

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE

UNIVERSITE KASDI MERBAH OUARGLA

Faculté des Sciences et de la Technologie

Département Électrotechnique



Mémoire

## MASTER ACADEMIQUE

Domaine : Sciences et Technologies

Filière : Électrotechnique

Spécialité : Réseaux électriques

Présenté par : - DEGHA OUSSAMA

- MAAMRI OUSSAMA

### Thème

**Calcul du champ électrique au voisinage d'une ligne de transport  
d'énergie électrique THT**

Soutenu publiquement le 15 juin 2023 devant le jury composé de :

M. B. Bouhadouza	MCB	Président	UKM Ouargla
M. T. Rouibah	MCA	Encadreur	UKM Ouargla
M. ANE Ayad	MCA	Examineur	UKM Ouargla
Mr Rezzag ilyes bara	Doctorant	Co-encadreur	UKM Ouargla

Année universitaire : 2022-2023

# **Remerciement**

Je tiens à remercier avant tout

ALLAH

Qui nous a donné la force et le courage pour terminer nos études et élaborer ce modeste travail.

Un grand merci à nos parents qui croient toujours et inconditionnellement en nous et qui nous ont soutenus non seulement spirituellement, mais aussi logistiquement lors de la rédaction de ce mémoire.

Nous remercions très sincèrement notre encadreur :

**Dr. Rouibah Tahar.**

À tous ceux qui nous ont donné un coup de main par la communication des connaissances.

Soit par son encouragement et son conseil qui nous étaient d'une grande utilité pour l'accomplissement de nos Tâches dans les meilleures conditions.

# Dédicace

**DEGHA OUSSAMA**

J'ai dédié ce modeste travail à ceux qui me sont les plus chers, je me souviens :

Tout d'abord : ma chère mère, aucun mot ne peut exprimer son vraie valeur de gratitude et d'amour, ma mère est la personne la plus chère au monde, que Dieu lui protège.

**Mon père** : mon cher père, Degha Said Rida, qui m'a encouragé dans mon parcours académique « Que Dieu ait pitié de lui et fasse du paradis son demeure ».

**À ma tante Et Son marie** : Sayeh El Hadj qui sont parmi les plus chers à moi aussi

**À mes frères** : Salah , Merouane, Monsof, Mohammed, Tarek, Sayeh AbdElkarim,

**À mes sœurs** : Ahlem, Assia, Wassila, Linda, NAssima, Salima, Ferial, Nadjet

**À mon collègue** : Merci pour votre patience et votre amour, je vous souhaite une vie pleine de succès et de bonheur.

**À mes chers amis** : Benamour Ahmed, Bihmen Nabil, Arigue Ayoub, Benzahi Yacine, Degha Mehdi, Khemgani Fateh, je ne trouve pas les mots sincères pour exprimer mes sentiments et mes pensées, vous êtes mes frères.

**Mon superviseur** : Mr. Rouibah Taher. Que Dieu vous accorde la santé, le bonheur, une longue vie et veille à ce que je ne disparaisse jamais.:

# Dédicace

## MAAMRI OUSSAMA

J'ai dédié ce modeste travail à ceux qui me sont les plus chers, je me souviens :  
Tout d'abord : ma chère mère, aucun mot ne peut exprimer leur vraie valeur de gratitude  
et d'amour, qui sont les deux personnes les plus chères au monde, que Dieu les protège et  
prenne soin d'eux pour moi.

**Mon père** : mon cher père, Maamri Abdel Aziz, qui m'a encouragé dans mon parcours  
académique « Que Dieu ait pitié de lui et fasse du paradis son demeure ».

**À ma tante,**

**Mes oncles,**

**À mes grand-mère,**

**À mes frères** : Nabil , Cherif, Mouhamed Ali

**À mes sœurs** : Nesrine, Faiza, wafa et Hala

**À mon collègue** : Merci pour votre patience et votre amour, je vous souhaite une vie pleine  
de succès et de bonheur.

**À mes chers amis** : Bougueffa Eutamene Abbes, Chouiha Abdel Krim, Bouaroua Abdel  
krim, Houssin, Chahbi Imad, Alaa , Bari Aboubakeur, je ne trouve pas les mots  
sincères pour exprimer mes sentiments et mes pensées, vous êtes mes frères.

Mon superviseur : Mr. Rouibah Taher. Que Dieu vous accorde la santé, le bonheur,  
une longue vie et veille à ce que je ne disparaisse jamais.:

## Résumé

Les lignes électriques aériennes à haute tension génèrent des champs électromagnétiques qui peuvent avoir des effets sur l'environnement les et êtres humains. Il est important de comprendre de comprendre et évaluer ces effets potentiels sur la sante.

L'objectif de notre travail est de trouver la bonne configuration des conducteurs dans une ligne électrique aérienne à haute tension et calculer le champ électrique au voisinage de cette ligne à l'aide d'un logiciel de programmation MATLAB.

Un code de calcul analytique a été développé sur le MATALB pour calculer les intensités des champs électriques au voisinage des lignes électriques aériennes à haute tension, par modification de la géométrie de la ligne et trouver la meilleure configuration des conducteurs.

**Les mots clés: Les lignes électriques aérienne a haute tension, les champs électromagnétiques, les conducteur.**

## Abstract

High-voltage overhead power lines generate electromagnetic fields that can have effects on the environment and human beings. It is important to understand and evaluate these potential effects on health.

The objective of our work is to find the best configuration of conductors in a high-voltage overhead power line and calculate the electric field in the vicinity of this line using MATLAB programming software.

An analytical calculation code has been developed in MATLAB to calculate the intensities of electric fields near high-voltage overhead power lines by modifying the line's geometry and finding the best configuration of conductors.

**Keywords: Overhead high-voltage power lines, electromagnetic fields, conductors.**

## ملخص

تولد خطوط نقل الطاقة الكهربائية ذات الجهد العالي حقول كهرومغناطيسية يمكن أن تؤثر على البيئة والبشر. من المهم فهم وتقييم هذه الآثار الصحية المحتملة.

الهدف من عملنا هو العثور على الترتيب الأمثل للموصلات الكهربائية في خط لنقل الطاقة الكهربائية ذات جهد عالي وحساب الحقول الكهربائي بالقرب من هذا الخط باستخدام مبرمج MATLAB.

تم تطوير برنامج لحساب شدة الحقول الكهربائية بالقرب من خط لنقل الطاقة الكهربائية ذات جهد عالي باستخدام مبرمج MATLAB من خلال القيام بعدة ترتيبات مختلفة للموصلات الكهربائية للوصول إلى الترتيب الأفضل لهذه الموصلات. الكلمات المفتاحية: خطوط نقل الطاقة الكهربائية ذات الجهد العالي ، الحقول الكهرومغناطيسية، الموصلات الكهربائية

## Liste des figures

### Chapitre I

<b>Figure I.1</b>	Schéma d'un réseau électrique	04
<b>Figure I.2</b>	Ligne de transport THT.	06
<b>Figure I.3</b>	Exemple de ligne de transport HT et THT.	06
<b>Figure I.4</b>	Les éléments constitutifs d'un pylône électrique	08
<b>Figure I.5</b>	Câble en cuivre nu	12
<b>Figure I.6</b>	Conducteur en aluminium	12
<b>Figure I.7</b>	Conducteurs toronnés	13
<b>Figure I.8</b>	Conducteurs creux en Al	13
<b>Figure I.9</b>	Conducteurs massifs en Cu	14
<b>Figure I.10</b>	Conducteurs en faisceaux	14
<b>Figure I.11</b>	Configuration des conducteurs en faisceaux pour les lignes HT et THT	15
<b>Figure I.12</b>	Câbles de garde	16
<b>Figure I.13</b>	Câble de garde à fibres optiques incorporées.	17
<b>Figure I.14</b>	Conducteur HT avec une couronne lumineuse (Effet couronne)	18

### Chapitre II

<b>Figure II.1</b>	Surfaces équipotentiellles et ligne de dans le cas d'une charge ponctuelle.	24
<b>Figure II.2</b>	cylindrique entourant un axe chargé	24
<b>Figure II.3</b>	Coupe d'une ligne à n conducteurs	26
<b>Figure II.4</b>	Champ électrique dû à deux axes parallèles (charges opposés)	27
<b>Figure II.5</b>	Quatre points de charge dans un espace libre	28
<b>Figure II.6</b>	Positions des vecteurs $r_p$ par rapport à l'observateur P.	33
<b>Figure II.7</b>	Calcul du champ électrique par la méthode des images.	33
<b>Figure II.8</b>	Emplacement et distance entre les conducteurs (réels et symétriques).	35
<b>Figure II.9</b>	Exemple de caténaire symétrique.	36
<b>Figure II.10</b>	Exemple de caténaire asymétrique	37

---

**Chapitre III**

<b>Figure III.1</b>	Modèle de pylône électrique configuration en double câble.	40
<b>Figure III.2</b>	Variation spatial de la composante $E_x$ et total $E_t$ du champ électrique de configuration (1).	40
<b>Figure III.3</b>	Distribution spatial de la composante $E_x$ du champ électrique.	41
<b>Figure III.4</b>	Distribution spatial du champ électrique $E_t$ .	41
<b>Figure III.5</b>	Distribution de la composante $E_x$ du champ électrique.	42
<b>Figure III.6</b>	Distribution du champ électrique total $E_t$ .	42
<b>Figure III.7</b>	Profil du champ électrique latéral au pied du pylône pour différentes hauteurs.	43
<b>Figure III.8</b>	Distribution du profil du champ électrique de la composante $E_x$ dans le plan x-y.	44
<b>Figure III.9</b>	9 Distribution du profil du champ électrique dans le plan x-y.	45
<b>Figure III.10</b>	Modèle de pylône électrique configuration en double circuit.	46
<b>Figure III.11</b>	Variation spatial de la composante $E_x$ et total $E_t$ du champ électrique.	46
<b>Figure III.12</b>	Modèle de pylône électrique configuration double terne.	47
<b>Figure III.13</b>	Variation spatial de la composante $E_x$ et total $E_t$ du champ électrique.	48
<b>Figure III.14</b>	Distribution spatial de la composante $E_x$ du champ électrique.	48
<b>Figure III.15</b>	Distribution spatial du champ électrique $E_t$ .	48
<b>Figure III.16</b>	Profil du champ électrique suivant l'axe des X au pied du pylône.	49
<b>Figure III.17</b>	Profil du champ électrique suivant l'axe des X au pied du pylône. $Y=70$ .	50
<b>Figure III.18</b>	Profil du champ électrique suivant l'axe des X à la mi-portée ( $Y=140$ m).	51

---

<b>Figure III.19</b>	Configurations des lignes de transport d'énergie.	52
<b>Figure III.20</b>	Profil du champ électrique suivant l'axe des X au pied du pylône.	52
<b>Figure III.21</b>	Profil du champ électrique suivant l'axe des X au cordonnée Y=70m.	53
<b>Figure III.22</b>	Profil du champ électrique suivant l'axe des X à la mi-portée.	54

**Liste des tableaux****Chapitre I**

<b>Tableau I.1</b>	Propriétés des matériaux conducteurs les plus utilisés	11
<b>Tableau I.2</b>	Caractéristiques des différents alliages en aluminium	12
<b>Tableau I.3</b>	matériaux conducteurs utilisés pour les câbles de transmission de puissance	12
<b>Tableau I.4</b>	La formule de RMG pour les 3 différentes dispositions	15

## Sommaire

<b>Introduction générale</b> .....	01
<b>Chapitre I : Généralité Sur Les lignes électriques aériennes</b>	
<b>I. Introduction</b> .....	04
<b>II. Description des réseaux électriques</b> .....	04
II.1 Les réseaux électriques .....	05
II.1.1 Le réseau de transport THT .....	06
II.1.2 Le réseau de transport HT.....	06
II.1.3 Le réseau de répartition MT .....	06
II.1.4 Le réseau de distribution BT .....	07
<b>III. Eléments constitutifs des lignes aériennes</b> .....	07
III.1 Pylônes .....	08
III.1.1 Les pylônes utilisés en HT et THT .....	08
III.1.2 Familles des pylônes .....	09
III.1.3 La disposition de leur armement .....	09
III.1.4 Matériaux .....	09
III.2 Dimensionnement mécanique et charges appliquées au support .....	10
III.2.1 Charges permanentes du support .....	10
III.2.2 Charges dues aux conducteurs et aux câbles de garde .....	10
III.3 Dimensionnement géométrique .....	10
III.4 Fondations .....	10
<b>IV. Conducteurs</b> .....	11
IV.1 Types de conducteurs .....	13
IV.1.1 Conducteur câblés (toronnés) .....	13
IV.1.2 Conducteurs creux .....	13
IV.1.3 Conducteurs massifs .....	13
IV.2 Rayon moyen géométrique des conducteurs toronnés .....	14
IV.3 Rayon moyen géométrique des conducteurs en faisceaux .....	14
IV.4 Les lignes en faisceaux .....	15
IV.5 Câbles de garde .....	16
IV.6 Les isolateurs .....	17
IV.7 Prises de terre des pylônes.....	17

<b>V. Effet couronne</b> .....	18
<b>VI. Conclusion</b> .....	18
<b>Chapitre II : Le champ électrique des lignes HT/THT</b>	
<b>I. Introduction</b> .....	20
<b>II. Formulation des équations de Maxwell en électromagnétisme</b> .....	20
II.1 Équations locale du potentiel et du champ électrique .....	20
II.1.1 Les équations locales du champ électrique .....	21
II.1.2 Flux et divergence, Théorème de Gauss .....	22
II.1.3 Circulation et rotationnel, potentiel V .....	23
II.2 Topographie du champ électrostatique .....	23
II.2.1 Les lignes de champs .....	23
II.2.2 Représentation des équationiels sur des lignes de champ électrique	23
<b>III. Champ électrique d'un axe chargé</b> .....	24
<b>IV. Champ électrique de deux axes parallèles dans l'air</b> .....	26
<b>V. Coefficients de potentiel de Maxwell</b> .....	27
<b>VI. Calcul de champ électrique</b> .....	28
VI.1 Principe de la méthode des charges fictives .....	28
VI.2 Équation de base .....	29
VI.3 Détermination des valeurs des charges fictive .....	30
<b>VII. Champs électromagnétique rayonnés par les lignes hautes tension</b> .....	31
VII.1. Champs électriques des lignes aériennes .....	31
<b>VIII. Calcul du champ électrique par la méthode des images (En 3D)</b> .....	31
<b>IX. Les formes caténaïres des conducteurs</b> .....	36
IX.1. Caténaire symétrique .....	36
IX.2. Caténaire asymétrique .....	37
<b>X. Conclusion</b> .....	37

### Chapitre III : Applications et résultats

<b>I. Introduction</b> .....	39
<b>II. Calcul du Champ électrique au voisinage d'une ligne électrique de 400KV</b> ...	39
II.1.1. La configuration (1) .....	39
II.1.2. La configuration (2) .....	45
II.1.3. La configuration (3) .....	47

---

II.2.	Effets de la géométrie de la ligne sur le champ électrique .....	49
II.3.	Discussion des résultats .....	51
III.	Champ électrique au voisinage d'une ligne électrique a haute tension de 220KV	51
III.1.	Discussion des résultats .....	54
<b>IV.</b>	<b>Conclusion</b> .....	<b>54</b>
	<b>Conclusion générale</b> .....	<b>55</b>
	<b>Bibliographie</b> .....	<b>56</b>

## INTRODUCTION GENERALE

L'énergie électrique est l'un des facteurs les plus essentiels de la stimulation et soutenir la croissance économique et la qualité des vies humaines. La demande intense pour cette énergie électrique est augmentée rapidement, en raison de la croissance démographique et économique l'expansion du monde, ce qui conduit à l'augmentation de la production d'électricité et de l'infrastructure de transport et de distribution de l'énergie électrique, comme les lignes électriques aériennes et les câbles souterraines avec un niveau de tension plus élevé.

Les lignes de transport d'énergie à haute et très haute tension (HT et THT), utilisées pour acheminer l'électricité, génèrent des champs électromagnétiques qui se propagent autour d'elles. Ces champs peuvent avoir des conséquences sur notre quotidien, tant du point de vue de la santé humaine que de l'impact sur les écosystèmes environnants.

L'identification précise des champs électriques de très basse fréquence au voisinage des lignes de transport d'énergie électrique HT et THT est un aspect très important dans la conception. Il a été présenté dans de nombreux articles [1-5]. Des méthodes numériques telles que la méthode des différences finies, la méthode des éléments finis, la méthode des charges fictive sont utilisées pour le calcul des champs électriques quasi-statiques [6-11]. La méthode des charges fictive présente de nombreux avantages par rapport aux autres méthodes numériques de calcul du champ électrique. Il ne nécessite pas d'intégration numérique dans la construction de la matrice des coefficients pour les charges inconnues. Cela rend la programmation plus facile et le calcul plus rapide.

Notre travail consiste à l'évaluation du champ électrique au voisinage des lignes de transport HT et THT pour différentes configurations afin d'avoir une idée sur l'ordre de grandeur des champs électriques.

Un programme sur environnement MATLAB est développé pour modéliser et visualiser la distribution spatiale du champ électrique à proximité des lignes de transport HT et THT à l'aide de la méthode des charge fictives ainsi que la théorie des coefficients de potentiels de Maxwell et la technique d'intégration en 3D.

Notre mémoire de master est structurée en trois chapitres comme suit :

Le premier chapitre présente un aperçu général sur les lignes aériennes HT et THT du point de vue de leurs constructions, constitutions ainsi que les principaux paramètres liés à la matière, aux grandeurs et sections des conducteurs utilisés pour différents niveaux de tension.

Le deuxième chapitre, présente une méthode analytique de calcul du champ électrique au voisinage des lignes de transport d'énergie HT et THT.

