle linéique  $[\text{H}/\text{m}]$ .

### IV.4.4 Matrices des résistances et des inductances longitudinales linéiques

L'équation matricielle des accroissements linéiques de tension  $U'_{in}$  le long du circuit formé par les conducteurs « i » et « n » dus aux résistances des conducteurs; ainsi qu'aux flux d'induction mutuels ou propres créés par l'ensemble des 'n' courants est comme suit :

$$\begin{bmatrix} -U'_{1n} \\ -U'_{2n} \\ \vdots \\ \vdots \\ -U'_{(n-1)n} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} Z_{ii} & Z_{ij} & Z_{ij} & \vdots & \vdots \\ Z_{ij} & Z_{ii} & Z_{ij} & \vdots & \vdots \\ Z_{ij} & Z_{ij} & Z_{ii} & \vdots & \vdots \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_1 \\ i_2 \\ \vdots \\ \vdots \\ i_{n-1} \end{bmatrix} \quad (\text{IV. 13})$$

### IV.5 Etude des caractéristiques transversales

Dans l'établissement des caractéristiques longitudinales, nous nous sommes occupés des phénomènes liés aux courants dans les conducteurs et aux champs magnétiques que ces courants créent, ce qui a permis de définir les caractéristiques linéiques  $R', L', l'$ .

Lorsqu'il n'y a pas de courant dans le sol (cas de réseau équilibré), nous pouvons complètement ignorer sa présence, ce que nous n'avons pas le droit de faire pour l'étude des caractéristiques transversales. [Turan 1988]

Les caractéristiques transversales rendent compte des effets des décharges superficielles des conducteurs de phase et du sol. Ces charges superficielles provoquent un champ électrique perpendiculaire à la surface des conducteurs qui engendre des courants capacitifs lorsqu'ils varient. Ce phénomène est représentés par les capacités linéiques,  $C'$ . Pour son calcul, le fait qu'un conducteur soit creux ou plein ne joue plus aucun rôle puisque la charge se concentre à la périphérie.

#### IV.5.1 Réactance transversale (capacité)

Nous pouvons assimiler les lignes aériennes à un condensateur qui est constitué de deux conducteurs (les conducteurs de phase et la terre). A cause de la présence des charges, sur ces deux conducteurs, le potentiel a des valeurs différentes sur ces ceux-ci. Si nous prenons comme valeur du potentiel de la terre la valeur zéro (la référence), la valeur de la tension du conducteur de phase représente la différence de potentiel. [Turan 1988]

La relation linéaire qui lie la charge électrique sur les deux conducteurs et la différence de potentiel «  $U$  » entre ceux-ci est donnée par :

$$C' = \frac{q'}{U} \quad (\text{IV. 14})$$

$C'$  : La capacité linéique [F/m].

$q'$  : la charge linéique portée par les conducteurs [C/m].

#### IV.5.2 Matrice des coefficients de potentiel

Nous pouvons écrire le système d'équations qui permet de calculer les tensions «  $U_{1n} \dots U_{(n-1)n}$  » par rapport à la terre lorsque nous connaissons les charges linéiques «  $q'_1 \dots q'_{n-1}$  » des 'n-1' conducteurs.

### IV.5.2.1 Coefficients de potentiel

Les charges au sol étant toujours supposées concentrées à sa surface, on calcule les coefficients de potentiel «  $\lambda_{ii}$  » et «  $\lambda_{ij}$  » par la théorie des images électriques à partir des relations (III.13 et III.14).

Après avoir fait tous ces calculs nous avons donc la matrice symétrique des coefficients de potentiel :

$$\begin{bmatrix} U_{1n} \\ U_{2n} \\ \vdots \\ \vdots \\ U_{(n-1)n} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \lambda_{11} & \lambda_{12} & \dots & \dots & \lambda_{1(n-1)} \\ \lambda_{21} & \lambda_{22} & \dots & \dots & \lambda_{2(n-1)} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ \lambda_{(n-1)1} & \lambda_{(n-1)2} & \vdots & \vdots & \lambda_{(n-1)(n-1)} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} q'_1 \\ q'_2 \\ \vdots \\ \vdots \\ q'_{(n-1)} \end{bmatrix} \quad (\text{IV. 15})$$

En général nous connaissons plutôt les tensions que les charges linéiques. Il peut être utile de résoudre le système d'équations (IV.15) par rapport aux charges :

$$[q'] = [\lambda]^{-1} [U]$$

En posant  $[C'] = [\lambda]^{-1}$ , nous obtenons, en notation matricielle :

$$\begin{bmatrix} q'_1 \\ q'_2 \\ \vdots \\ \vdots \\ q'_{(n-1)} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} C'_{11} & C'_{12} & \dots & \dots & C'_{1(n-1)} \\ C'_{21} & C'_{22} & \dots & \dots & C'_{2(n-1)} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ C'_{(n-1)1} & C'_{(n-1)2} & \vdots & \vdots & C'_{(n-1)(n-1)} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} U_{1n} \\ U_{2n} \\ \vdots \\ \vdots \\ U_{(n-1)n} \end{bmatrix} \quad (\text{IV. 16})$$

La matrice «  $C'$  », appelée « matrice des capacités linéiques nodales » est une matrice symétrique. Les coefficients «  $C'_{ij}$  » ont la dimension d'une capacité par unité de longueur [F/m].

$$C' = [\lambda]^{-1} = \frac{1}{\det(\lambda)} (A)^t \quad (\text{IV. 17})$$

Où «  $\det(\lambda)$  » est le déterminant de la matrice «  $\lambda$  » et «  $(A)^t$  » la matrice transposée des cofacteurs de cette matrice.

### IV.5.3 Matrice impédance

Pour la plupart des applications, la matrice des impédances primitive besoin d'être réduite à une matrice 3×3, dont l'ordre correspond aux conducteurs de phase. Les coefficients sont regroupés par ternes et, dans le but de simplifier l'écriture, l'étude ne

traite que du cas d'une ligne simple terme, la généralisation ne soulevant pas de difficultés. [Edward 1993]

Dans ces conditions, la matrice impédance s'écrit :

$$Z = \begin{bmatrix} Z_{ii} & Z_{ij} & Z_{ij} \\ Z_{ij} & Z_{ii} & Z_{ij} \\ Z_{ij} & Z_{ij} & Z_{ii} \end{bmatrix} \quad (\text{IV. 18})$$

#### IV.5.4 Impédance séquentiel

Les systèmes triphasés équilibrés font plus partie de la théorie que de la pratique, mais dans la majorité des problèmes, il est habituel de les supposer complètement équilibrés. Cependant, dans certaines applications comme par exemple des défauts non symétriques, une charge non équilibrées ou une situation de déséquilibre dans une machine tournante, il est nécessaire de pouvoir quantifier cette dissymétrie.