Le troisième chapitre sera consacré ou élaboré code de calcul sous l'environnement Matlab à la simulation à l'aide du logiciel Matlab à partir de méthode des charges fictives pour identifier le champ électrique  $E$  généré par les lignes de transport HT et THT 220kV, 400kV pour différentes configurations. La ligne Hassi Messaoud – Biskra 400kV simple terre avec deux conducteurs par phase est prise en considération pour l'évaluation du champ électrique. Enfin, nous terminerons ce travail par une conclusion générale et perspective.

# Chapitre I

## Généralité sur les lignes électriques aériennes

## I. Introduction

Les lignes électriques aériennes sont des éléments essentiels du réseau de transport et de distribution de l'électricité dans le monde. Elles transportent l'électricité sur de longues distances, depuis les centrales électriques jusqu'aux transformateurs de distribution qui la redistribuent aux utilisateurs.

Dans ce chapitre, nous allons voir la construction des lignes électriques aériennes HT et THT, les différentes configurations des réseaux et les éléments constitutifs des lignes aériennes.

## II. Description des réseaux électriques

Un réseau électrique est un système composé de diverses infrastructures énergétiques qui peuvent être plus ou moins disponibles et qui permettent de transporter l'électricité produite dans les centres de production jusqu'aux consommateurs d'électricité. Il est composé des lignes électriques qui sont exploitées à différents niveaux de tension, reliées entre elles des postes électriques. Ces postes électriques permettent de distribuer l'électricité et de la transformer en différents niveaux de tensions à l'aide des transformateurs de puissance. En outre, le réseau électrique doit assurer une gestion dynamique de l'ensemble de la production, du transport et de la consommation, en mettant en place des régulations visant à garantir la stabilité de l'ensemble [12].

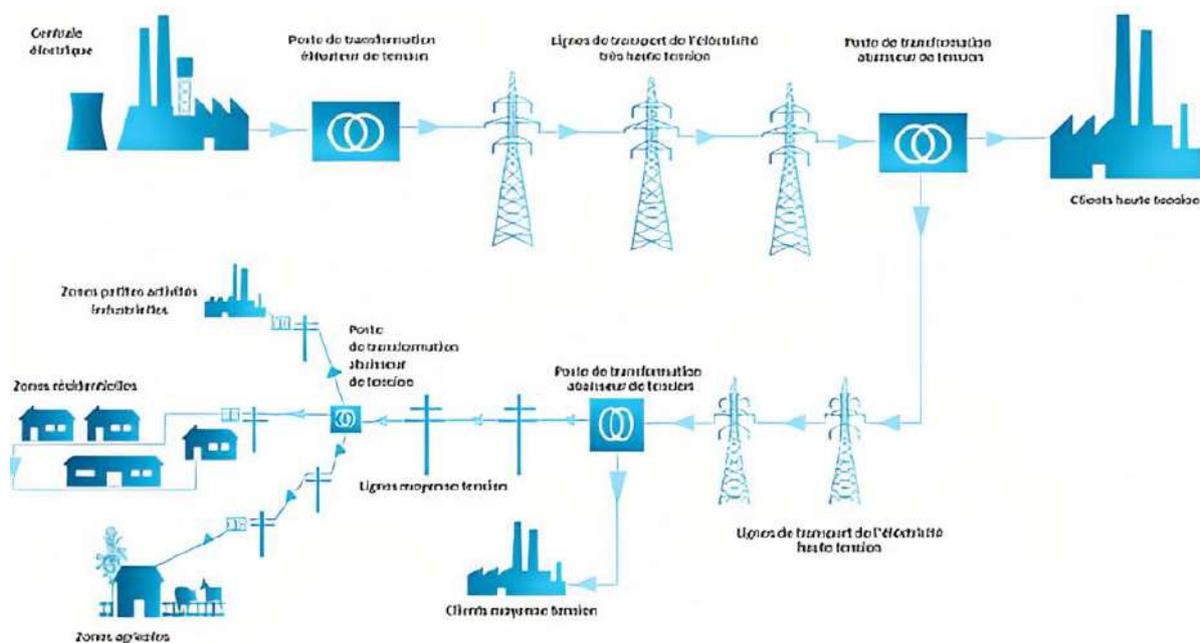


Figure I.1 Schéma d'un réseau électrique.

## II.1 Les réseaux électriques

Ces infrastructures associent un ensemble de matériels électrotechniques en un système exploité selon une architecture maillée ou arborescente, à différents niveaux de tension. Elles sont constituées de lignes aériennes, de câbles souterrains et de postes de transformation à travers lesquels circule l'électricité. Situés aux nœuds du maillage ou de l'arborescence du réseau, les postes de transformation accueillent les transformateurs qui changent le niveau de tension ainsi que les appareils de coupure et de contrôle-commande du réseau.

On distingue trois niveaux de réseaux :

- le réseau de grand transport et d'interconnexion qui achemine, en 400 kV ou 220 kV, de grandes quantités d'énergie sur de longues distances avec un faible niveau de perte;
- les réseaux régionaux de répartition qui répartissent l'énergie au niveau des régions et alimentent en 225 kV, 90 kV et 63 kV les réseaux de distribution publique et les gros clients industriels ;
- les réseaux de distribution à 20 kV et 400 V, qui desservent les consommateurs finals en moyenne tension (PME-PMI) ou en basse tension (clientèle domestique, tertiaire, petite industrie).

Leur gestion est assurée par des gestionnaires de réseaux de transport électrique (GRTE) et de distribution (GRD) qui exercent leur activité en monopole sur leur zone de desserte.

Le GRTE Exploite, maintient et développe le réseau de transport de l'électricité en Algérie (réseaux de tension >50 kV) en vue de garantir une capacité adéquate par rapport aux besoins de transit et de réserve et ce conformément à la loi 02-01

Le GRTE, assure le transport de l'électricité, dans des conditions permettant d'assurer la qualité de service ainsi que la protection et la sécurité des installations et des personnes

GRTE assure ses activités à travers des directions centrales et six directions de Régions Transport de l'Electricité: Alger, Centre, Oran, Sétif, Annaba, Hassi Messaoud. Ces régions, à travers 24 services de transport répartis sur le territoire national assurent une maintenance de proximité du réseau de transport et la relation directe avec les utilisateurs du réseau [12].

### **GRTE exploite et maintient un réseau composé de:**

- 32 308 km de lignes dont 5 084 km en 400 kV
- 366 postes dont 25 en 400 kV avec 891 transformateurs de puissance
- 116 poste de de transformation mobiles
- 65 833 MVA de capacité de transformation
- 4 647 MVAR capacité de compensation de la puissance réactive

- 21 042 km de réseau fibre optique.

### II.1.1 Le réseau de transport THT

Le réseau de transport THT est généralement utilisé pour acheminer l'énergie électrique des centres de production éloignés vers les centres de consommation. Les réseaux de transport sont une grande grille qui couvre tout le territoire est reliée aux sources et utilisations d'énergie (groupes, transformateurs) [13].



Figure I.2 Ligne de transport THT.

### II.1.1.2 Le réseau de transport HT

La fonction principale de ce réseau est de transporter l'électricité depuis le réseau de transport vers les grands centres de consommation, qui peuvent être :

- Soit publics avec l'accès au réseau de distribution MT,
- Soit privés avec un accès direct en HT aux abonnés à grande consommation (supérieure à 10 MVA), notamment les industries telles que la sidérurgie, la cimenterie, la chimie et les transports ferroviaires.



Figure I.3 Exemple de ligne de transport HT et THT.

### II.1.1.3 Le réseau de répartition MT

Les utilisateurs peuvent être regroupés de manière dense dans les villes ou éloignés les uns des autres à la campagne. Ils sont connectés à un réseau de distribution qui est alimenté par un

poste de distribution recevant l'énergie des centrales éloignées par le biais du réseau de transport. Les lignes de distribution à moyenne tension (MT) partent des postes de distribution pour alimenter les postes de transformation répartis dans la zone à desservir. Ces postes de transformation réduisent la tension à une valeur appropriée pour alimenter le réseau de distribution publique auquel les abonnés sont connectés via des branchements [13].

#### **II.1.1.4 Le réseau de distribution BT**

Le réseau en question est généralement connu de nous car il s'agit de la tension 220/380V en Algérie.

### **III. Eléments constitutifs des lignes aériennes**

Les lignes électriques sont utilisées pour transporter de l'énergie sur de longues distances. Elles sont composées de trois phases, chacune étant constituée d'un faisceau de plusieurs conducteurs (de 1 à 4) espacés de quelques centimètres afin de limiter l'effet couronne, qui entraîne des pertes en ligne, différentes des pertes Joule. L'ensemble de ces trois phases électriques constitue un "terne". Le choix de la nature, de la silhouette, du dimensionnement et du type de pylônes à utiliser lors de la construction des lignes de transmission d'électricité est primordial car ils ont un impact direct sur les valeurs des champs électromagnétiques générés par ces lignes une fois en exploitation. Les pylônes sont soigneusement reliés à la terre par un réseau de terre efficace et supportent les conducteurs par des isolateurs en verre ou en porcelaine qui résistent aux tensions élevées des lignes électriques. La longueur d'un isolateur dépend généralement de la tension de la ligne électrique qu'il supporte. Les isolateurs sont également munis d'éclateurs qui sont constitués de deux pointes métalliques se faisant face. Leur utilité apparaît lorsque la foudre frappe la ligne électrique : un arc électrique va alors s'établir au niveau de l'éclateur qui contournera l'isolateur. Sans éclateur, la surtension entre le pylône et la ligne électrique foudroyée détruirait systématiquement l'isolateur. Une ligne aérienne est composée principalement de :

- Câbles conducteurs,
- Pylônes (supports),
- Isolateurs,
- Fil de garde,
- Mise a la terre.

### III.1 Pylônes

Pour transporter l'électricité produite vers les utilisateurs, des supports sont nécessaires pour maintenir les conducteurs (câbles) à une distance minimale de sécurité du sol et des obstacles environnants. Ceci est crucial pour assurer la sécurité des personnes et des installations à proximité des lignes. Le choix des pylônes dépend de plusieurs facteurs tels que les lignes à réaliser, l'environnement, les contraintes mécaniques liées au terrain et aux conditions climatiques de la zone. Pour les lignes à très haute tension, on utilise des pylônes métalliques en treillis à chaînette ou tubulaire. Les pylônes sont utilisés pour le transport et les poteaux pour la distribution.

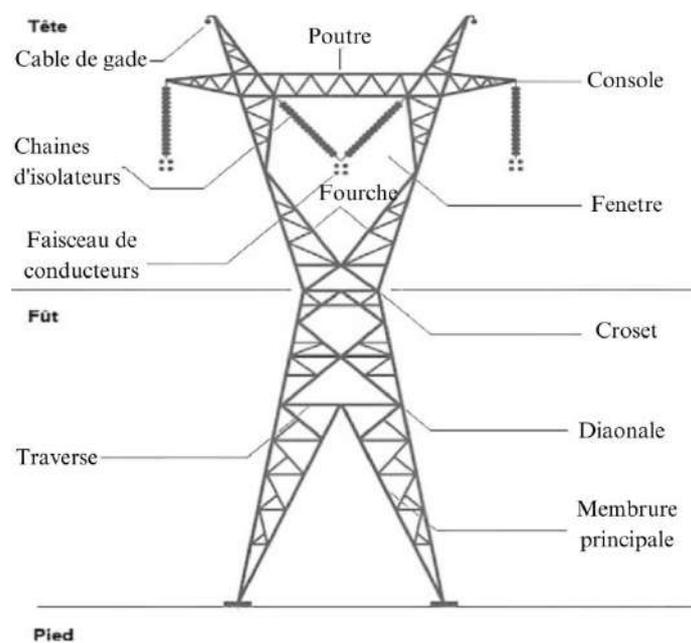


Figure I.4 Les éléments constitutifs d'un pylône électrique.

#### III.1.1 Les pylônes utilisés en HT et THT

La nécessité d'augmenter le niveau de tension pour le transport de l'énergie électrique à des distances éloignées en traversant de grandes vallées et rivières ont donné lieu à l'apparition de nouvelles structures de pylônes en acier.

Des pylônes ou supports maintiennent ces câbles à une certaine distance du sol, de façon à assurer la sécurité des personnes et des installations situées au voisinage des lignes. Il existe différentes catégories et modèles de pylônes en fonction de :

- Niveau de tension ;
- l'aspect des lieux ;
- le respect de l'environnement ;
- les conditions climatiques

### III.1.2 Familles des pylônes

Les supports des pylônes sont classés en familles pour former un catalogue de pylônes. Chaque famille regroupe un ensemble de supports ayant des silhouettes similaires, mais avec des résistances mécaniques et des hauteurs différentes. Ces hauteurs sont obtenues en prolongeant un fût de hauteur de base avec des extensions normalisées pour faciliter la production. On distingue essentiellement les familles de supports suivantes :

- les supports métalliques treillis,
- les supports monopodes métalliques, utilisables pour tous les niveaux de tension,
- les supports monopodes en béton, réservés aux lignes 60 kV.

Les principales géométries d'accrochage des conducteurs sur les têtes des pylônes sont les suivantes :

- Chat
- Double drapeau
- Type triangle

### III.1.3 La disposition de leur armement

L'armement d'une ligne électrique désigne l'ensemble des accessoires (tête du support, ferrures et isolateurs) nécessaires au maintien de la ligne électrique en haut d'un mât ou d'un pylône. Il doit être conçu de manière à empêcher tout contact entre les conducteurs ainsi qu'avec le sol dans l'espace compris entre deux supports consécutifs, que l'on appelle "portée". On distingue généralement trois types d'armement leur forme et leur taille peuvent varier considérablement, allant des simples poteaux en bois ou en béton d'environ 12 mètres de hauteur, jusqu'aux pylônes en treillis d'acier de plus de 50 mètres de hauteur, pesant parfois plus de 100 tonnes. Ces supports sont conçus en fonction des contraintes mécaniques générées par les câbles qu'ils doivent supporter, ainsi que des contraintes d'isolement électrique [14]:

### III.1.4 Matériaux

Les matériaux employés doivent avoir la capacité de :

- répondre aux contraintes imposées par l'exploitation de l'ouvrage,
- satisfaire aux exigences environnementales telles que définies par la réglementation.

Les aciers de construction (en particulier ceux formés à froid), les boulons, écrous et rondelles doivent être en conformité avec les exigences de la norme EN 50341. De manière générale, les aciers utilisés doivent avoir de bonnes propriétés de galvanisation, norme NF A 35-503 (Produits sidérurgiques - Aciers pour galvanisation par immersion à chaud).

### **III.2. Dimensionnement mécanique et charges appliquées au support**

Les supports doivent être dimensionnés selon les spécifications et réglementations techniques en vigueur à GRTE. Ils sont soumis à quatre types de charges [15] :

#### **III.2.1 Charges permanentes du support**

En utilisant ces termes, on fait référence aux charges résultant du poids de tous les éléments qui constituent le support une fois qu'il est isolé du reste de l'ouvrage (les charges des conducteurs et des câbles de garde) [4].

#### **III.2.2 Charges dues aux conducteurs et aux câbles de garde**

Les contraintes dépendent du domaine d'utilisation du support et sont associées aux conditions climatiques prises en compte. Elles sont appliquées aux points d'attache des câbles, déterminés pour chaque support. Les charges climatiques sur le support correspondent notamment à la prise en compte des efforts induits par :

- le poids des monteurs travaillant sur le support
- le levage du support (haubanage éventuel des consoles, ...),
- le déroulage des câbles,
- la rupture d'un câble ou d'un faisceau de câbles.

Elles doivent être calculées suivant les prescriptions de la partie 1 et 3 de la norme EN 50341. [4].

### **III. 3 Dimensionnement géométrique**

Le dimensionnement d'un support doit respecter les contraintes géométriques imposées par la tenue diélectrique des supports (application pratique des règles d'isolement) d'une part, et les possibilités d'intervention sur les ouvrages en exploitation d'autre part. Ces contraintes définissent :

- les distances à la masse,
- les distances entre câbles,
- les distances de travail à respecter sur les ouvrages [15].

#### **III.4 Fondations**

On appelle fondation, la partie d'un ouvrage qui se trouve en contact direct avec le terrain d'assise et qui a pour fonction de transmettre à celui-ci le poids et les différentes surcharges appliquées à la structure [64]. Une fondation peut être unique (mono-pode) ou à raison d'un massif par pied (multi-pode) leur nature dépend du type de pylône.

#### IV. Conducteurs

Les conducteurs aériens subissent l'impact des conditions météorologiques telles que la température, le vent, la pluie, le verglas ..., doivent être sélectionnés en conséquence pour résister à toutes ces intempéries. La capacité de transport d'une ligne aérienne dépend du type de conducteur utilisé ainsi que des conditions météorologiques. Il convient de veiller à ce que la chaînette formée par le conducteur ne s'approche pas trop du sol ou de la végétation en raison de la dilatation thermique causée par l'effet Joule. Les matériaux les plus utilisés dans la fabrication des câbles sont : l'aluminium, le cuivre, l'acier, le tableau ci-dessous présente leurs différentes caractéristiques [14] :

Tableau I.1 Propriétés des matériaux conducteurs les plus utilisés [16]

Propriétés	Cuivre	Aluminium	Acier
Résistivité à 20°C (10 <sup>-8</sup> Ω.m)	1.72	2.8	~15
Masse volumique (kg.m <sup>-3</sup> )	8 890	2 700	7 800
Contrainte de Rupture à la traction (Mpa)	380 à 450	150 à 190	1410 à 1450

Le cuivre est le conducteur car il a une faible résistivité et il peut aussi tenir lors des chocs auxquels sont soumis les câbles ; Par contre il est difficilement manipulable. Aluminium devient ainsi le 2e meilleur matériau pour les câbles dans le domaine des lignes électriques mais sa contrainte de rupture reste trop faible. Afin d'augmenter sa dureté et sa résistance mécanique l'aluminium a été traité et associé à d'autres métaux et les matériaux qui en sont ressortis sont: l'aluminium écroui dur, Aluminium recuit et les alliages (Aluminium-Acier, Almélec). Les caractéristiques de ces matériaux seront présentées dans le tableau ci-dessous. Les conducteurs aériens sont soumis à l'action des facteurs atmosphériques : température, vent, pluie, verglas etc. Ces facteurs interviennent de façon importante dans le choix des paramètres d'une ligne haute-tension : type de conducteur, hauteur et distance des pylônes, tension mécanique maximale sur le conducteur afin de maintenir une garde au sol suffisante, ...etc. Le choix de ces paramètres a une grande influence sur les coûts de construction et d'entretien d'une ligne de transport, ainsi que sur sa fiabilité et sur sa longévité [17].



Figure I.5 Câble en cuivre nu.



Figure I.6 Conducteur en aluminium.

La température maximale du conducteur est déterminée par la température qu'il peut supporter pendant de longues périodes de temps sans dommages. La température maximale, peut être affectée par la capacité à dissiper la chaleur et la température ambiante du milieu dans lequel le câble sera installé. Pour un fonctionnement en toute sécurité, la somme de la température ambiante et l'élévation de température dans le système d'isolation ne doit pas dépasser la température totale admissible du conducteur [18].

Tableau I.2: Caractéristiques des différents alliages en aluminium [16]

Matériaux	Résistivité à 20°C (10-8Ω.m)	Contrainte de Rupture à la traction (Mpa)	Température maximale permanente (°C)
Aluminium écroui dur	2,825	160 à 180	75
Almélec	3,26	315 à 325	75
Aluminium recuit	2,92	59 à 97	250

Prenant en considération le prix, le cuivre et l'aluminium sont clairement le meilleur choix pour les conducteurs, mais il y a eu une certaine expérience pratique avec le sodium [15].

Tableau I.3 : matériaux conducteurs utilisés pour les câbles de transmission de puissance

Matériaux	Avantage	Inconvénient
Aluminium	Peu couteux	Conductivité électrique et thermique est d'environ 60% que celle du cuivre
Cuivre	Haute Conductivité électrique	Couteux
Argent	Légèrement supérieur celui de cuivre	Extrêmement couteux
Sodium	Extrêmement bon marché	Les questions de sécurité sur la manipulation et l'entretien. Conductivité électrique et thermique médiocres

## IV.1 Types des conducteurs

Ils existent trois types de conducteurs : câblés (toronnés), massif et conducteurs creux.

### IV.1.1. Conducteur câblés (toronnés)

Les câbles sont généralement constitués de brins de même section circulaire, disposés en couches spirales dont le sens est alterné d'une couche à la suivante autour d'un brin central rectiligne, afin de donner aux conducteurs une souplesse suffisante [19].



Figure I.7. Conducteurs toronnés.

### IV.1.2. Conducteurs creux

Le conducteur d'origine choisi pour la ligne de transport de 287,5 kV de Hoover Dam-Los Angeles était un conducteur en cuivre creux [19].

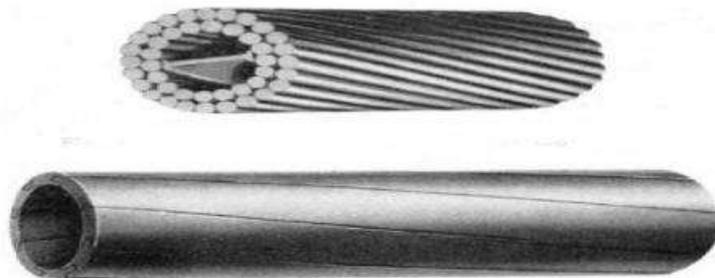


Figure I.8. Conducteurs creux en Al.

### IV.1.3. Conducteurs massifs

Le conducteur massif est composé d'un seul brin de cuivre. Il est souvent utilisé pour les liaisons longues avec passage dans des gaines [19].

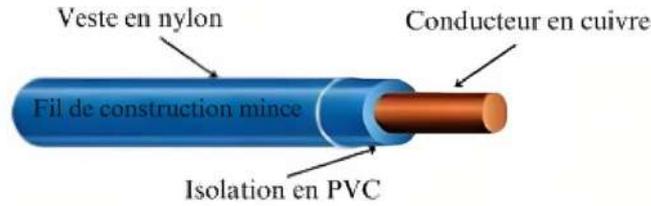


Figure I.9. Conducteurs massifs en Cu.

#### IV.2 Rayon moyen géométrique des conducteurs toronnés

Pour les conducteurs toronnés, les valeurs de RMG peuvent être calculées à partir de la section utile  $S$  du conducteur et du nombre de brins [19].

#### IV.3 Rayon moyen géométrique des conducteurs en faisceaux

Dans les lignes à haute tension, le conducteur de phase peut être composé d'un faisceau de deux, trois, quatre conducteurs ou plus, en fonction de la tension, de même diamètre et disposés symétriquement les uns par rapport aux autres. Le rayon moyen géométrique des conducteurs en faisceaux est une mesure statistique utilisée pour caractériser la distribution de la section transversale des conducteurs dans un faisceau. Il est calculé en prenant la racine carrée de l'aire totale de la section transversale du faisceau, divisée par le nombre de conducteurs dans le faisceau. En d'autres termes, il s'agit d'une mesure de la taille moyenne des conducteurs dans le faisceau [19].

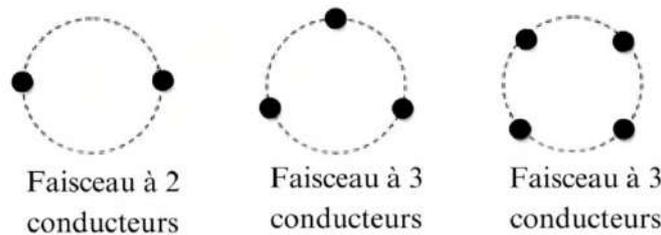


Figure I.10. Conducteurs en faisceaux.

Dans le cas des lignes à faisceaux, le paramètre  $r_{\text{éq}}$ , également appelé rayon moyen géométrique ou simplement rayon équivalent, est utilisé dans les calculs et est déterminé par la relation suivante:

$$r_{\text{éq}} = (N \cdot r \cdot R^{N-1})^{1/N} \quad (\text{I.1})$$

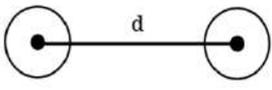
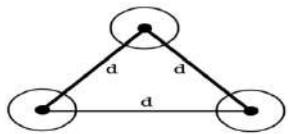
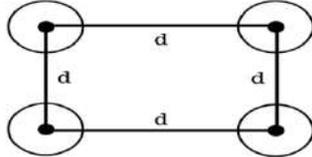
$$r_{\text{éq}} = r [N \cdot (R/r^{N-1})]^{1/N} \quad (\text{I.2})$$

$$r_{\text{éq}} = R (N \cdot r/R)^{1/N} \quad (\text{I.3})$$

Le rayon moyen géométrique des conducteurs en faisceaux est utilisé dans diverses applications, notamment dans le domaine des transmissions électriques pour caractériser la résistance et la réactance des lignes de transmission. Il est également utilisé dans l'industrie

pour caractériser la taille des particules dans les suspensions colloïdales. Dans un tel cas, il faut connaître le RMG résultant du faisceau, qui est constitué de conducteurs de un ou plusieurs torons, comme indiqué dans le tableau suivant [19]:

Tableau I.4 La formule de RMG pour les 3 différentes dispositions

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

N.B : RMG est le rayon moyen géométrique d'une seule corde et RMG est le rayon moyen géométrique d'un faisceau entier [8].

Calcul du Rayon moyen géométrique du faisceau :

$$G_{11} = \sqrt[n]{n \cdot g_{11} \cdot r_t^{n-1}} \tag{I.4}$$

#### IV.4 Les lignes en faisceaux

Les lignes à faisceaux sont réservées aux réseaux à haute et très haute tension pour minimiser les pertes de puissance. La figure 11 illustre les différents types de conducteurs en faisceaux utilisés pour les lignes hautes tension [17].

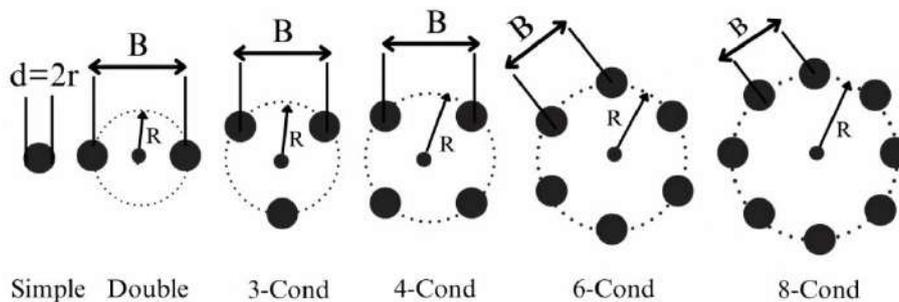


Figure I.11 : Configuration des conducteurs en faisceaux pour les lignes HT et THT.

avec :  $d = 2 \cdot r$  est le diamètre d'un seul conducteur et  $r$  son rayon ;

$B$  : la distance entre deux conducteurs adjacents ;

$R$  : Rayon de la ligne en faisceau.

#### IV.5 Câbles de garde

Le câble de garde est un conducteur placé en tête de pylône, au-dessus des phases et attachés directement aux pylônes; son rôle est de protéger la ligne électrique contre les coups de foudre, d'améliorer le fonctionnement des protections par mise en parallèle des prises de terre des pylônes et de réduire les phénomènes d'induction sur les lignes de télécommunications ou les canalisations métalliques voisines. Ils sont généralement fabriqués en alliage d'aluminium et de magnésium appelé almélec-acier, spécialement conçu pour les conducteurs électriques. Grâce à des traitements thermiques et mécaniques, l'almélec acquiert une résistance à la rupture double de celle de l'aluminium pur écroui tout en maintenant une conductivité élevée proche de celle de l'aluminium pur (15 %) [17].

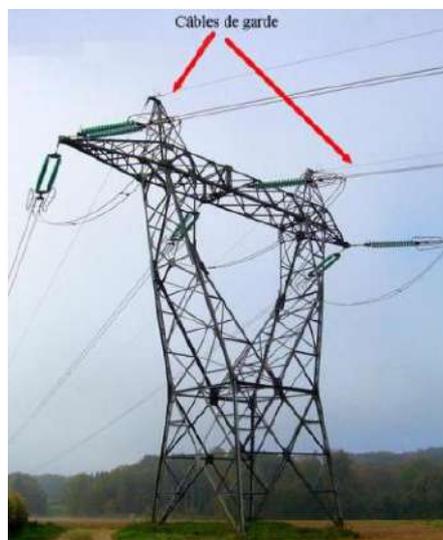


Figure I.12. Câbles de garde.

Il existe deux types de câble de garde:

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

Equipés de fibres optiques, ils permettent de transmettre les informations nécessaires pour la protection, la conduite et l'exploitation du réseau ; on parle alors d'OPGW (Optical GroundWire). C'est aussi un moyen d'offrir des solutions haut débit pour les collectivités territoriales [17].

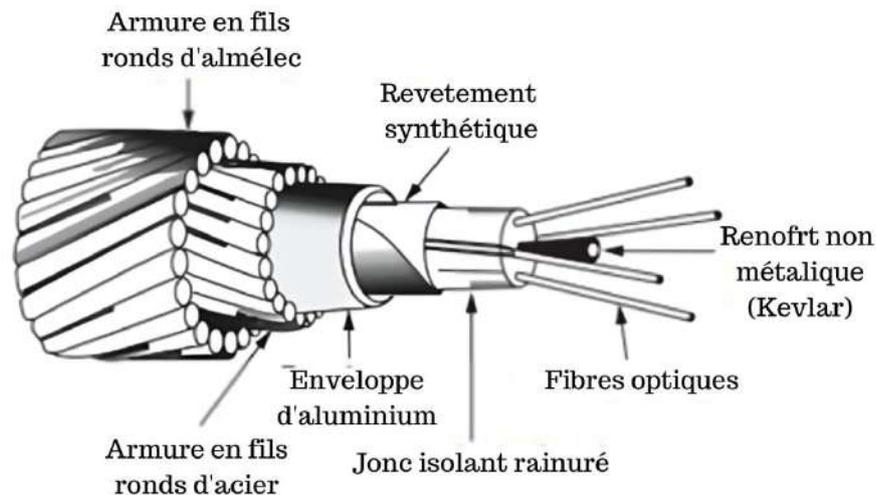


Figure I.13. Câble de garde à fibres optiques incorporées.

#### IV. 6 Les isolateurs

Leur fonction est d'assurer la fixation des conducteurs sous tension sur leurs supports et d'isoler électriquement ces deux éléments de la ligne. Pour cette raison, le choix du type d'isolateur, sa surveillance en exploitation et les essais de réception sont des aspects qui sont soigneusement pris en compte. Il comprend essentiellement deux parties :

**a. Isolent :** Les matériaux utilisés pour réaliser la partie isolante sont la céramique et le verre

**b. Pièces métalliques de liaison :** Ces pièces, relient les parties isolantes entre elles ou au support, sont réalisées dans différents métaux ou alliages qui doivent résister aux contraintes mécaniques et thermiques. Les métaux ou alliages plus couramment employés sont :

- les fontes malléables, de caractéristiques mécaniques voisines de celles des aciers doux
- les aciers au carbone, de caractéristiques spécifiques, pour des pièces forgées (tige désolateur)
- Les alliages de zinc qui sont parfois utilisés pour coller directement les capots sur les parties isolantes des conducteurs
- les alliages aluminium pour la fabrication des capots [14].

#### IV.7 Prises de terre des pylônes

Les pylônes des lignes de transport d'énergie sont reliés à des prises de terre conçues avec grande précaution afin de leur assurer une faible résistance effectivement. Il ne faut pas que la chute de tension dans la prise de terre provoquée par un courant de foudre qui frappe le pylône dépasse la tension de contournement des isolateurs. Sinon les trois phases de la ligne se mettent en court-circuit entre elles et à la terre.

## V. Effet couronne

Le phénomène de l'effet couronne se produit sur tous les conducteurs et les lignes électriques soumis à des tensions élevées. Dès que le champ électrique à la surface du conducteur atteint une valeur suffisamment élevée (supérieure à la valeur d'ionisation de l'air, environ 30 kV/cm), l'air s'ionise et forme une couronne lumineuse autour du conducteur. Cette décharge couronne n'est visible que sur les lignes à très haute tension ( $U \geq 400$  kV) pendant les heures sombres. Les désavantages de l'effet couronne sont les pertes de couronne, les interférences avec les ondes radio, les bruits et les vibrations des conducteurs. L'effet couronne devient très problématique pour les réseaux électriques à partir de 345 kV. Actuellement, le bruit et le champ électrique superficiel sont les paramètres environnementaux les plus importants à considérer lors de la construction de nouvelles lignes électriques avec une tension supérieure ou égale à 750 kV. L'effet couronne se produit principalement sur les conducteurs de ligne, mais également sur les parties métalliques pointues reliées à la haute tension, telles que les isolateurs, surtout par temps humide [19].

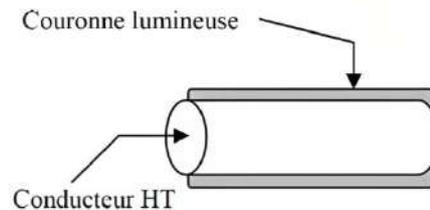


Figure I.14. Conducteur HT avec une couronne lumineuse (Effet couronne).

## VI. Conclusion

Les lignes électriques aériennes à haute tension sont des infrastructures essentielles pour le transport et la distribution de l'électricité sur des longues distances.

Dans ce chapitre, nous avons vu que les lignes aériennes à haute tension sont généralement composées de pylônes qui supportent les conducteurs, lesquels sont isolés par des isolateurs pour assurer la sécurité et l'efficacité du transport de l'électricité. Elles jouent un rôle crucial dans l'approvisionnement en énergie électrique et dans le fonctionnement des réseaux électriques.

# Chapitre II

## Le Champ électrique au voisinage des lignes HT/THT

## I. Introduction

Les lignes électriques aériennes à haute tension créent des champs électromagnétiques. Ces champs sont générés par le courant électrique qui circule à travers les lignes et peuvent avoir un effet sur l'environnement et la santé humaine.

Dans ce chapitre, Nous allons voir comment calculer le champ électrique au voisinage des lignes de transport d'énergie HT et THT par la méthode des charges fictive.

## II. Formulation des équations de Maxwell en électromagnétisme

Les équations de Maxwell, aussi appelées équations de Maxwell-Lorentz, sont des lois fondamentales de la physique. Ces équations montrent notamment qu'en régime stationnaire, les champs électrique et magnétique sont indépendants l'un de l'autre, alors qu'ils ne sont pas en régime variable. Elles gouvernent la répartition du champ électrique et du potentiel, dans un milieu donné. Ces équations montrent notamment qu'en régime stationnaire, les champs électrique et magnétique sont indépendants l'un de l'autre. Ces équations vectorielles aux dérivées partielles de couplage (II.1) et (II.2) et deux de conservation (II.3) et (II.4) sous forme intégrale ou locale sont [14] :

$$\text{Équation de Maxwell-Faraday} \quad \text{rot.} \vec{E} = -\frac{\partial \vec{B}}{\partial t}, \quad e = -\frac{\partial \vec{\phi}}{\partial t} \quad (\text{II.1})$$

$$\text{Équation de Maxwell} \quad \text{rot.} \vec{H} = \vec{J}_c - \frac{\partial \vec{D}}{\partial t}, \quad \int_c \vec{H} d\vec{l} = \sum_{i=1}^n I_i \quad (\text{II.2})$$

$$\text{Équation de Maxwell-Gauss} \quad \text{div} \vec{D} = \rho_v, \quad \iint_s \vec{D} d\vec{S} = Q_{int} \quad (\text{II.3})$$

$$\text{Équation de conservation du flux} \quad \text{div} \vec{B} = 0, \quad \iint_s \vec{B} d\vec{S} = 0 \quad (\text{II.4})$$

$\vec{J}_c$ : La densité de courant ( $A/m^2$ ).