Nous allons donc calculer la matrice des impédances séquentielles  $Z_{012}$  qui est donnée par :

$$[Z_{012}] = [A_s]^{-1} Z [A_s] \quad (\text{IV. 19})$$

Avec :

$$[A_s] = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & a^2 & a \\ 1 & a & a^2 \end{bmatrix} \quad (\text{IV. 20})$$

$$a = e^{\frac{j2\pi}{3}}$$

La matrice séquentielle résultante est donnée par:

$$[Z_{012}] = \begin{bmatrix} Z_{00} & Z_{01} & Z_{02} \\ Z_{10} & Z_{11} & Z_{12} \\ Z_{20} & Z_{21} & Z_{22} \end{bmatrix} \quad (\text{IV. 21})$$

Avec :

$Z_{00}$  : L'impédance de la séquence zéro (homopolaire).

$Z_{11}$  : L'impédance de la séquence positive (directe).

$Z_{22}$  : L'impédance de la séquence négative (inverse).

### IV.6 Calcul de la capacité séquentielle

Ce calcul est très proche de celui effectué lors de la recherche des caractéristiques R L C d'une ligne, à la différence que nous ne considérons pas la ligne comme étant symétrique. [Edward 1993]

Par application de la méthode des images nous aboutirons à avoir la matrice des coefficients de potentiel  $[\lambda]$ .

On a :

$$[U_{abc}] = [\lambda_{abc}][Q_{abc}] \quad (IV.22)$$

$$\begin{bmatrix} U_a \\ U_b \\ U_c \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \lambda_{aa} & \lambda_{ab} & \lambda_{ac} \\ \lambda_{ba} & \lambda_{bb} & \lambda_{bc} \\ \lambda_{ca} & \lambda_{cb} & \lambda_{cc} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} Q_a \\ Q_b \\ Q_c \end{bmatrix} \quad (IV.23)$$

$[\lambda_{abc}]$  : matrice des coefficients de potentiel.

De (IV.22) nous tirons la matrice  $[Q_{abc}]$ :

$$[Q_{abc}] = [\lambda_{abc}]^{-1} \quad [U_{abc}] = [C_{abc}] [U_{abc}] \quad [C/m]$$

$$\text{Ou : } [\lambda_{abc}]^{-1} = [c_{abc}] \quad [F/m]$$

$$\text{Or : } [C_{abc}] = \begin{bmatrix} C_{aa} & -C_{ab} & -C_{ac} \\ -C_{ba} & C_{bb} & -C_{bc} \\ -C_{ca} & -C_{cb} & C_{cc} \end{bmatrix} \quad (IV.24)$$

Où la matrice  $[C_{abc}]$  est appelée matrice des coefficients de Maxwell.

Les termes diagonaux sont les coefficients de Maxwell et les éléments non diagonaux sont les coefficients d'induction électrostatiques.

Nous pouvons dès maintenant obtenir la matrice des capacités séquentielles  $[C_{012}]$  :

$$[C_{012}] = [A_s]^{-1} [C_{abc}] [A_s] \quad (IV.25)$$

$$[C_{012}] = \begin{bmatrix} C_{00} & C_{01} & C_{02} \\ C_{10} & C_{11} & C_{12} \\ C_{20} & C_{21} & C_{22} \end{bmatrix} \quad (IV.26)$$

tel que :

$C_{00}$  : c'est la capacité homopolaire.

$C_{22}$  : c'est la capacité inverse.

$C_{11}$  : c'est la capacité directe.

$C_{ij}$  : mutuelles entre les différentes capacités.

Le tableau (IV.1) qui suit donne quelques exemples sur le calcul de la capacité homopolaire :

Ligne monophasée	$C_0 = \frac{2\pi\epsilon_0}{\ln \frac{2h}{r}}$
Ligne biphasée	$C_0 = \frac{2\pi\epsilon_0}{\ln \frac{2hD'_{ij}}{rD}}$
Ligne triphasée	$C_0 = \frac{2\pi\epsilon_0}{\ln \frac{2hD'^2_{ij}}{rD^2}}$

Tableau. IV.1 capacité homopolaire pour les différentes lignes [Valentin 2006]

#### IV.7 Conclusion

Dans ce chapitre on a donné les méthodes de calcul pour les différents éléments (R, L, C) qui constitue l'impédance de la ligne et apparaitre comme des contraintes imposées sur les réseaux électriques et leurs influence sur la chute de tension, propagation des ondes des tensions et des courants le long de la ligne, les pertes (effet couronne, effet joule, ...etc.). Les expressions données pour le calcul des caractéristiques (R,L,C) sont données dans le cas générale que se soit dans le régime équilibré et déséquilibré.

Le prochain chapitre sera consacré pour le calcul des coûts (pylônes, conducteurs,...etc.) et l'application de code de calcul informatique pour le dimensionnement des lignes électriques aériennes, il contiendra l'organigramme du programme appliqué et l'explication de sa procédure et une comparaison des résultats à des exemples donnés.

## *CHAPITRE V*

*Calcul des coûts et présentation de  
l'algorithme*

## V.1 Introduction

L'estimation des enjeux économiques sur le cycle de vie d'une ligne aérienne n'est pas une tâche facile, en effet les coûts de réalisation sont très fortement variables selon les Pays, et pour cela nous avons distingué différents coûts : les supports, l'indemnisation, les accessoires, les conducteurs, le tirage des conducteurs et les pertes par effet Joule.

Et pour cela on a créé un programme recherchant le moyen le plus économique pour alimenter une charge de caractéristiques données. Nous rappellerons la théorie développée avant de définir les contraintes qui devront être respectées. Ensuite nous appliquerons les résultats de ce programme à la recherche des caractéristiques fondamentales dans le dimensionnement d'une ligne aérienne.