$\rho_v$ : La densité volumique de charges ( $C/m^3$ ).

On peut écrire ces équations sous forme différentielle. On passe de la forme différentielle à la forme intégrale en utilisant les théorèmes de Stokes et d'Ostrogradski. On remarque dans la deuxième équation de Maxwell l'existence de deux sortes de courants  $\vec{J}_c$  et  $\frac{\partial \vec{D}}{\partial t}$ . Ceux-ci représentent respectivement les courants de conduction  $\vec{J}_c = \sigma \vec{E}$  et le courant de déplacement  $\vec{J}_d = \frac{\partial \vec{D}}{\partial t} = \varepsilon \frac{\partial \vec{E}}{\partial t}$  la somme des deux courants  $\vec{J}_c + \vec{J}_d$  constitue le courant total  $\vec{J}_t$ .

### II.1 Équations locale du potentiel et du champ électrique

Dans les états stationnaires, le champ électrique est appelé champ électrostatique. La notion du champ électrique à deux sens:

Au sens qualitatif: c'est la région de l'espace où il existe un état électrique susceptible de se traduire par des forces.

Au sens quantitatif: c'est le vecteur, dont la grandeur est égale au quotient de la force s'exerçant sur une quantité d'électricité par cette quantité ( $\vec{F}_e / q$ ), ce rapport est un invariant, et dont la direction est celle de la force.

$$\vec{E} = \frac{\vec{F}_e}{q}, \quad [\text{V/m}] \quad (\text{II.5})$$

### II.1.1 Les équations locales du champ électrique

#### a. Rotationnel

En régime stationnaire, l'équation de Maxwell- Faraday s'écrit: Si on prend le rotationnel de l'expression  $\vec{E} = -\overrightarrow{\text{grad}} V$ , et sachant que le rotationnel d'un gradient est toujours nul, on obtient l'équation locale  $\overrightarrow{\text{rot}} \vec{E} = 0$  vérifiée en chaque point. Cette relation est valable pour une distribution quelconque de charges et on a :

$$\overrightarrow{\text{rot}} \vec{E} = 0 \quad (\text{II.6})$$

Le champ électrique est donc un champ à rotationnel nul.

Si on calcule le flux du vecteur  $\overrightarrow{\text{rot}} \vec{E}$ , à travers une surface (S), s'appuyant sur une courbe (C) fermée quelconque on a:

$$\iint_S \overrightarrow{\text{rot}} \vec{E} \cdot \overrightarrow{dS} \quad (\text{II.7})$$

Or d'après le théorème de Stokes :

$$\iint_S \overrightarrow{\text{rot}} \vec{E} \cdot \overrightarrow{dS} = \oint \vec{E} \cdot \overrightarrow{dl} \quad (\text{II.8})$$

On en déduit que :

$$\oint \vec{E} \cdot \overrightarrow{dl} = 0 \quad (\text{II.9})$$

La circulation du vecteur  $\vec{E}$  le long d'un circuit fermé est nulle.

#### b. La divergence

Si on applique le théorème de Green- Ostrogradski au champ électrique:

$$\Phi = \oiint_S \vec{E} \cdot \overrightarrow{dS} = \iiint_V \text{div} \vec{E} \cdot \overrightarrow{dS} \quad (\text{II.10})$$

Et sachant que, pour une distribution volumique de charges, le théorème de Gauss est:

$$\Phi = \iiint_V \frac{\rho}{\epsilon_0} dv \quad (\text{II.11})$$

On obtient:

$$\iiint_V \left( \text{div} \vec{E} - \frac{\rho}{\epsilon_0} \right) dv = 0 \quad (\text{II.12})$$

Cette expression est valable quelque soit le volume  $dv$ , on a donc:

$$\operatorname{div} \vec{E} = \frac{\rho}{\varepsilon_0} \quad (\text{II.13})$$

Cette expression représente la forme locale du théorème de Gauss. Elle est appelée aussi équation de Poisson pour le champ. Lorsqu'il n'y a pas de charges au point considéré,  $\operatorname{div} \vec{E} = 0$ ; le champ  $\vec{E}$  est à flux conservatif.

### c. Equations de Poisson et Laplace

On a vu que  $\operatorname{div} \vec{E} = \frac{\rho}{\varepsilon_0}$ , or  $\vec{E} = -\overrightarrow{\operatorname{grad}} V$  on en remplaçant le champ électrostatique dans la forme locale du théorème de Gauss par le gradient du potentiel électrostatique, nous obtenons :

$$\operatorname{div} \vec{E} = \frac{\rho}{\varepsilon} = \operatorname{div} -\overrightarrow{\operatorname{grad}} V = \frac{\rho}{\varepsilon} \rightarrow \Delta V + \frac{\rho}{\varepsilon} = 0 \quad (\text{II.14})$$

C'est l'équation de Poisson pour le potentiel;  $\Delta V$  est le **Laplacien** de la fonction potentiel et  $\rho$  la densité volumique de charges.

Cette équation, appelée équation de Poisson, constitue en fait une équation locale qui gouverne la répartition du potentiel dans un milieu de permittivité et avec une densité de charge volumique de charge  $\rho$ .

Si aucune charge n'est présente dans le milieu la densité volumique de charge  $\rho = 0$  avec ces hypothèses on obtient l'équation de Laplace :

$$\Delta V = 0 \quad (\text{II.15})$$

### II.1.2 Flux et divergence, théorème de Gauss

L'équation de Maxwell-Gauss est la même dans tout type de régime. Les propriétés associées s'appliquent donc au champ électrique stationnaire. Rappelons que cette équation s'écrit:

$$\operatorname{div} \vec{E} = \frac{\rho}{\varepsilon_0} \quad (\text{II.16})$$

Cette équation relie le champ électrique à ses sources, ainsi le flux de  $E$  à travers toute surface fermée s'écrit:

$$\iint_S \vec{D} \cdot d\vec{S} = \frac{Q_{int}}{\varepsilon_0} \quad (\text{II.17})$$

Le flux de  $E$  à travers toute surface fermée est égal au quotient par  $\varepsilon_0$  de la charge totale contenue dans le volume  $Q_{int}$  délimité par cette surface  $S$  et  $\varepsilon_0$  permittivité du vide.

### II.1.3 Circulation et rotationnel, potentiel V

En régime stationnaire, l'équation de Maxwell- Faraday s'écrit:

$$\overrightarrow{\operatorname{rot}} \vec{E} = \vec{0} \quad (\text{II.18})$$

Il en résulte que le rotationnel du champ  $E$  est égal à zéro.

Comme le rotationnel d'un gradient est toujours identiquement nul, il est possible ici d'identifier le champ  $\vec{E}$  au gradient d'une fonction scalaire  $V$  que l'on appelle potentiel.

$$\vec{E} = -\overrightarrow{\text{grad}} V \quad (\text{II.19})$$

On dit que le champ électrique  $E$  dérive du potentiel scalaire  $V$ .

Le signe négatif étant ici purement conventionnel indique que le champ électrique est dirigé vers les potentiels décroissants.

## II.2 Topographie du champ électrostatique

Le concept de lignes de champ (également appelées lignes de force) est très utile pour se faire une représentation spatiale d'un champ de vecteurs. Les lignes de champ et les équipotentiels sont des courbes et des surfaces qui permettent de représenter la topographie du champ et du potentiel électriques d'une distribution de charges donnée. Les surfaces équipotentielles sont telles qu'en tout point le potentiel électrique garde la même valeur. Elles sont constamment perpendiculaires aux lignes de champ.

### II.2.1 Les lignes de champs

Le champ électrique peut être visualisé à l'aide de lignes de champ, une ligne de champ est une courbe tangente en chaque point au vecteur champ électrostatique.

- Deux lignes de champ ne peuvent se croiser qu'en un point où le champ est nul.
- Les lignes de champ sont orientées dans le sens des potentiels décroissant.
- Les lignes de champ divergent depuis un point où le potentiel est maximum et convergent vers les zones où le potentiel est minimum.

### II.2.2 Représentation des équipotentiels sur des lignes de champ électrique

On appelle équipotentielle la surface reliant l'ensemble des points ayant la même valeur du potentiel électrostatique.

- Les lignes de champs sont normales aux surfaces équipotentielles et sont dirigées dans le sens des potentiels décroissants.
- Les surfaces équipotentielles entourent les charges de la distribution.
- Plus les surfaces équipotentielles sont resserrées plus le champ est intense.
- Le potentiel n'admet pas d'extrema en dehors des charges.
- Le champ électrique est toujours perpendiculaire à la surface équipotentielle.

Les équipotentielles et les lignes de champ forment un système de surface et de courbes orthogonales.

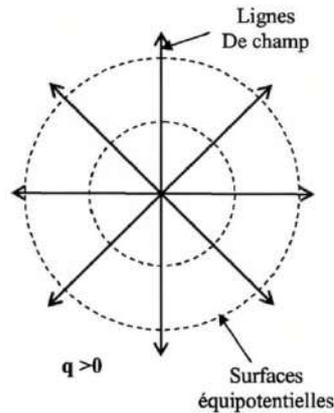


Figure II.4 Surfaces équipotentielles et ligne de dans le cas d'une charge ponctuelle.

### III. Champ électrique d'un axe chargé

Soit un cylindre de longueur infinie (conducteur métallique fin et très long) dont la charge linéique est  $q'$ . La permittivité du milieu environnant est donnée par :  $\varepsilon = \varepsilon_0 \varepsilon_r$ .

$\varepsilon_0$  : Permittivité diélectrique du vide.

$\varepsilon_r$  : Permittivité diélectrique relative du milieu.

L'espace entourant le conducteur est limité par un second cylindre coaxial de rayon infini et portant la charge  $-q'$ . Pour trouver l'intensité du champ électrique en un point situé à une distance  $r$  de l'axe figure II.2, nous faisons passer par ce point une surface cylindrique de longueur  $\Delta x$  dont l'axe coïncide avec l'axe chargé. Nous appliquons le théorème de Gauss qui exprime que le flux du vecteur  $D$  à travers une surface fermée qui renferme un volume  $V$  est égal à la somme des charges qui se trouvent à l'intérieur de ce volume. La surface fermée, dans la figure II.2, est constituée par la surface du cylindre et par deux bases. La somme des charges situées à l'intérieur du cylindre est  $q' \cdot \Delta x$ .

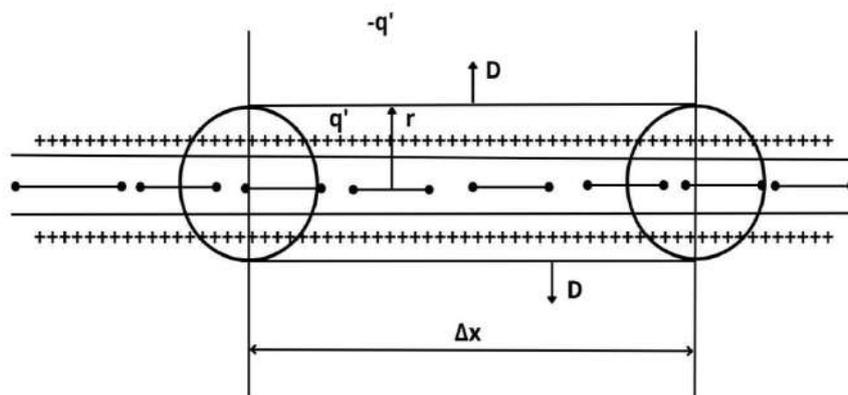


Figure II.2 cylindrique entourant un axe chargé.

Le flux du vecteur  $\vec{D}$  ne traverse que la surface latérale car le champ électrique d'un axe chargé, de longueur infinie, est radial :

$$\vec{D} = \varepsilon_0 \varepsilon_r \vec{E} \quad (\text{II.20})$$

Nous obtenons alors :

$$\oiint \vec{D} \cdot \vec{dS} = q' \cdot \Delta x \quad (\text{II.21})$$

Où, l'intégrale vaut  $2\pi r \Delta x \cdot D(r)$ , donc :

$$\vec{D}(r) = \frac{q'}{2 \cdot \pi \cdot r} \cdot \vec{e}_r \quad (\text{II.22})$$

Le champ électrique y correspondant est donné par :

$$\vec{E} = -\overrightarrow{\text{grad}} V \quad (\text{II.23})$$

Le potentiel (par rapport à une référence) est lié au champ électrique par :

$$\vec{E}(r) = \frac{q'}{2 \cdot \pi \cdot \varepsilon_0 \cdot \varepsilon_r \cdot r} \cdot \vec{e}_r \quad (\text{II.24})$$

Et le potentiel est déterminé par intégration :

$$V = \int_{r_0}^{r_1} \vec{E} \cdot \vec{dr} \quad (\text{II.25})$$

Où ' $r_0$ ' localise la référence et ' $r_1$ ' le point «  $P$  » dont nous recherchons à déterminer le potentiel électrique.

Le potentiel scalaire par rapport au conducteur en un point quelconque situé à la distance ' $r$ ' de l'axe est donné par :

$$V(r) = - \int_{r_{11}}^r \vec{E} \cdot \vec{dr} = \frac{q'}{2 \cdot \pi \cdot \varepsilon} \cdot \ln \frac{r}{r_{11}} \quad (\text{II.26})$$

Dans le cas d'une ligne aérienne, nous pouvons remplacer  $\varepsilon$  par  $\varepsilon_0$  car le milieu ambiant est de l'air. Un raisonnement analogue pour les câbles souterrains nous donne :  $\varepsilon \neq \varepsilon_0$  (car  $\varepsilon_r \neq 1$ ) [11].

Soit un système de  $n - 1$  conducteurs très longs soumis à des tensions électriques continues ou à basse fréquence. Nous pouvons considérer que ces conducteurs sont chargés chacun par une charge linéique  $q_i$  (l'indice de la charge correspond au numéro du conducteur). Les  $n - 1$  conducteurs métalliques sont tendus parallèlement à la surface du sol.

Le  $n - 1$  conducteur est le sol. Il est considéré comme un conducteur parfait (lignes de champ électrique perpendiculaires à la surface). En vertu du principe de superposition, il est équivalent de le remplacer par ' $n-1$ ' conducteurs, images des originaux, dont la charge est de

signe contraire et disposés symétriquement par rapport à l'interface sol-air (figure II.3). Le champ ne s'en trouve ainsi pas modifié et le calcul devient immédiat [20].

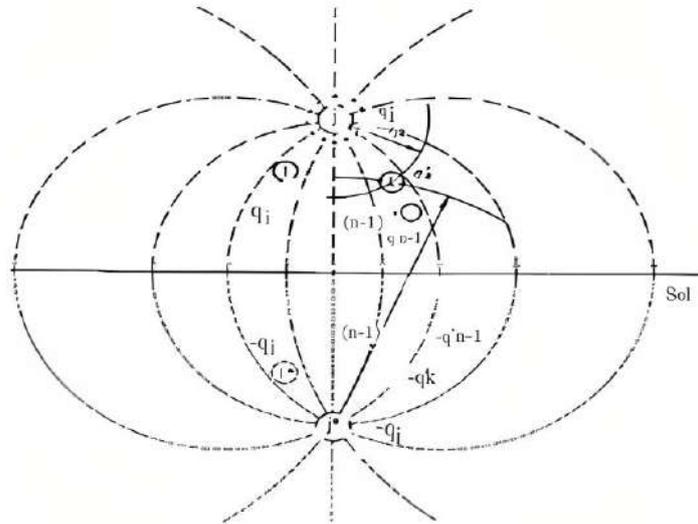


Figure II.3 Coupe d'une ligne à n conducteurs.

#### IV. Champ électrique de deux axes parallèles dans l'air

Soit une paire d'axes parallèles ( $j$ ) et ( $j^*$ ), de longueur infinie (figure II.3) et soit  $(+q'_j)$ , et  $(-q'_j)$ , les charges linéiques de l'un et de l'autre. En un point ' $P$ ', la résultante de l'intensité du champ ( $\vec{E}_j$ ) est égale à la somme vectorielle des champs dus à chacune des charges, avec [17]:

$$\vec{E}(r) = \frac{q'_j}{2 \cdot \pi \cdot \epsilon_0 \cdot r_r \cdot v} \cdot \vec{e}_{jp} \quad (\text{II.27})$$

$$\vec{E}(r) = \frac{q'_j}{2 \cdot \pi \cdot \epsilon_0 \cdot r_r \cdot v} \cdot \vec{e}_{j^*p} \quad (\text{II.28})$$

Dans lesquelles  $r_{jp}$  et  $r_{j^*p}$  sont les distances respectives du point ' $P$ ' au conducteur ' $j$ ' et au conducteur ' $j^*$ '.

$e_{jp}$  et  $e_{j^*p}$  sont les vecteurs unitaires orientés respectivement selon ' $p_j$ ' et ' $p_{j^*}$ '. Nous prenons ensuite les contributions de chaque conducteur (principe de superposition), nous aurons :

$$\vec{E}_j = \vec{E} + \vec{E}^* \quad (\text{II.29})$$

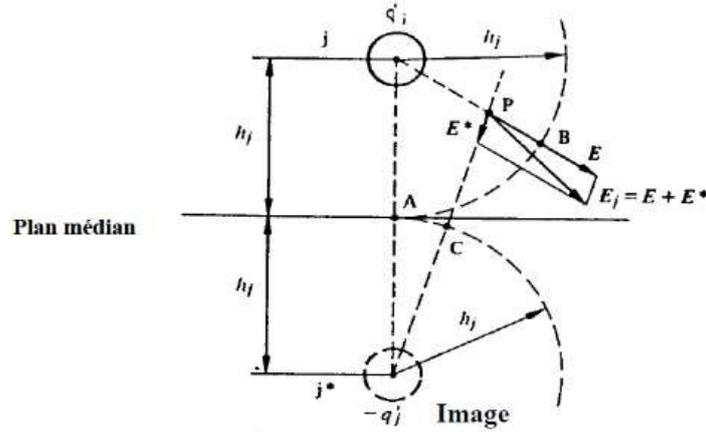


Figure II.4 Champ électrique dû à deux axes parallèles (charges opposés).