## V.2 Coût des supports

On détermine tout d'abord le nombre de pylônes donné par la formule suivante :

$$\text{NbrePy} = \left( \frac{L_L}{\text{Portée moyenne}} \right) \quad (\text{V. 1})$$

Ensuite, le coût de chaque pylône (alignement, ancrage et angle) est multiplié par les pourcentages respectifs de chaque pylône, et ensuite par le nombre total de pylônes.

La fonction coût du pylône s'exprime comme ceci : [Louis Maesen]

$$-285.08 + 1.24h_{\text{pylône}}^{2.3} + 0.04E \quad (\text{V. 2})$$

Avec :

$h_{\text{pylône}}$  : est la hauteur du pylône [m],

E : l'effort en tête [N].

Nous supposons qu'elle intègre le coût des fondations.

### V.2.1 Calcul des efforts en tête

Pour obtenir les efforts en tête, il suffit de diviser le moment résultant par la hauteur d'accrochage du conducteur tel que : [Louis Maesen]

$$M_{\text{total}} = \sqrt{M_4^2 + (M_2 + M_3)^2} \quad (\text{V. 3})$$

Avec :

$$M_2 = F_1 \cdot P_{\text{moy}} \cdot \sum_{i=1}^3 h_i \quad (\text{V. 4})$$

$F_1$  : est une constante due à la nature du pylône à une valeur de  $F_1=12.6$

$P_{\text{moy}}$  :est la portée moyenne.

$M_2$  : est le moment dû au poids propre de l'ensemble formé par les conducteurs, les chaînes d'isolateurs et la ferrure. Sa valeur elle est toujours non nulle.

$$M_3 = F_{\text{Pylône}} \cdot \frac{\text{HHr}_{\text{sol}}^2}{2} \quad (\text{V. 5})$$

$$\text{HHr}_{\text{sol}} = H_{\text{sol}} + F_{L_{\text{max}}} + \text{SL} \quad (\text{V. 6})$$

$M_3$  : est le moment dû à la force aérodynamique du vent s'exerçant sur les conducteurs.

Avec :

$$F_{\text{Pylône}} = C_{\text{pylone}} \cdot q_{\text{pylone}} \cdot V \quad (\text{V. 7})$$

$C_{\text{pylone}}$  : est le coefficient de trainée du pylône qui vaut :  $C_{\text{pylone}} = 2.1$

$q_{\text{pylone}}$  : est la pression de base du pylône.

Avec :

$$q_{\text{pylone}} = 0.8 q_{\text{base}} \quad (\text{V. 8})$$

Avec :

$$q_{\text{base}} = 800 \text{N/m}^2$$

$V$  :est la vitesse du vent.

$$M_4 = T_r \cdot \sum_{i=1}^3 h_i \quad (\text{V. 9})$$

Avec :

$T_r$  : tension mécanique maximale dans les conducteurs de phase exercée sur le pylône.

$M_4$  : moment longitudinal engendré par la traction maximale dans les conducteurs.

Les efforts de tête sont différents selon que nous considérons un pylône d'alignement, d'angle ou d'ancrage.

- Pour un pylône d'alignement, nous avons, si nous ajoutons le prix des trois chaînes de suspension :

$$-285,08 + 1,24 \cdot h^{2,3} + 0,04 \cdot E1 + 3 \cdot \text{prix de la chaîne de suspension.} \quad (\text{V.10})$$

$E1$  : effort en tête du pylône d'alignement [N].

- Pour un pylône d'ancrage, si nous ajoutons le prix des six chaînes d'ancrage, plus fil de garde:

$$-285,08 + 1,24 \cdot h^{2,3} + 0,04 \cdot E2 + 6 \cdot \text{prix de la chaîne d'ancrage} + \text{prix du fil de garde. (V.11)}$$

E2 : effort en tête du pylône d'ancrage [N].

- Pour un pylône d'angle, nous avons, si nous ajoutons le prix des six chaînes de suspension, plus une pour le fil de garde:

$$-285,08 + 1,24 \cdot h^{2,3} + 0,04 E3 + 7 \cdot \text{chaînes de suspension} + \text{fil de garde (V.12)}$$

E3 : effort en tête du pylône d'angle [N].

Dans ce coût, nous ne tenons pas compte des différents obstacles géographiques qui modifient les proportions entre pylônes d'alignement, d'ancrage (et d'arrêt) et d'angle, ainsi que la garde au sol. Nous oublions aussi de compter le prix de la ferrure.

### V.3 Coût de l'indemnisation

C'est le coût supplémentaire lié à l'indemnisation à accorder à un propriétaire afin d'implanter un support dans son terrain privé. Nous avons l'équation suivante : [Louis Maesen]

$$\text{Coût} = 2155 + 0,14 x + 6 \cdot 10^{-7} x_2 + 610^{-11} x_3 - 10^{-15} x_4 \quad (\text{V.13})$$

Où x est le prix d'un pylône de suspension.

Parmi les accessoires, on distingue la ferrure des chaînes d'isolation. Le coût de la ferrure dépend de la longueur des bras de ferrure et de l'effort auquel est soumis le bras:

$$P_{\text{ferrure}} = K N L_{\text{bras}}^2 F_{\text{terme}} \quad (\text{V.14})$$

Avec :

K : est un coefficient de proportionnalité qui vaut  $0,375 / \text{m}^2 \cdot \text{N}$

$L_{\text{bras}}^2$  : est la longueur du bras de ferrure,

$F_{\text{terme}}$  : est le plus grand des trois termes suivants :

1) poids d'une portée + surcharge de 3000 N

2)  $\frac{\text{effort maximale été du support}}{5N}$

3)  $\frac{\text{effort maximale hiver du support}}{5N}$

#### V.4 Coût des conducteurs

Les conducteurs de lignes aériennes se vendent au poids. On évalue leur prix via l'équation suivante : [Louis Maesen]

$$3[\text{phase}]. \text{Prix} . m_v . L_L . S \quad (V.15)$$

Où :

Prix: est le prix au kg du matériau utilisé

$m_v$  : est la masse volumique du matériau à la température de service [Kg/m<sup>3</sup>]

#### V.5 Coût du tirage des conducteurs

Le tirage constitue l'étape de placement des conducteurs, c'est-à-dire leur suspension aux supports. Il paraît évident que le coût sera différent en fonction de l'accessibilité aux supports. Pourtant, nous allons modéliser ce coût par un terme constant et un terme proportionnel à la section. En effet, les frais d'installation seront d'autant plus importants que le conducteur est lourd. [Louis Maesen]

$$\text{Coût} = L_L . (291 . S + 54 465) \quad (V.16)$$

Où la section est exprimée en mm<sup>2</sup> et la longueur en km.