### V. Coefficients de potentiel de Maxwell

Donc le potentiel du point 'P', dû à la paire de charges  $(+q'_j)$  et  $(-q'_j)$ , par rapport au plan médian sera, en séparant les influences de  $+q'_j$  et  $-q'_j$ :

$$v_p = \int_{r_{j0}}^{h_j} \frac{q'_j}{2\pi\epsilon_0 \cdot r} dr - \int_{h_j}^{r_{jp}} \frac{q'_j}{2\pi\epsilon_0 \cdot r^*} dr^* \quad (\text{II.30})$$

$$v_p = \frac{q'_j}{2\pi\epsilon_0} \ln \frac{h_j}{r_{jp}} + \frac{q'_j}{2\pi\epsilon_0} \ln \frac{r_{j^*p}}{h_j} \quad (\text{II.31})$$

$$v_p = \frac{q'_j}{2\pi\epsilon_0} \ln \frac{r_{j^*p}}{h_{jp}} \quad (\text{II.32})$$

Pour un ensemble de 'n-1' conducteurs, l'expression de la tension vaut :

$$v_{pn} = \frac{1}{2\pi\epsilon_0} \sum_{j=1}^{n-1} q'_j \ln \frac{r_{j^*p}}{h_{jp}} \quad (\text{II.33})$$

Si le point 'P' est placé sur le conducteur 'k', la formule permet de calculer la tension entre ce conducteur et la terre :

$$v_{kn} = \frac{1}{2\pi\epsilon_0} \sum_{j=1}^{n-1} q'_j \ln \frac{r_{j^*p}}{h_{jk}} \quad (\text{II.34})$$

Où  $r_{jk}$  et  $r_{j^*p}$  sont les distances entre l'axe géométrique du conducteur 'k' et respectivement les axes des conducteurs 'j' et 'j\*'. Pour  $j = k$ , on a  $r_{kk} = 2$ .

$h_k$  représente la distance entre le conducteur et son image, tandis que  $r_{kk}$  est le rayon du conducteur 'k'.

Si nous posons [11] :

$$P_{kj} = \frac{r_{j^*k}}{h_{jk}} \quad (\text{II.35})$$

La tension  $v_{kn}$  s'écrit

$$v_{kn} = \frac{1}{2\pi\epsilon_0} \sum_{j=1}^{n-1} P_{kj} \cdot q_j' \quad (\text{II.36})$$

Puisque  $r_{j^*k} = r_{kj}$  nous avons donc  $P_{Kj} = P_{j^*k}$ .

Les coefficients  $P, k, j$  sont appelés coefficients de potentiel de Maxwell.

## VI. Calcul de champ électrique

Pour une ligne de transmission aérienne avec des formes complexes de conducteurs tels qu'une caténaire, il est nécessaire d'utiliser une méthode numérique pour calculer le champ électrique. L'application de cette méthode à chaque forme de conducteur implique un passage d'une forme analytique consistant en des dérivations unitaires à une forme numérique.

### VI.1. Principe de la méthode des charges fictives

Le principe de base de la méthode de simulation de charge est très simple. Si plusieurs charges discrètes de n'importe quel type (charge ponctuelle, charge linéiques de longueur infinie où finie, charge annulaire) sont présentes dans une région, le potentiel électrostatique à un point quelconque e peut être trouvé par l'addition des potentiels résultant des différentes charges. Soit  $q_j$  un certain nombre de n de charges, le potentiel  $V$  à un point quelconque c est dans l'espace, par exemple, sur la figure (II.5), qui montre quatre charges  $q_1, q_2$  et  $q_3$  et  $q_4$  dans un espace libre.

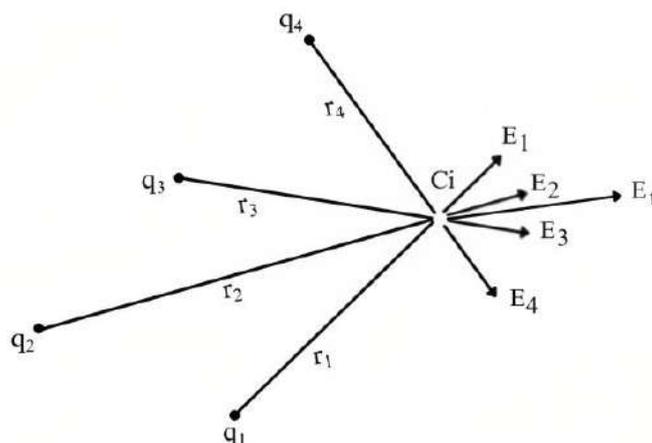


Figure II.5 Quatre points de charge dans un espace libre.

En appliquant le principe de superposition, une relation peut être trouvée entre le potentiel  $V_i$  au point  $C_i$  et le nombre des charges fictives

$$V_i = \frac{q_1}{4\pi\epsilon_0 r_1} + \frac{q_2}{4\pi\epsilon_0 r_2} + \frac{q_3}{4\pi\epsilon_0 r_3} + \frac{q_4}{4\pi\epsilon_0 r_4} \quad (\text{II.37})$$

$$V_i = P_{i1}q_1 + P_{i2}q_2 + P_{i3}q_3 + P_{i4}q_4 \quad (\text{II.38})$$

$$V_i = \sum_{j=1}^4 P_{ij} q_j \quad (\text{II.39})$$

ou :

$P_{i1}, P_{i2}, P_{i3}, P_{i4}$  : Coefficients de potentiel

#### IV.1.2 Équation de base

Pour le calcul du champ électrique, les charges distribuées sur les surfaces du conducteur sont remplacées par des charges fictives arrangées à l'intérieur du conducteur. Dans le but de déterminer la grandeur de ces charges, on choisit  $n$  points sur les surfaces du conducteur (points contours), et on applique le principe de superposition, tel que le potentiel  $V_i$  du point  $P_i$  dû à toutes les charges fictives  $q_j$  introduites sera donné par:

$$V_i = \sum_{j=1}^4 P_{ij} q_j \quad (\text{II.40})$$

ou :

$q_j$  : Charge fictive

$P_{ij}$ : Coefficient de potentiel dépendant des types de charges et de la distance entre les points  $i$  et  $j$ .

$V_i$ : Potentiel du point  $i$ .

$n$ : Nombre total des charges fictives

L'expression de l'intensité du champ électrique est calculée par la superposition des grandeurs vectorielles de différents composants. Par exemple, dans une système de coordonnées cartésiennes, la composante  $E$ , du champ électrique d'un point  $i$  est donnée par :

$$E_i = \sum_{j=1}^n F_{ij} q_j \quad (\text{II.40})$$

$F(i,j)$ : Le coefficient de champ est exprimé par:

$$F_{ij} = -\frac{\partial P_{ij}}{\partial x} \quad (\text{II.41})$$

On peut alors exprimer les relations qui relient tous les potentiels connus  $V_{i(i=1\dots n)}$  à toutes les charges fictives  $q_j (j=1\dots n)$  d'autre façon Pour déterminer la matrice des charges fictives, on est

obligé de connaître le potentiel dans le point  $P_i$ . Pour cette raison on peut ramener le point  $P_i$ , sur le contour du conducteur pour avoir le même potentiel puisque ce dernier est connu. Dans le cas général, la détermination de la distribution des charges fictives se base sur l'expérience de l'utilisateur de cette méthode, finalement nous obtenons un système de  $n$  équations linéaires pour  $n$  charges connues sous forme matricielle, c'est-à-dire:

$$\begin{bmatrix} P_{11} & P_{12} & \cdot & \cdot & P_{1n} \\ P_{21} & P_{22} & \cdot & \cdot & P_{2n} \\ \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot \\ \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot \\ P_{n1} & P_{n2} & \cdot & \cdot & P_{nn} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} q_1 \\ q_2 \\ \cdot \\ \cdot \\ q_n \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} V_1 \\ V_2 \\ \cdot \\ \cdot \\ V_n \end{bmatrix} \quad (\text{II.42})$$

Ce système peut être résolu par les méthodes classiques (ex: élimination de Gauss). La solution permet de déterminer les valeurs des charges  $q$ , en fonction des valeurs imposées du potentiel  $V_i$ .

### VI.1.3 Détermination des valeurs des charges fictives

La position des charges est choisie d'une manière arbitraire, mais après une certaine expérience on arrive à réaliser dès le premier essai une configuration qui ne sera pas trop éloignée de l'optimum auquel on essaie d'arriver. L'application de l'équation (II.43) pour un nombre de point d'un contour choisis dont le potentiel  $V_i$  est connu, nous permettons d'établir la forme matricielle suivante :

$$[q_j] = [P_{ij}]^{-1} \cdot [V_{ci}] \quad (\text{II.43})$$

Les valeurs  $V$ , du potentiel sont des valeurs connues aux points  $i$  situés sur les contours des électrodes, ainsi il est nécessaire de vérifier si l'ensemble de charges calculées satisfasse aux conditions aux limites. Après avoir déterminé les valeurs des charges fictives, après la résolution du système matricielle équation II .43 par une méthode directe ou itérative [11].

$$[V_{vi}] = [P_{ij}] \cdot [q_j] \quad (\text{II.44})$$

On change l'arrangement spatial des  $n$  charges fictives, on calcule à nouveau les valeurs de la charge  $q_j$  et on répète la vérification jusqu'à ce que toutes les différences soient petites

## VII. Champs électromagnétique rayonnés par les lignes haute tension :

Les lignes de transport d'énergie électrique à haute tension sont des générateurs d'énergie électromagnétique, produisant généralement à la fois de l'énergie rayonnante et de l'énergie non rayonnante (champs). Par conséquent, les lignes haute tension ne produisent pratiquement que des champs électrique et magnétique. Ces champs sont générés par le passage de l'électricité dans les conducteurs et dépendent à la fois de la distance par rapport à la source et du courant qui circule dans la source.

### VII.1 Champs électriques des lignes aériennes

Le champ électrique est généré dans les lignes de transmission lorsque des tensions sont présentes dans les phases, et il n'est pas affecté par le courant électrique qui les traverse. Si des courants circulent dans les conducteurs, un champ magnétique se forme également autour de la ligne de transmission en plus du champ électrique. L'intensité du champ électrique dépend de la configuration géométrique des conducteurs et de la valeur de la tension appliquée. Elle diminue au fur et à mesure que l'on s'éloigne de la source. Étant donné que le potentiel électrique est nul à la surface du sol, il est préférable de mesurer le champ électrique à une hauteur aussi élevée que possible par rapport au sol [21].

L'intensité du champ électrique produite par les lignes hautes tensions dépend des facteurs suivants :

- La distance entre les conducteurs et le sol.
- L'espacement entre les phases si nous avons deux circuits l'un à côté de l'autre ainsi que la configuration géométrique des conducteurs.
- Par le milieu environnant (objet de grande taille à proximité comme les arbres, clôtures, etc.)
- La distance tangentielle à l'axe de la ligne.
- L'altitude du point de mesure par rapport à la terre et la tension de la ligne [21].

### VIII. Calcul du champ électrique par la méthode des images (En 3D)

Le champ électrique produit par la ligne de transmission à n'importe quel point dans l'espace peut être représenté à l'aide de vecteurs et de phases. Un vecteur de champ électrique est caractérisé par trois composantes spatiales, comme illustré dans l'équation suivante :

$$\vec{E} = [E_x; E_y; E_z] \quad (\text{II.45})$$

Chaque phase représente la quantité avec une variation sinusoïdale dans le temps décrite par une magnitude et un angle de phase  $\varphi_x$

$$E_t(t) = E_x e^{j\varphi_x} e^{j\omega t} \quad (\text{II.46})$$

Trois composantes orthogonales d'un vecteur sont appelées vecteurs de phase.

$$\hat{E} = [\hat{E}_x; \hat{E}_y; \hat{E}_z] \quad (\text{II.47})$$

Les champs électriques causés par les lignes de haute tension aériennes sont des champs basse fréquence et peuvent être approximés par des champs quasi-statiques. Pour le calcul des éléments suivants sont requis:

- La géométrie du système, la position des conducteurs de phase et des fils de terre dans l'espace 3D et les dimensions des conducteurs,
- La géométrie du sol,

- Les potentiels sur les éléments conducteurs (conducteurs de phase et terre),
- La position de l'observateur.

Le calcul de  $\vec{E}$  est basé sur la sommation de la contribution des éléments finement petits de chaque conducteur de phase en un seul point d'observation  $P$ . Le calcul peut être décrit par les étapes suivantes :

- La différenciation des conducteurs en éléments de longueur finie,
- Le calcul de la charge à travers la longueur du conducteur pour chaque élément (le calcul est basé sur les coefficients de potentiel de Maxwell utilisant la méthode des images),
- L'évaluation de  $\vec{E}$  en un seul point d'observation en résultat de la sommation de la contribution au champ de chaque élément.

L'équation de l'intensité du champ électrique au voisinage d'une ligne de transport constituée de  $k$  conducteurs en forme de caténaire au point d'observation  $P$ , dérivée de la loi de Coulomb, est définie comme suit :

$$\vec{E} = \varepsilon \int_r \vec{dE} = \frac{1}{4\pi\varepsilon_0} \int_r \frac{qdl}{r^3} \vec{r} \quad (\text{II.48})$$

où  $q$  est l'élément de charge de la ligne,  $dl$  est l'élément de la ligne,  $\Gamma$  est la forme des conducteurs (caténaire),  $\vec{E}$  est le vecteur du point de l'élément de conducteur  $dl$  aux points d'observation  $P$  dans la figure 3. Le vecteur  $\vec{E}$  peut être écrit comme :

$$\vec{r} = (\vec{r}_p - \vec{r}_0) \quad (\text{II.49})$$

avec la définition du vecteur  $\vec{E}$ , l'équation peut être réécrite comme suit :

$$\vec{E} = \int_r \vec{dE} = \frac{1}{4\pi\varepsilon_0} \int_r \frac{qdl \cdot (\vec{r}_p - \vec{r}_0)}{|\vec{r}_p - \vec{r}_0|^3} \quad (\text{II.50})$$

Le champ électrique dans ce modèle est créé non seulement par les charges dans les conducteurs, mais aussi par les charges créées en raison de l'induction électrostatique dans le plan de terre.

La distribution et la densité de charge dans ce sol sont inégales. La résolution de ce problème est effectuée par la méthode des images. La méthode crée un nouveau conducteur symétrique par rapport au plan de frontière pour chaque conducteur réel. Les conducteurs images ont la charge opposée à celle des conducteurs réels, comme indiqué dans la figure II.6 [22].

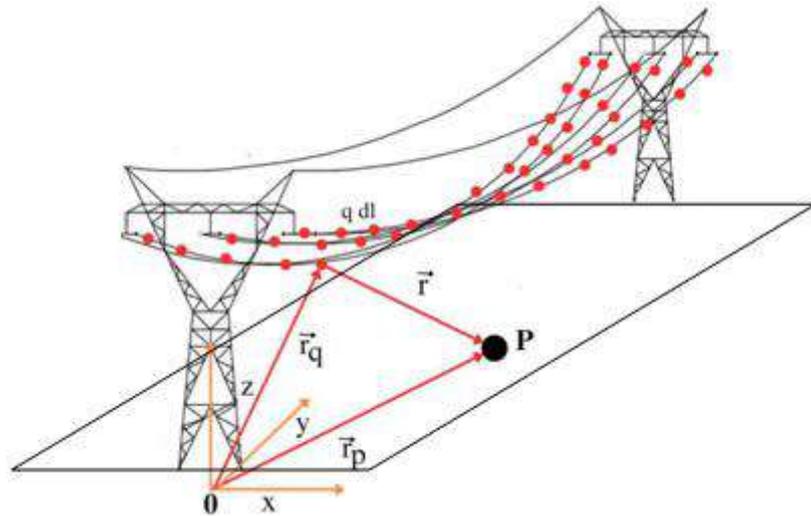


Figure II.6 Positions des vecteurs  $r_p$  par rapport à l'observateur P

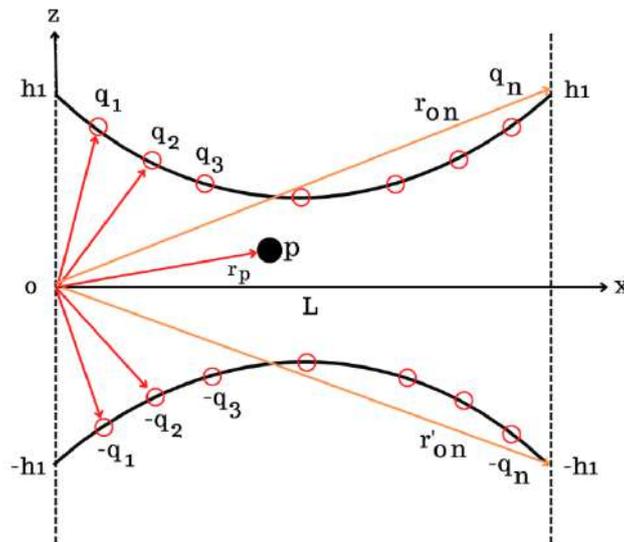


Figure II.7 Calcul de l'intensité du champ électrique par la méthode des images.