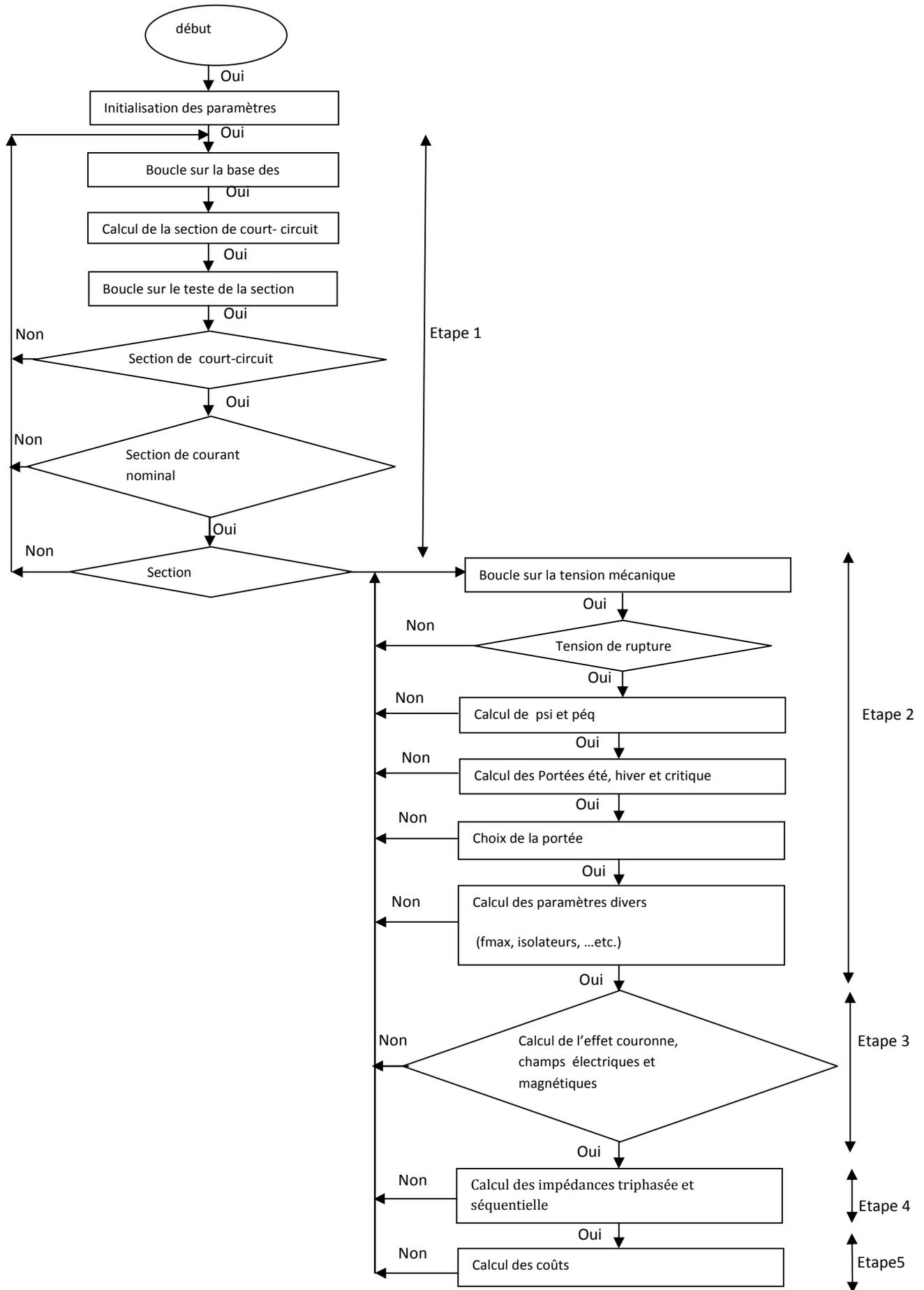
#### V.6 Présentation de l'algorithme

L'énergie électrique produite par les centrales doit être ensuite transportée par des lignes. Ces lignes aériennes, jouent un rôle aussi fondamental que celui des centres de production. Des dépenses d'investissement et d'exploitation sont nécessaires pour le transport et à la distribution de cette énergie.

Ce travail a pour but de faire créer un programme recherchant le moyen le plus économique pour alimenter une charge de caractéristiques données. Nous appliquerons les résultats de ce programme à la recherche de caractéristiques fondamentales dans le dimensionnement d'une ligne aérienne. Nous présentons l'algorithme de calcul que nous avons utilisé et le décrivons sommairement, chaque étape qui a été développée en détail dans les chapitres précédent.

**Etape1** : Boucle sur la base des données et choix de la section

- Boucle sur la Base de Données des conducteurs (BD) : Nous avons regroupé dans le tableau.II.2 les différentes caractéristiques principales des matériaux constituant les conducteurs. Une de celles-ci est le CFI, qui est un paramètre lié à l'espacement minimal entre phases.  
La base de données contient les champs suivants : nom, section, diamètre, module de Young, résistance linéique, masse linéique et tension de rupture. Nous déterminons à partir de ces valeurs d'autres caractéristiques, telles la masse volumique et la résistivité.
- Section de court-circuit (cc) : La puissance de court-circuit  $S_{cc}$  est une fonction du réseau environnant la ligne étudiée, mais du point de vue dimensionnement, on retient souvent les valeurs du tableau. II.1.  
La formule(II.3) donnant le courant de court-circuit. Afin de trouver la section minimum permettant de supporter ce courant durant le temps  $t_{cc}$ , on dispose de la formule (II.4).  
Cette section est la section minimale que doit posséder notre conducteur. Si ce n'est pas le cas, il est rejeté et on passe au conducteur suivant.
- Courant Nominal: Ce critère a pour but de vérifier que notre conducteur supportera sans difficultés le passage du courant nominal. Le problème est essentiellement d'ordre thermique, le passage du courant entraîne un échauffement par effet joule. Après avoir déterminé ce courant nominal qui doit être inférieure au courant admissible.
- Chute de tension: Vérifie que la chute de tension ne soit pas supérieure à celle imposée par l'utilisateur. Et pour cela il faut déterminer la résistance maximale de la ligne à 20°C. On vérifiera enfin que la résistance linéique de notre conducteur reste inférieure à la résistance linéique à la température de service.



**Etape2** : Boucle sur la tension mécanique

La tension mécanique détermine les conditions canicule  $T_{canicule}$  et la recherche des portées hypothétiques. Nous faisons varier arbitrairement la variable de la Tension mécanique. Nous vérifions ensuite que cette tension ne dépasse pas la tension de rupture.

Rappelons que la tension de rupture nous est fournie par notre base de données.

- Calcul des Psi et P<sub>éq</sub> : Dans l'établissement d'un projet de ligne, le concepteur doit disposer des conditions climatiques à prendre en compte dans son calcul : les températures, l'action du vent et les surcharges éventuelles de glace, de givre ou de neige. Ces conditions vont nous permettre de calculer l'angle que font les conducteurs par rapport à la verticale suite à l'effet du vent (ce sont les Psi), ainsi que le poids équivalent que devra supporter les chaînes d'isolateurs (les P<sub>éq</sub>).
- Calcul des portées été, hiver et critique : Pour pouvoir calculer les portées hypothétiques, nous devons introduire l'équation d'état, dite de Blondel donnée par la formule (II.35).
- Choix de la portée : A partir de la connaissance des portées hypothétiques hiver, été et critique, nous pouvons déterminer la portée moyenne :
  - Pour une portée moyenne inférieure à la portée critique, c'est l'hypothèse hiver qui sera la plus contraignante.
  - Par contre, si la portée moyenne est supérieure à la portée critique, l'hypothèse été sera la plus contraignante.
- Calcul de paramètres divers : Avec la portée, on peut enfin calculer la flèche, la longueur des isolateurs, le gabarit des supports ainsi que leurs coûts.
- Calcul de la flèche maximale : Pour le calcul de la flèche maximale nous utilisons l'équation (II.38) et nous l'appliquons dans les conditions canicule.
- Calcul de la garde au sol : La garde au sol signifie la hauteur en dessous de laquelle un conducteur ne peut pas se trouver. Sa valeur est déterminante par la formule (II.39).

- Calcul de la distance  $E\phi\phi$  : La distance minimale entre les structures au potentiel de la terre et les trois phases est donnée par la formule (II.43).
- Calcul de la longueur des chaînes d'isolateurs : Nous devons calculer le nombre d'assiettes nécessaires au maintien de la distance de contournement. Pour une approche rapide, nous utiliserions le tableau (II.6).
- Calcul des coûts : Nous allons distinguer différents coûts : les supports, l'indemnisation, les accessoires, les conducteurs, le tirage des conducteurs et les pertes par effet Joule.

**Etape3** : Calcul des champs électriques et magnétiques dus à l'effet couronne.

- Effet de couronne : L'effet couronne est un phénomène compliqué à quantifier son calcul est donné par la formule (III.1) et sa valeur ne dépasse pas la valeur fixée par l'utilisateur.
- Champ électrique : Par application de la méthode des images en a obtenu le profil du champ électrique qui est été calculé par la formule (III.19).
- Champ magnétique : Pour obtenir la valeur de l'induction magnétique créée par un courant  $I_n$  en un point P de coordonnées (x, y, z) est donnée par le théorème de Biot et savart par la formule (III.28).

**Etape 4** : Calcul des impédances triphasée et séquentielle

Dans le cadre du calcul des caractéristiques R,L,C de la ligne, nous avons simplifié notre calcul en faisant l'hypothèse de système triphasé équilibré, ce qui nous donnait une matrice [Z] de symétrie complète par la formule (IV.18).

- Calcul de l'impédance séquentielle : Après avoir déterminé la matrice [Z] de la ligne en peut avoir la matrice séquentielle  $[Z_{012}]$  qui est donne par la formule (IV.19).
- Calcul de la capacité séquentielle: Ce calcul est très proche de celui effectué lors de la recherche des caractéristiques R L C d'une ligne.

La valeur de la matrice capacitive est obtenue par inversion des coefficients de potentielle; la capacité séquentielle  $[C_{012}]$  est calculée par la formule (IV.25).

### **Etape 5 : calcul des coûts**

Dans cette étape on a donné les différentes formules qui interviennent dans le calcul des coûts soit pour les pylônes, tirage et coûts des conducteurs...etc.

Finalement, après avoir fait une étude comparative de nos résultats à ceux de la thèse [Lilien 2000] on les résume dans les deux tableaux .1 et 2 qui suivent :

### **V.7 Conclusion**

Nous avons simplifié et évalué le coût pour chaque modèle de support, tel que : Les supports d'arrêt et d'ancrage qui ils doivent être capable de faire face à une défaillance dans le sens longitudinale et éviter la propagation d'un défaut de type mécanique (par exemple rupture des trois phases). Enfin les supports d'angle sont utilisés lorsque l'on veut ou l'on doit imposer un changement de direction à la ligne.

Notre programme montre à l'utilisateur quels paramètres ont été employés lorsqu'une solution optimale a été trouvée. Il présente tout d'abord les caractéristiques du conducteur idéal : son nom, sa section, son diamètre,...etc. Ensuite les caractéristiques géométriques des supports de suspension, d'arrêt et d'angle, figurent également les coûts des différents modèles, le choix de la chaîne d'isolateurs comprenant le type d'assiette, nombre d'assiettes, longueur et le calcul des différentes caractéristiques générales de la ligne, le nombre total de pylônes, la portée moyenne et les tensions mécaniques dans les trois hypothèses (été, hiver, canicule) calculées via l'équation d'état, ainsi que les coûts calculés précédemment.

La programmation sous le logiciel Matlab nous a permis de donner des fonctions de calcul prêtes pour les caractéristiques générales de la ligne, et les enjeux économiques,...etc.

On donne tout d'abord nos résultats obtenus se forme de deux tableaux, ensuite il est évident de vous présenter les différentes instructions et le fichier de notre programme informatique réalisé avec le logiciel nommé précédemment.