Le vecteur total de champ électrique  $\vec{E}$  au point d'observation P est égal à la superposition des champs électriques créés par chaque conducteur  $\vec{E}_k$  et son image  $\vec{E}'_k$ , comme illustré dans la figure II.7, où k est l'indice du conducteur et l'apostrophe en indice supérieur indique l'objet image dans le sol. Dans notre cas ( $k = 6$ ) comme illustré dans la Fig. II.7.

$$d\vec{E}_{k,k'} = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{+qdl \vec{r}_p - \vec{r}_{0k}}{(\vec{r}_p - \vec{r}_0)^3} + \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{-qdl \vec{r}_p - \vec{r}'_{0k}}{(\vec{r}_p - \vec{r}'_0)^3} \quad (\text{II.52})$$

La densité de charges linéiques peut être calculée en résolvant des équations simultanées qui relient les charges de ligne aux potentiels sur les conducteurs. Ces équations étaient...

$$V_1 = P_{11}q_1 + P_{12}q_2 + \dots + P_{1k}q_k \quad (\text{II.53})$$

$$V_2 = P_{21}q_1 + P_{22}q_2 + \dots + P_{2k}q_k \quad (\text{II.54})$$

$$V_k = P_{k1}q_1 + P_{k2}q_2 + \dots + P_{kk}q_k \quad (\text{II.55})$$

La forme matricielle est la suivante :

$$[V_k] = [P_{kk}] \cdot [q_k] \quad (\text{II.56})$$

où

- $k$  = nombre de conducteurs ;
- $V_k$  = potentiel du conducteur  $k$  par rapport au plan de terre ;
- $P$  = coefficient de potentiel ;
- $q_k$  = charge de ligne par unité de longueur sur le conducteur  $k$ .

les valeurs des coefficients de potentiel étaient les suivantes :

$$P_{kk} = \frac{1}{2\pi\epsilon_0} \ln \frac{2h_k}{r_k} \quad (\text{II.57})$$

$$P_{kj} = \frac{1}{2\pi\epsilon_0} \ln \frac{S_{kj'}}{S_{kj}} \quad (\text{II.58})$$

où

$h_k$  : hauteur du conducteur  $k$  au-dessus du sol ;

$\epsilon_0$  : permittivité du vide ;

$r_k$  : rayon du conducteur  $k$  ;

$S_{kj}$  : distance entre les conducteurs  $k$  et  $j$  ;

$S_{kj'}$  : distance entre le conducteur  $k$  et l'image du conducteur  $j$  ;

$P_{kk}$  : coefficient de potentiel propre du conducteur  $k$  ;

$P_{kj}$  : coefficient de potentiel mutuel des conducteurs  $k$  et  $j$ .

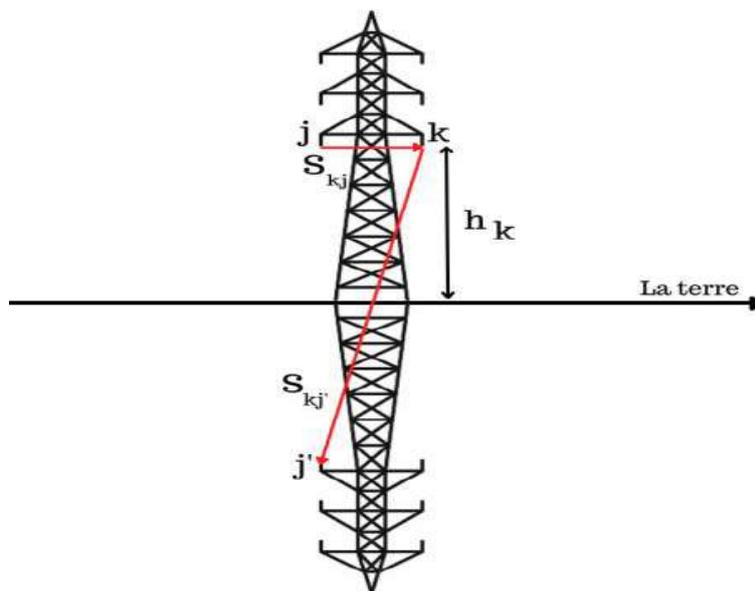


Figure II.8 Emplacement et distance entre les conducteurs (réels et symétriques).

Une fois que les valeurs du potentiel et des coefficients de potentiel ont été déterminées, les valeurs des densités de charges de ligne ont été calculées en résolvant l'équation II.57. Une fois ces valeurs obtenues, le champ électrique en n'importe quel point désiré a également été déduit en additionnant les contributions dues aux charges élémentaires de chaque conducteur (sources et images) [22].

De plus, une tension oscillante harmonique est ajoutée pour finaliser le calcul de  $\vec{E}$  la densité de charge linéaire change également en fonction des harmoniques et donc l'équation II.56 peut être réécrite comme suit [22] :

$$[\hat{q}_k] = [P]^{-1}[\hat{U}_k] \quad (\text{II.59})$$

Et enfin, l'équation pour déterminer le champ  $\vec{E}$  sous les lignes aériennes composées de k conducteurs avec une tension  $\hat{U}_k$  en forme de caténaire, divisée en n segments de longueur dl et au point d'observation P, est déduite comme suit:

$$\vec{E} = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \sum_{k=1}^k \sum_{n=1}^n \left[ \frac{q_{kn} d\vec{l}(\hat{r}_p - \vec{r}_{0kn})}{(\vec{r}_p - \vec{r}_{0kn})^3} + \frac{-q_{kn} d\vec{l}(\hat{r}_p - \vec{r}'_{0kn})}{(\vec{r}_p - \vec{r}'_{0kn})^3} \right] \quad (\text{II.60})$$

Où les vecteurs  $r_{0kn}$  et  $r'_{0kn}$  déterminent la position de l'élément conducteur et son image selon le système de coordonnées tel qu'illustré dans la Figure II.7. En suite, en considérant les coordonnées spatiales en 3D, les composantes de  $\vec{E}$  sont décrites comme suit [13] :

$$\vec{E}_x = \vec{E}_{xr} + \vec{E}_{xl} \quad (\text{II.61})$$

$$\vec{E}_y = \vec{E}_{yr} + \vec{E}_{yl} \quad (\text{II.62})$$

$$\vec{E}_z = \vec{E}_{zr} + \vec{E}_{zl} \quad (\text{II.63})$$

Le vecteur  $\vec{E}$  est donc réécrit comme suit :

$$\vec{E} = \hat{E}_x \hat{e}_x + \hat{E}_y \hat{e}_y + \hat{E}_z \hat{e}_z \quad (\text{II.64})$$

$$\vec{E} = \hat{E}_{xr} \hat{e}_x + \hat{E}_{yr} \hat{e}_y + \hat{E}_{zr} \hat{e}_z + j\hat{E}_{xl} \hat{e}_x + j\hat{E}_{yl} \hat{e}_y + j\hat{E}_{zl} \hat{e}_z \quad (\text{II.65})$$

Où  $\hat{e}_x$  et  $\hat{e}_y$  sont les vecteurs unitaires sur les axes x, y et z, respectivement, et les vecteurs  $\vec{E}_r = \hat{E}_{xr} \hat{e}_x + \hat{E}_{yr} \hat{e}_y + \hat{E}_{zr} \hat{e}_z$  et  $\vec{E}_i = \hat{E}_{xl} \hat{e}_x + \hat{E}_{yl} \hat{e}_y + \hat{E}_{zl} \hat{e}_z$ , sont la partie réelle et imaginaire de  $\vec{E}$ , L'amplitude du champ électrique est généralement caractérisée par sa valeur efficace résultante, qui est égale à [13].:

$$E = \sqrt{(E_x^2 + E_y^2 + E_z^2)} = \sqrt{(E_r^2 + E_i^2)} \quad (\text{II.66})$$

$$E = \sqrt{(E_{xr}^2 + E_{yr}^2 + E_{zr}^2) + (E_{xi}^2 + E_{yi}^2 + E_{zi}^2)} \quad (\text{II.67})$$

## IX. Les formes caténaïres des conducteurs

### IX.1. Caténaire symétrique

Une caténaire symétrique entre deux pylônes électriques dans une ligne aérienne de transport d'énergie électrique est une configuration utilisée pour acheminer l'électricité sur de longues distances. Dans une caténaire symétrique, les trois conducteurs de phase sont généralement disposés de manière équidistante par rapport au conducteur neutre. Cette configuration permet une répartition équilibrée des charges et un fonctionnement optimal du système.

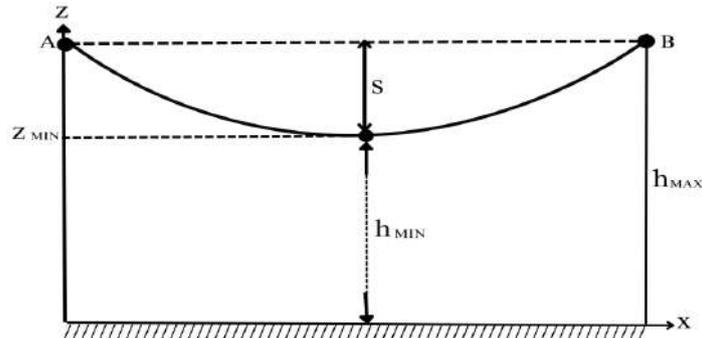


Figure II.9 Exemple de caténaire symétrique.

Si on prend en considération l'effet du fléchissement dû au poids de la ligne, la courbe dessinée par la ligne est supposée de forme parabolique, donnée par la relation suivante [19]:

$$h = h_{min} + S \left( \frac{2 \cdot y}{L} \right)^2 \quad (\text{II.68})$$

avec :

$h$  : La hauteur maximal (au voisinage du pylône) ;

$h_{min}$  : La hauteur minimale (au niveau de la flèche) ;

$S$ : La flèche de la ligne ;

$L$ : La longueur de la ligne.

### IX.2. Caténaire asymétrique

Dans une ligne aérienne de transport d'énergie électrique, une caténaire asymétrique entre deux pylônes électriques fait référence à une configuration dans laquelle les conducteurs ne sont pas placés à la même hauteur. Il convient de noter que les caténaïres asymétriques est une configuration spécifique utilisée dans les lignes électriques à haute tension, telles que les conducteurs de phase sont disposés de manière asymétrique par rapport au conducteur neutre. La caténaire asymétrique pour une ligne électrique serait déterminée par les normes et réglementations en vigueur dans la région concernée, ainsi que par les considérations

spécifiques du projet. La figure II.9 montre l'affaissement du conducteur et la longueur de la portée pour une forme générale de caténaire asymétrique.

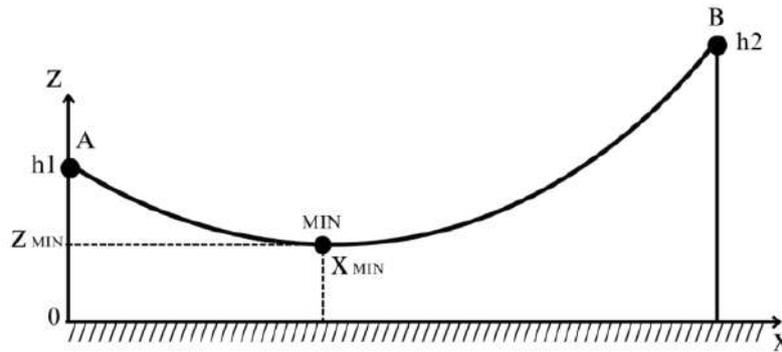


Figure II.10 Exemple de caténaire asymétrique.

L'équation de base du graphique dans l'intervalle  $[0, x]$ , illustrée dans la Figure 1, est la suivante :

$$y(x) = c \cdot \cos\left(\frac{x - x_{min}}{c}\right) - c + y_{min} \quad x \in [0, x] \quad (\text{II.69})$$

où le point  $A(0 ; h_1)$  est le point de support côté gauche, le point  $B(L ; h_2)$  est le point de support côté droit,  $\min(x_{min} ; y_{min})$  est le point le plus bas de la caténaire,  $L$  est la longueur de la portée est  $C$  une constante définissant la forme de la caténaire telle que  $C = (H/w)$  où  $H$  est la composante horizontale de la tension et  $w$  est le poids du conducteur par unité de longueur [22].

## X. Conclusion

Les lignes électriques à haute tension génèrent des champs électromagnétiques. Ces champs sont formés par le passage du courant électrique dans les lignes et peuvent avoir des répercussions sur l'environnement et la santé des individus.

Dans ce chapitre, nous avons exploré comment le champ électrique est créé au voisinage d'une ligne aérienne à haute tension. Nous avons examiné comment les champs électriques ont été calculés en utilisant la méthode des charges fictives pour déterminer les valeurs du champ électromagnétique en tout point près des lignes électriques à haute tension.

# Chapitre III

## Simulation des champs électriques au voisinage des lignes THT

## I. Introduction

Les sources des champs électriques ou voisinage des lignes électriques aériennes à haute tension sont les courants électriques dus aux charges qui existent dans leurs conducteurs, ainsi que ceux qui sont induits dans la terre et dans les objets à proximité.

Dans ce chapitre, nous avons développé un programme sur logiciel MATLAB qui permet de calculer le champ électrique au voisinage d'une ligne électrique à haute tension. Aussi, nous allons évaluer et examiner l'influence des différentes configurations relatives aux silhouettes des pylônes, ainsi que les différentes dispositions des conducteurs à savoir : horizontale, verticale et triangulaire pour les différents niveaux de tension 400 kV et 220 kV avec un et deux conducteurs par phase.

## II. Calcul du Champ électrique au voisinage d'une ligne électrique de 400KV

Le calcul du champ électrique pour une ligne de transport à 400kV dans deux configurations différentes peut être réalisé pour évaluer les niveaux d'exposition et comprendre les variations dues à la configuration de la ligne.

Les trois configurations peuvent différer par des paramètres tels que la hauteur des pylônes, l'espacement des câbles ou la présence d'éléments supplémentaires tels que des conducteurs de garde. En modifiant ces paramètres dans le modèle, il est possible d'évaluer l'impact sur le champ électrique généré.

Pour tenir compte de la flèche dans les calculs, diviser un conducteur d'une travée en  $n$  égaux segments ( $s_1, s_2, \dots, s_{i-1}, s_i, s_{i+1}, s_n$ ) comme illustré à la Fig. II.1.  $H$  est la hauteur maximale de la suspension des conducteurs,  $h_{min}$  est la hauteur minimale de la suspension des conducteurs au milieu de la portée,  $S$  est la flèche du conducteur. Les calculs sont basés sur l'hypothèse que le nombre de charges de simulation doit correspondre au nombre de segments définis.

### II.1.1 La configuration 1

On considère une ligne aérienne triphasée haute tension, chaque phase de la ligne (L1, L2, L3) contient un faisceau de deux conducteurs en circuit unique la configuration horizontal parallèle au plat sol, sont séparées par 0,3 m entre eux, le rayon du conducteur est de 10 mm.

Le câble de garde est constitué de fils ayant un seul faisceau de charges linéaires, le rayon de câble de garde 10 mm positionné horizontalement à une hauteur de 26 m au-dessus du sol, la longueur de portée de la ligne est de 100m. La géométrie de la ligne aérienne à haute tension étudiée présentées dans la figure III.1.

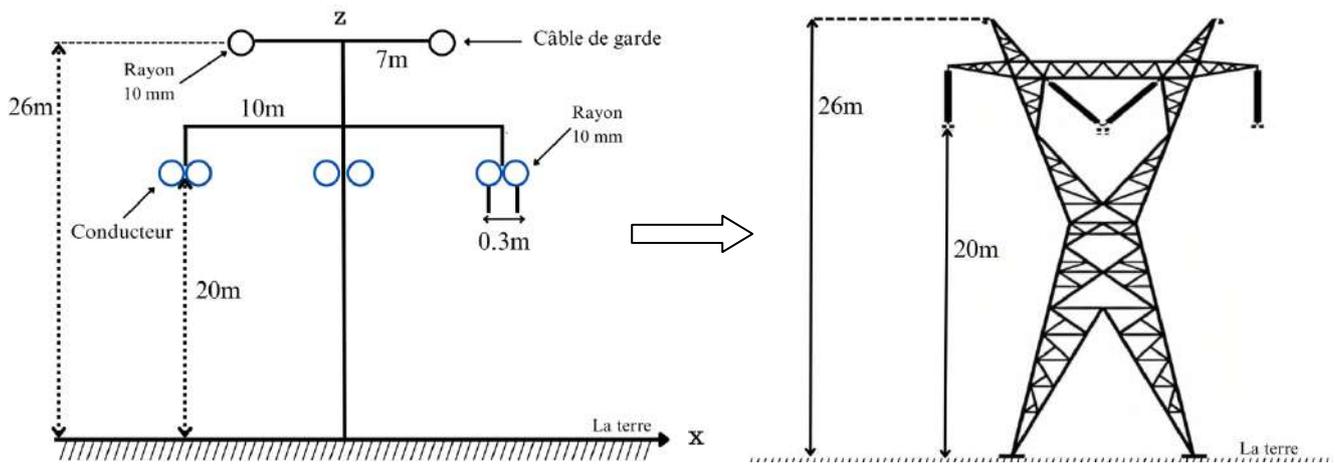
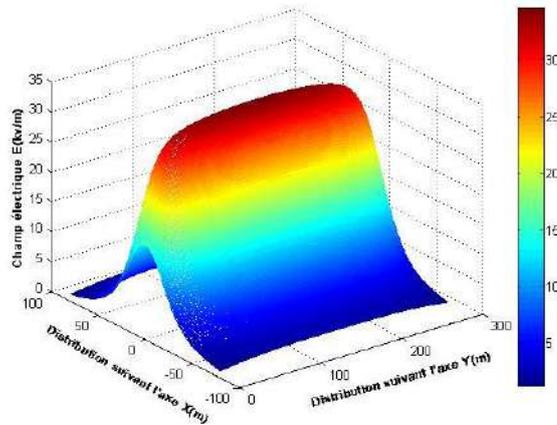
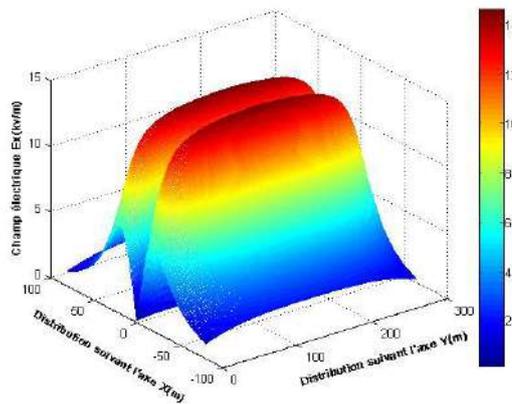


Figure III.1 Modèle de pylône électrique configuration en double câble.



a. Champ électrique  $E_t$



b. Composante  $E_x$  du champ électrique.

Figure III.2 Variation spatial de la composante  $E_x$  du champ électrique de configuration (1).

La figure III.2 illustre la variation spatiale en 3D du champ électrique total  $E_t$  et la composante  $E_x$  rayonnée le long du profil, à une hauteur de 1m au-dessus du sol, pour une ligne de longueur  $L = 280\text{ m}$  avec l'impact de la forme caténaire des conducteurs. Les courbes présentent une symétrie

par rapport au centre, en nappe horizontale au niveau de la flèche la valeur du champ électrique est maximale  $E_{max} = 35 \text{ kv/m}$ , puis se réduit progressivement.

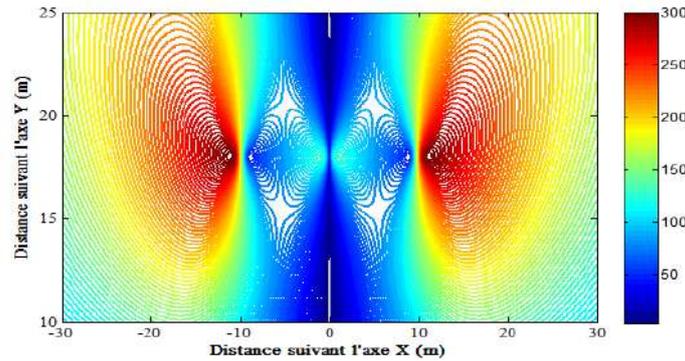


Figure III.3 Distribution spatiale de la composante  $E_x$  du champ électrique.

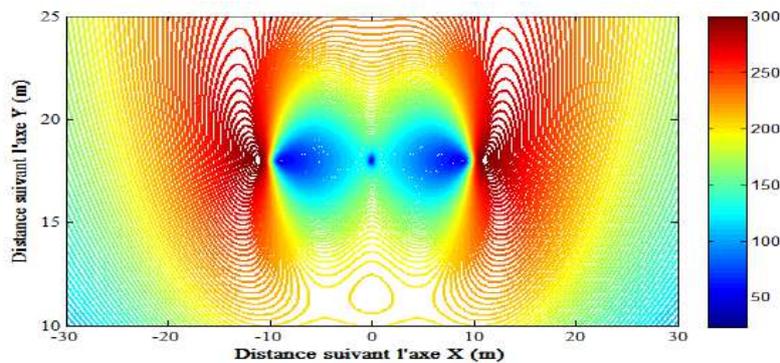


Figure III.4 Distribution spatiale du champ électrique  $E_t$ .

Les deux figures III.3 et III.4 montrent la composante  $E_x$  et total  $E_t$  de l'intensité du champ électrique en tout point dans l'espace autour des conducteurs au niveau de la flèche, les courbes présentent une symétrie par rapport à l'axe des Z, l'intensité du champ électrique augmente et atteint une valeur maximale près des conducteurs.

Nous avons utilisé la méthode des images pour le calcul du champ électrique au voisinage des lignes à haute tension prennent en considération la structure réelle des lignes électriques, on remarque qu'au voisinage de la mi-portée, le champ électrique devient très important.

Dans cette application les conducteurs de phase de la ligne de transport d'énergie qui représentent les sources, sont orientés le long l'axe des Y dans le système de coordonnées cartésien (x, y, z) comme illustré dans la figure III. Le calcul du champ électrique a été réalisé dans le plan horizontal X-Y et dans le plan vertical X-Z.

Les figures III.5 et III.6 montrent les formes de la distribution du champ électrique dans le plan x-z et le plan x-y pour les lignes aériennes 400kv. Dans le plan x-y, le champ électrique est calculé au voisinage de la ligne aérienne à une hauteur de 1 m au-dessus de la terre. Dans le plan x-z, l'intensité du champ électrique augmente et prend une valeur maximale près des conducteurs de phase.

L'intensité maximale du champ électrique est de 300 kV/m pour les lignes de transmission aériennes 400kv.

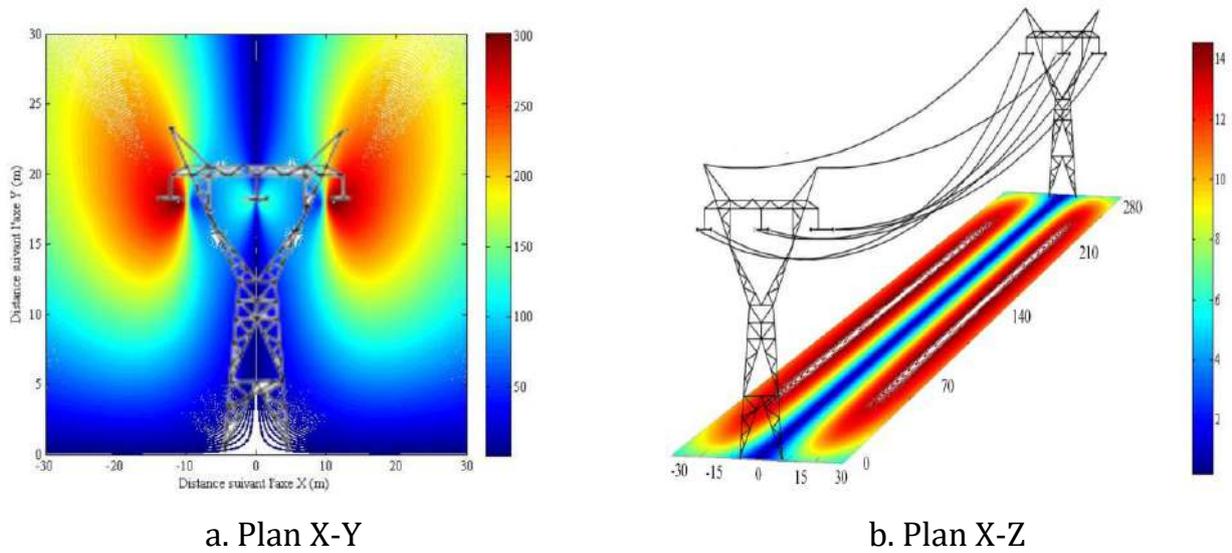


Figure III.5 Distribution de la composante  $E_x$  du champ électrique.

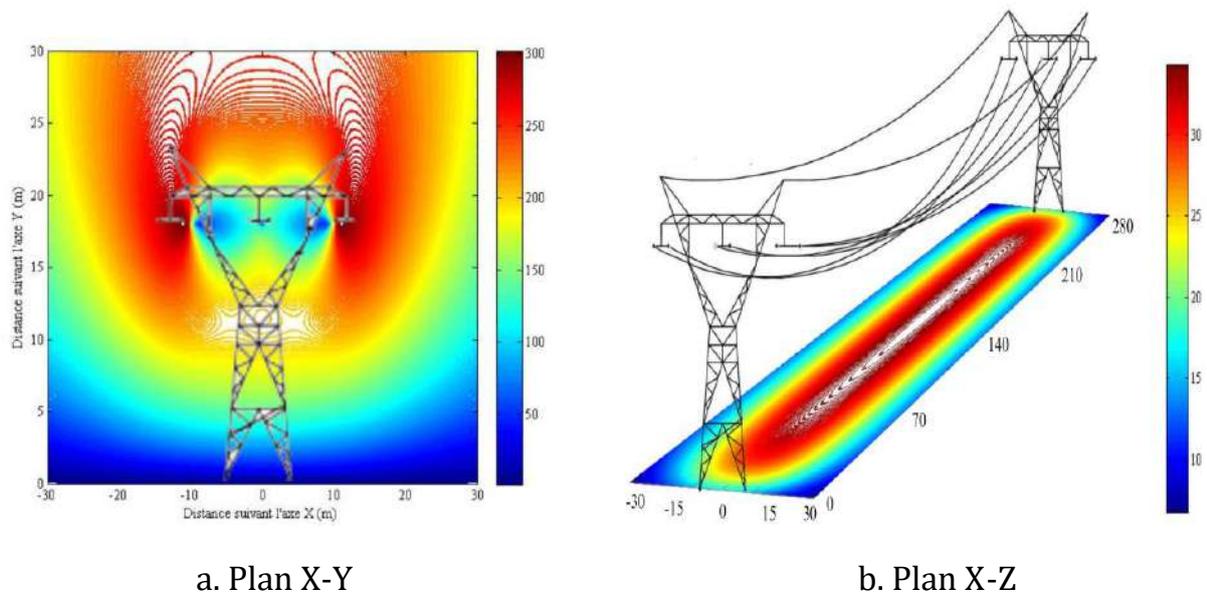
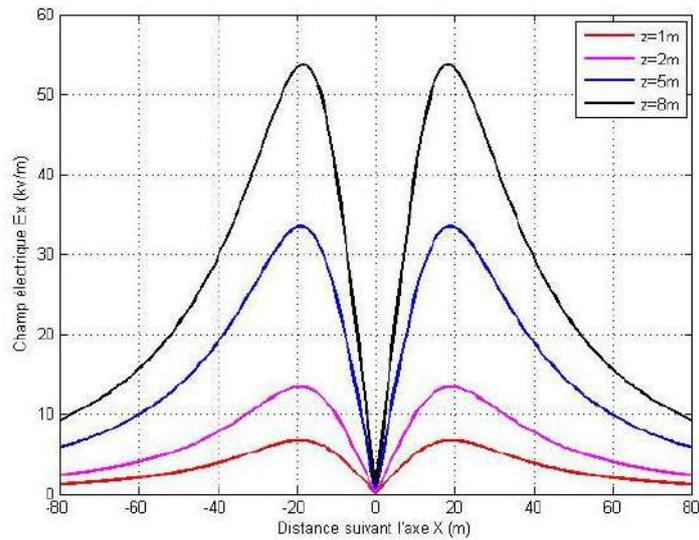
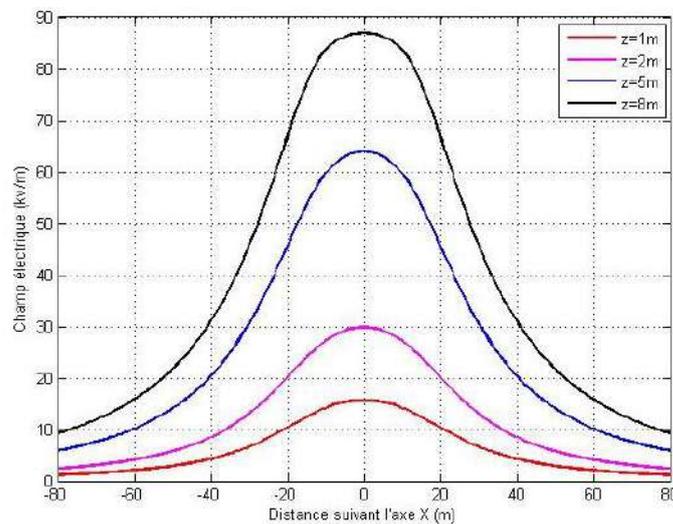


Figure III.6 Distribution du champ électrique total  $E_t$ .



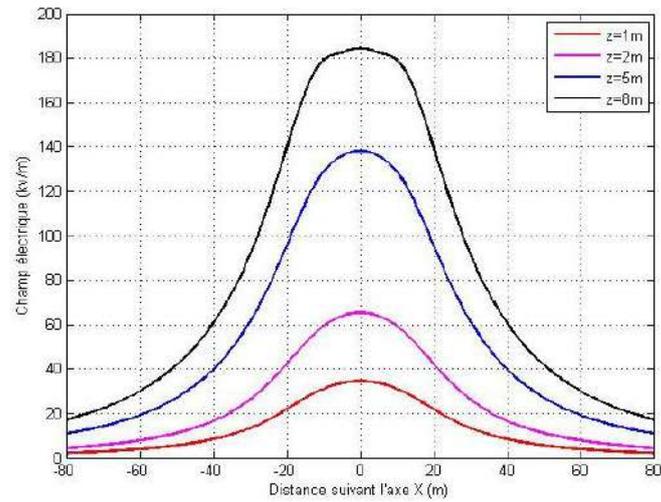
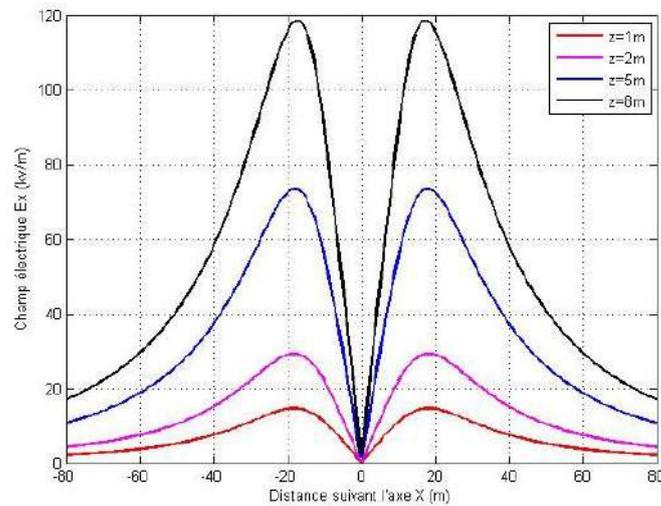
a. Composante Ex du champ électrique.



b. Champ électrique Et

Figure III.7 Profil du champ électrique latéral à mi-portée pour différentes hauteurs.

Les figures III.7.a et III.7.a montre la variation spatiale de la composante Ex et total Et du champ électrique au niveau de pied du pylône ( $y = 1 \text{ m}$ ), est répété pour divers hauteurs 1 m, 2 m, 5 m, 8 m au-dessus du sol, pour une ligne de transport d'énergie THT 400kV. Enremarque que les valeurs de l'intensité du champ électrique augmentent tandis que la hauteuraugmente et atteignent les valeurs maximales à proximité des conducteurs de phase. Lorsqu'en éloignez de l'axe x avec une distance  $x = \pm 80 \text{ m}$ , les valeurs du champ électrique sont complètement faibles et insignifiantes.

a. Champ électrique  $E_t$ b. Composante  $E_x$  du champ électrique.Figure III.8 Distribution du profil du champ électrique de la composante  $E_x$  dans le plan x-y.

Les figures III.8.a et III.8.b montre la variation spatiale de la composante  $E_x$  et total  $E_t$  du champ électrique au milieu de la portée ( $y = 140$  m), est répété pour divers hauteurs 1 m, 2m, 5 m, 8 m au-dessus du sol, pour une ligne de transport d'énergie THT 400kV. En remarque que les valeurs de l'intensité du champ électrique augmentent tandis que la hauteur augmente et atteignent les valeurs maximales à proximité des conducteurs de phase. Lorsqu'en éloignez de l'axe x avec une distance  $x = \pm 80$  m, les valeurs du champ électrique sont complètement faibles et insignifiantes.

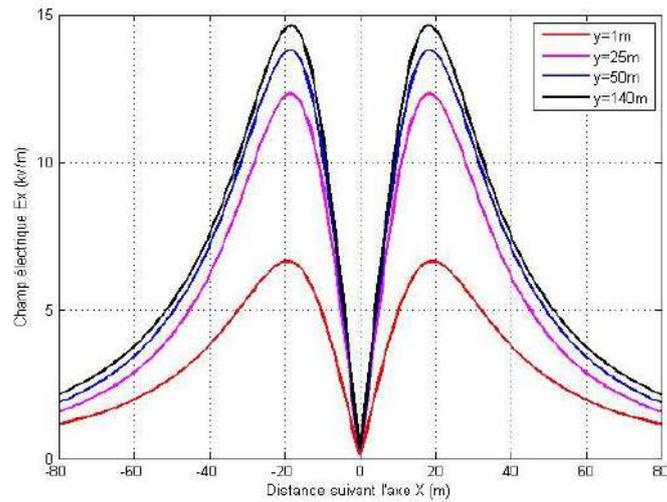
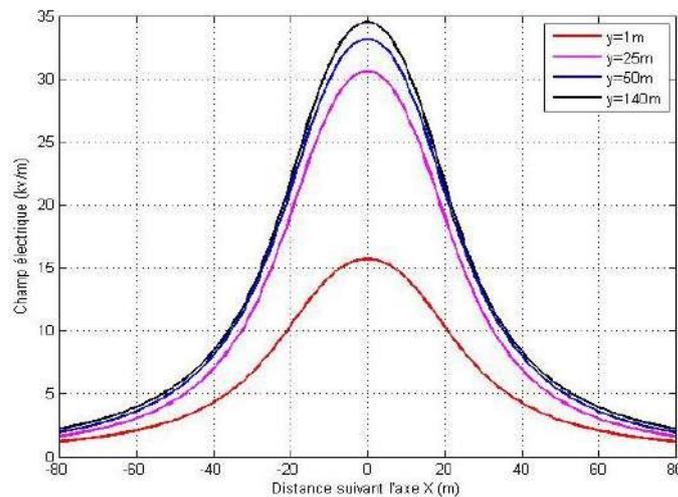
a. Composante  $E_x$  du champ électrique.b. Champ électrique  $E_t$ 

Figure III.9 Distribution du profil du champ électrique dans le plan x-y.