Tableau.1		
Données de base		
Puissance active [MW].	10	10
Puissance réactive [MVAR].	4.84	4.84
Tension nominale [KV].	36	36
Longueur de la jonction [Km].	35	35
Puissance de court-circuit [MVA].	2000	2000
Durée de court-circuit.	0.3	0.3
Chute de tension [%].	9	9
Utilisation à plein charge [H/an].	2000	2000
Taux d'actualisation [%].	6	6
Augmentation annuelle de la puissance [%].	3	3
Augmentation annuelle du prix du KWh [%].	2	2
Nombre d'année d'utilisation [ans]	20	20
Pression dynamique [Pa].	800	800
Prix en kilo pour le cuivre.	80	80
Prix en kilo pour l'aluminium.	70	70
Prix en kilo pour l'AMS.	100	100
Comparaison de nos résultats avec les résultats de l'exemple 2		
Contraintes physique et mécanique de la ligne.	nos résultats	résultats de l'exemple 2
PT(Puissance max à transiter (après 20 ans) [MW]	18.1	18.1
Diamètre du conducteur [mm <sup>2</sup> ].	28.4077	26.1
S (section de court- circuit) [mm <sup>2</sup> ]	633.8127	403
IADM (courant admissible) [A]	583.3293	540
SOE (section optimale économique) [mm <sup>2</sup> ].	429	476
Xmoy (portée moyenne) [m].	170	170
Gsol (Garde au sol) [m].	6	6
H_sol(Hauteur minimale du câble inférieur suspendu)[m].	11	12.13
Hauteur hors sol [m].	15.9615	16.10
Hauteur du pylône [m].	18.8461	19.00

enfouissement dans le sol [m].	2.88	2
N_ass (Nombre d'assiettes isolateurs).	3	3
SL (longueur de la chaine d'isolateur) [mm].	381	381
Ephi_phi (Distance minimale entre conducteurs) [m].	2.0602	2.29
Ephi_n_Vert (Distance minimale phase-neutre) [m].	0.24	0.24
Emax (Calcul de l'effet Couronne)[Kveff/cm].	3.6	3.7
Nbre_pyl (nombres de pylônes)	211	211

Tableau.2		
Données de base		
Puissance active [MW].	10	10
Puissance réactive [MVAR].	4.84	4.84
Tension nominale [KV].	36	36
Longueur de la jonction [Km].	35	35
Puissance de court-circuit [MVA].	2000	2000
Durée de court-circuit.	0.3	0.3
Chute de tension [%].	4.05	4.05
Utilisation à plein charge [H/an].	2000	2000
Taux d'actualisation [%].	6	6
Augmentation annuelle de la puissance [%].	3	3
Augmentation annuelle du prix du Kwh [%].	2	2
Nombre d'année d'utilisation [ans]	20	20
Facteur de puissance.	0.9	0.9
Comparaison de nos résultats avec les résultats de l'exemple 1		
Contraintes physique et mécanique de la ligne.	Nos résultats	résultats de l'exemple 1
Icc (courant de court-circuit) [KA]	11.2	11.2
PT(Puissance max à transiter (après 20 ans) [MW]	18.1	18.1
S (section de court- circuit) [mm <sup>2</sup> ]	222	222
IN_depart (courant nominale de départ) [A]	178	178
La chute de tension [Kv]	3.240	3.240
IADM (courant admissible) [A]	570	540

IN_T (Intensité du courant en fin de vie) [A]	322	322
SOE (section optimale économique) [mm <sup>2</sup> ].	393	476
Xcritique (portée critique) [m].	323	402
Xmoy (portée moyenne) [m].	170	160
fmax (flèche maximale) [m].	2.42	2.67
Gsol (Garde au sol) [m].	6	6
H_sol (Hauteur minimale du câble inférieur suspendu)[m].	10	9.67
enfouissement dans le sol [m].	2.7	2
Type d'assiette	F70/127	F70/127
Pas d'une assiette [mm]	127	127
Ligne de fuite [mm]	84.66	82.53
N_ass (Nombre d'assiettes isolateurs).	3	3
SL (longueur de la chaîne d'isolateur) [mm].	381	381
Ephi_phi (Distance minimale entre conducteurs)[m].	1.91	1.99
Ephi_n_Vert (Distance minimale phase-neutre) [m].	0.24	0.24
Emax (Calcul de l'effet Couronne)[Kveff/cm].	5.82	3.7
Nbre_pyl (nombres de pylônes)	211	225
Le niveau perturbateur à la phase 1 [Kv/cm]	3.635	3.68
Le niveau perturbateur à la phase 2 [Kv/cm]	3.635	4.01
Le niveau perturbateur à la phase 3 [Kv/cm]	3.2632	3.68
La valeur maximale du champ magnétique [μT]	80	—
La valeur maximale du champ électrique [Kv/m]	0.032	0.035
Tension de rupture [N]	16221	16221
Tension mécanique (été) [N]	18450	16221
Tension mécanique (hiver) [N]	23854	21245

-Pour le dimensionnement des pylônes, pour notre cas on a dimensionné un pylône de suspension dans les caractéristiques suivantes :

bras1=1.90m, qui est le bras de suspension du pylône.

bras2=1.85m, il définit la distance entre phases.

-On a fait un calcul pour le courant admissible (IADM=580A) dans le but de vérifier que ce courant est bien supérieur au courant nominal (IN\_T = 321.839A).

-Pour le calcul de l'impédance séquentielle  $Z_{012}$  et la capacité séquentielle, on a pour un système de disposition en nappe le résultat suivant :

$$Z_{012} = \begin{bmatrix} 0.0701 + j31.1833 & 0.0000 - j0.0000 & -0.0000 - j0.0000 \\ -0.0000 - j0.0000 & 0.0700 + j31.1830 & -0.0001 + j0.0000 \\ -0.0000 - j0.0000 & 0.0001 + j0.0000 & 0.0700 + j31.1830 \end{bmatrix}$$

C012 =

$$10^{-10} \begin{bmatrix} 0.0445 + j 0.0000 & -0.0009 + j 0.0015 & -0.0009 - j 0.0015 \\ -0.0009 - j 0.0015 & 0.1048 + j 0.0000 & 0.0045 - j 0.0077 \\ -0.0009 + j 0.0015 & 0.0045 + j 0.0077 & 0.1048 - j 0.0000 \end{bmatrix}$$

- les profils des champs électrique et magnétique sont donnés par les figures (V.1) et (V.2) ci-dessous.

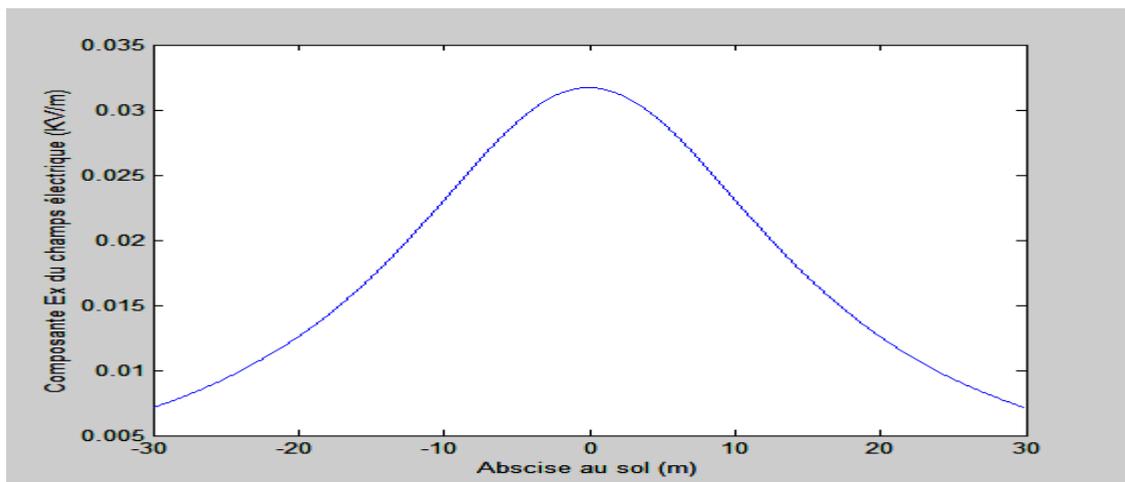


Figure. V.1 champ électrique crée par une ligne électrique aérienne.

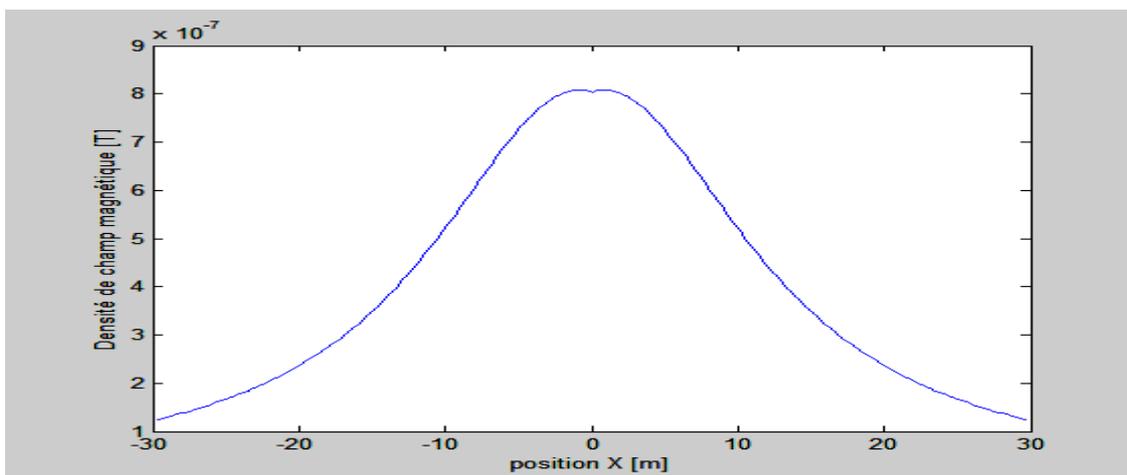


Figure. V.2 champ magnétique crée par une ligne électrique aérienne.

A decorative rectangular box with a blue gradient background, transitioning from a darker blue at the top to a lighter blue at the bottom. Two black wavy lines, resembling water ripples, are positioned near the top and bottom edges of the box. The text "Conclusion générale" is centered within the box in a black, italicized serif font.

*Conclusion générale*

## Conclusion générale

### Conclusion générale :

Dans ce présent travail, en s'est établi à développé un code de calcul informatique de dimensionnement optimal des jonctions triphasées, et qu'on peut le résumé comme suit :

- L'étape 1 : qui contient les bases de données des conducteurs et la méthode de choix de la section.
- L'étape 2 : une boucle sur la tension mécanique, contient les différents calculs des portées, flèche maximale...etc.
- Les autres étapes contiennent le calcul des différentes paramètres (effet couronne, l'impédance de la ligne, calcul de champ magnétique et électrique, et les coûts.).

Le dimensionnement des lignes permettra de gérer plus rationnellement les systèmes présents et les réseaux futurs, en effet sont particulièrement intéressants :

- De disposer d'une plus grande densité de puissance à transportée.
- De réduire les pertes de transport (pertes de puissance, pertes par effet couronne,...etc.).
- De pouvoir réduire l'intensité des champs électriques et magnétiques.
- Des contraintes d'environnement, géographique et climatique qui doit amener les concepteurs à prendre en compte l'influence de ces derniers sur la structure des lignes.

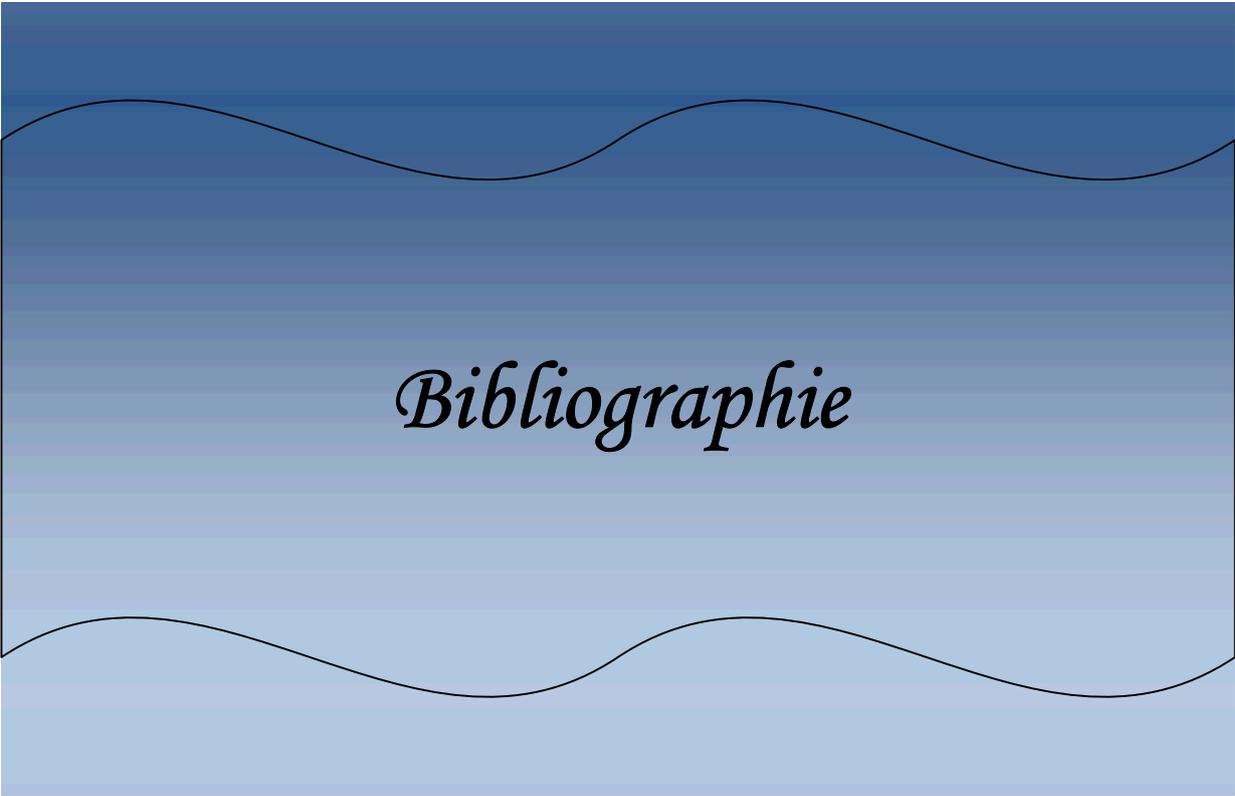
En plus ; les coûts de réalisation d'une ligne aérienne doivent prendre en considération les différents aspects suivants :

- Coûts des investissements pour les conducteurs et les pylônes.
- Coûts des accessoires (chaîne d'isolateurs, Dispositifs de mise à la terre,...etc.).

L'étude d'une ligne aérienne indique les solutions viables, qui méritent un approfondissement technique et une étude comparative. Les résultats de cette étude sont rassemblés dans un programme de calcul sous Matlab qui nous permet de calculer tous les paramètres physiques et mécaniques de la ligne et on a comparé certaines de nos résultats à ceux de la thèse [Lilien 2000], on constate qu'il y a concordance entre eux ce qui vérifie nos résultats de programmation.

## Conclusion générale

Pour terminer ; nous souhaitons que ce travail soit l'amorce à d'autres études plus importantes dans le domaine de dimensionnement des lignes haute tension.



*Bibliographie*

## BIBLIOGRAPHIE

[Carrive 1998] P.CARRIVE « réseau de distribution, structure et planification » fichier technique de l'ingénieur D4210, 1998

[Cova 2005] B.COVA, « audit des alternatives à la réalisation d'une ligne de très haute tension entre le cotentin et le Maine ».fichier PDF, site « <http://www.cesi.it> », 2005

[Michel 2004] A.MICHEL, « traité d'électricité haute tension » volume XXII, publié par presse polytechnique et universitaire romandes deuxième édition, ISBN :

2-88074-482-2, 2004

[Charles 1984] A.CHARLES « construction des lignes aériennes à haute tension » édition Eyrolles, 1984

[William 1962] A.WILIAM « Power Cable Ampacities », AIEE Pub. No. S-135-1 and -2, IPCEA P-46-426, 1962

[Lilien 2000] J.L.LILIEN, « transport de distribution de l'énergie électrique, manuel de travaux pratiques destiné au cours », université de liège, faculté des sciences appliquées, 2000

[Pays 1997] M.PAYS « Câbles de transport d'énergie, Technologies. Caractéristiques » fichier pdf D4521 technique de l'ingénieur

[Escané 1997] J.M.ESCANÉ, « Réseau d'énergie électrique modélisation : lignes, câbles », ISBN 0292/6303, 1997, Edition Ayrolle, paris, Juin 1997.

[Debbel 2005] S.M.DEBBEL « Simulation par ordinateur de la ligne haute tension en régime permanent dans les conditions aléatoires », « Afrique science » revue internationale des sciences et technologie, ISSN 1813-548X, année 2005.

[Pinson 1997] G.PINSON, « lignes de transmission », fichier PDF, B31,

ISBN 2-950781-0-6.

[Gilbert 2005] S.GILBERT, « Electrotechnique » volume 4, Edition 2005

[Debu 1997] T.DEBU, « lignes aériennes. Paramètres électriques » fichier PDF Techniques de l'ingénieur D4435.

[Pirotte 1972] P.PIROTTE « contribution à l'étude des conséquences de l'effet couronne sur les lignes aériennes à très haute tension » thèse de doctorat université de Liège Belgique 1972, 186 pages.

[Legros 1997] W.LEGROS « électrotechnique I » centrales des cours de l'A.E.E.S, Université de Liège, 1997

[Maddock 1992] B.J.MADDOCK « overhead line design in relation to electric and magnetic field limits » Power Engineering journal, septembre 1992

[Turan 1988] G. TURAN « modern power system analysis » édition John Wiley, 1988

[Edward 1993] I.A.EDWARDE « calcul de l'impédance de séquence zéro des câbles » Tome 42, édition Archiwum Elektrotechniki, 1993

[Valentin 2006] C.VALENTIN « les réseaux d'énergie électriques I, II, modalisation des éléments du réseau triphasé » édition Lavoisier, ISBN 2-7462-1373-7, septembre 2006

[Louis 1990] M.LOUIS « réseaux de distribution de l'énergie électrique-considérations technico-économiques », travaille de fin d'étude, Université de Liège, 1990