Les figures III.9.a et III.9.b montrent le profil de champ électrique latéral suivant l'axe des X au-dessus du sol. La valeur maximale du champ électrique, trouvée au milieu de la portée  $y=140$ , se justifie par le fait qu'au milieu de la portée, le poids des conducteurs de phase sont gros et donc plus proches du sol et donc plus proches du lieu de collecte des données. Pendant ce temps, les valeurs diminuent à mesure que la distance des conducteurs augmente.

### III.1.2. La configuration (2)

On considère une ligne aérienne triphasée haute tension double circuit, chaque phase de la ligne (L1, L2, L3) contient un seul faisceau, type de pylône double drapeau. Le câble de garde est constitué de fils ayant un seul faisceau de charges linéaires, le rayon de câble de garde 10 mm positionné horizontalement à une hauteur de 50 m au-dessus du sol, la longueur de portée de la ligne électrique est de 280m. La géométrie de la ligne aérienne à haute tension étudiée présentées dans la figure III.10.

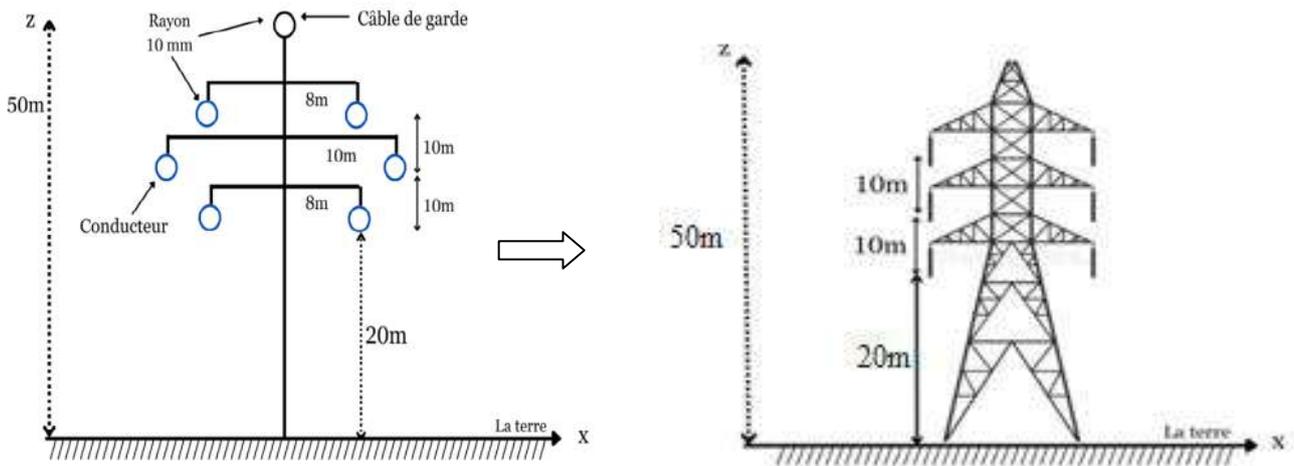
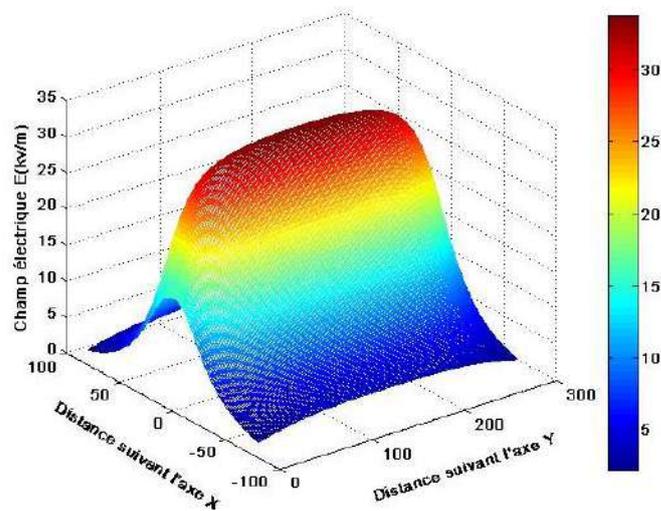
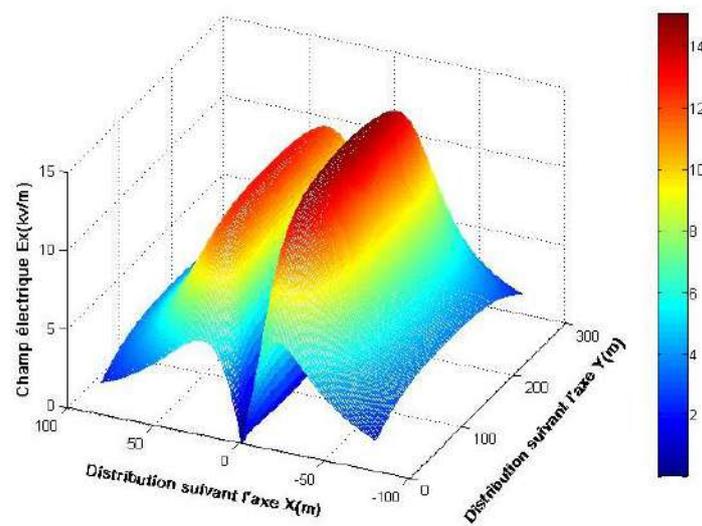


Figure III.10 Modèle de pylône électrique configuration en double circuit.



a. Champ électrique Et



b. Champ électrique Ex

Figure III.11 Variation spatiale de la composante Ex et total Et du champ électrique.

### III.1.3. La configuration (3)

On considère une ligne aérienne triphasée haute tension double circuit configuration triangle, chaque phase de la ligne (L1, L2, L3) contient un seul faisceau par conducteur, le rayon du conducteur est de 10 mm. Le câble de garde est constitué de deux fils ayant un seul faisceau, le rayon de câble de garde 10 mm positionné horizontalement à une hauteur de 50 m au-dessus du sol, la longueur de la portée de la ligne est de 280 m. La géométrie de la ligne aérienne à haute tension étudiée présentées dans la figure III.12.

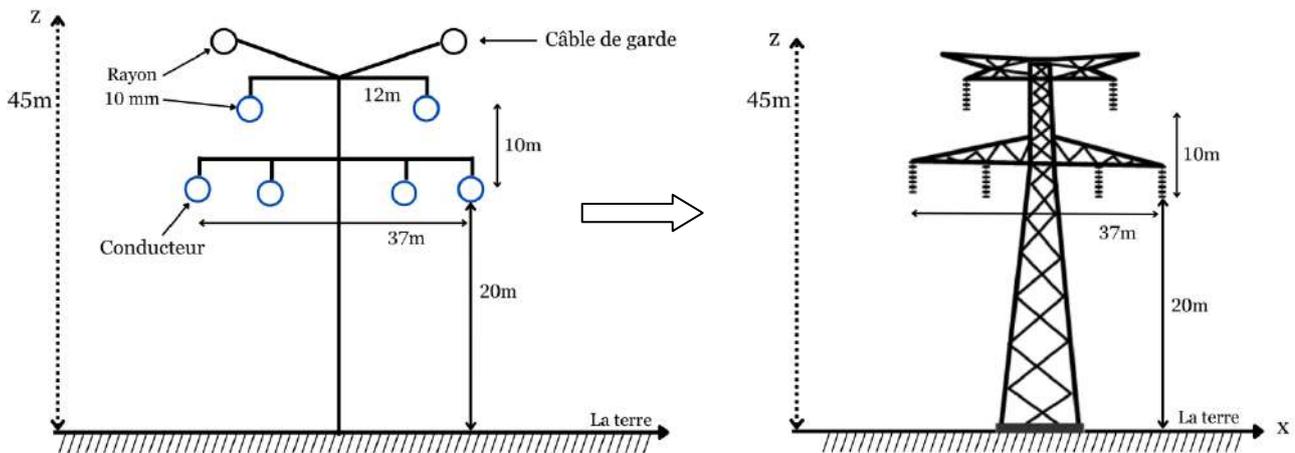
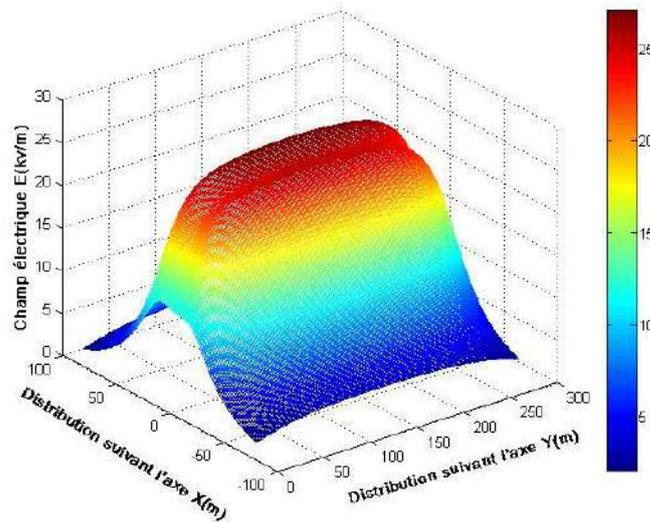
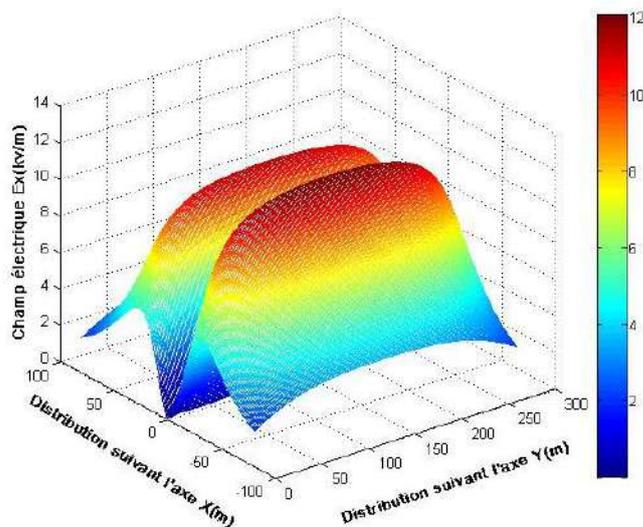


Figure III.12 Modèle de pylône électrique configuration double terre.



a. Champ électrique  $E_t$



b. Champ électrique  $E_x$

Figure III.13 Variation spatiale de la composante  $E_x$  et total  $E_t$  du champ électrique.

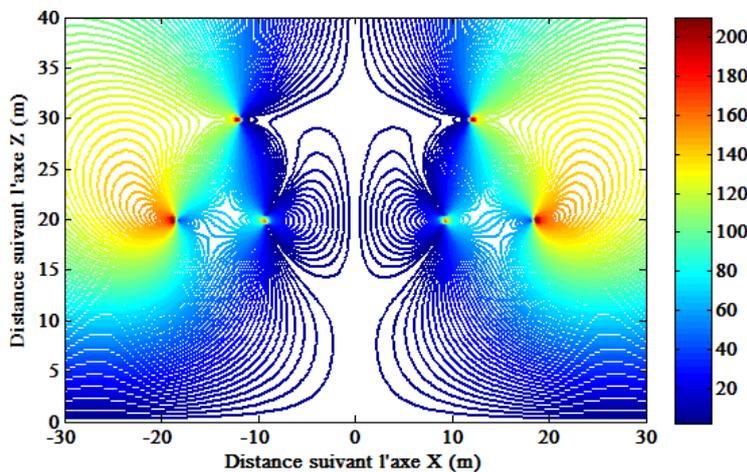


Figure III.14 Distribution spatiale de la composante  $E_x$  du champ électrique.

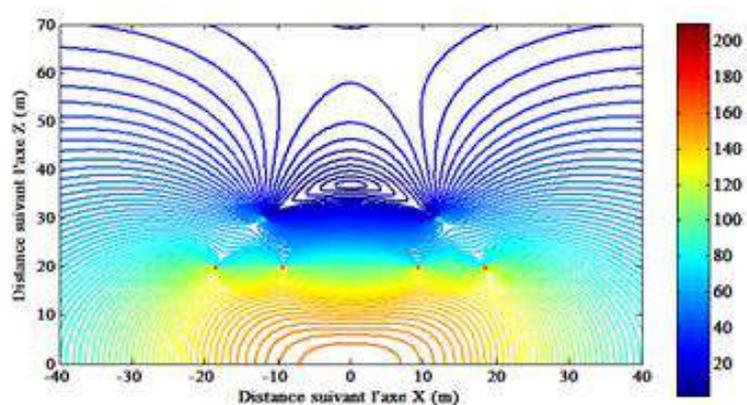


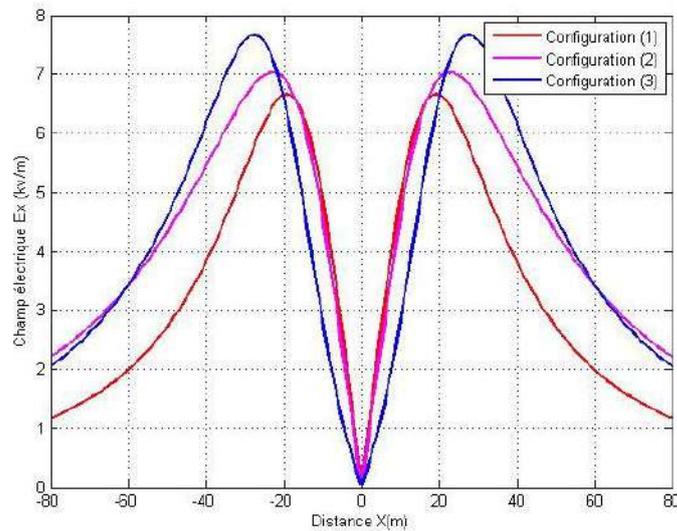
Figure III.15 Distribution spatiale du champ électrique  $E_t$ .

Les deux figures III.14 et III.15 montre la composante  $E_x$  et total  $E_t$  de l'intensité du champ électrique en tout point dans l'espace autour des conducteurs au niveau de la flèche, les courbes présentent une symétrie par rapport au axe des Z, l'intensité du champ électrique augmente et atteint

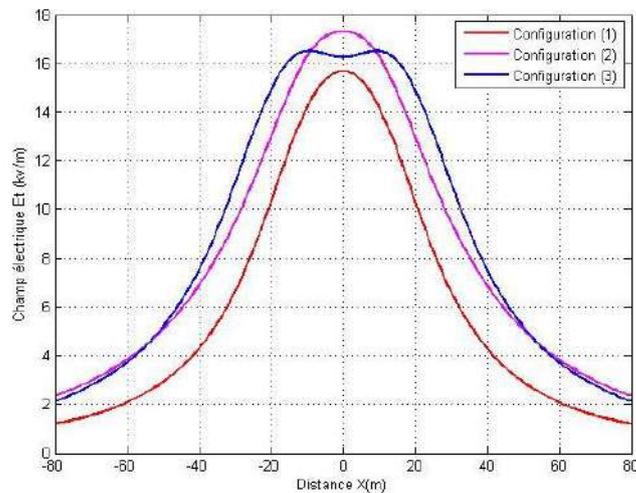
une valeur maximale près des conducteurs.

## II.2 Effets de la géométrie de la ligne sur le champ électrique

L'effet de la configuration géométrique de la ligne sur la distribution des quantités de charge électrique est illustré par une application à un circuit de ligne simple 400kV avec un faisceau de 3 conducteurs par phase de rayon 10 mm, dont on va calculer l'intensité du champ électrique pour trois configurations différentes.

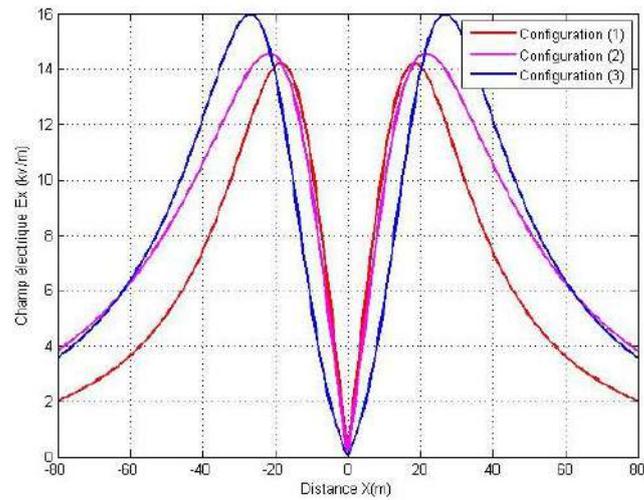


a. Composante  $E_x$  du champ électrique.

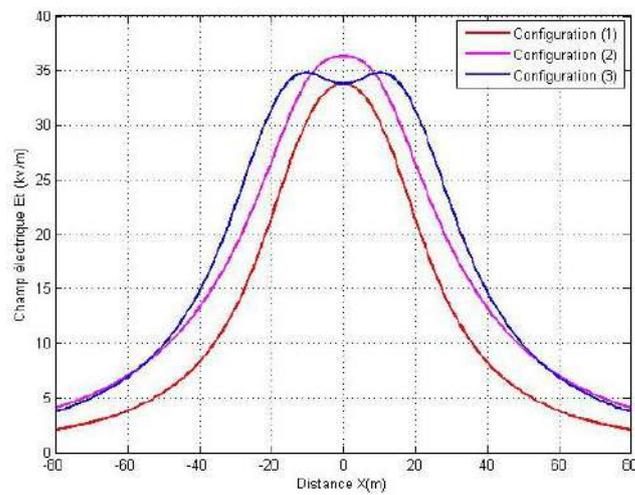


b. Champ électrique total  $E_t$ .

Figure III.16 Profil du champ électrique suivant l'axe des X au pied du pylône.



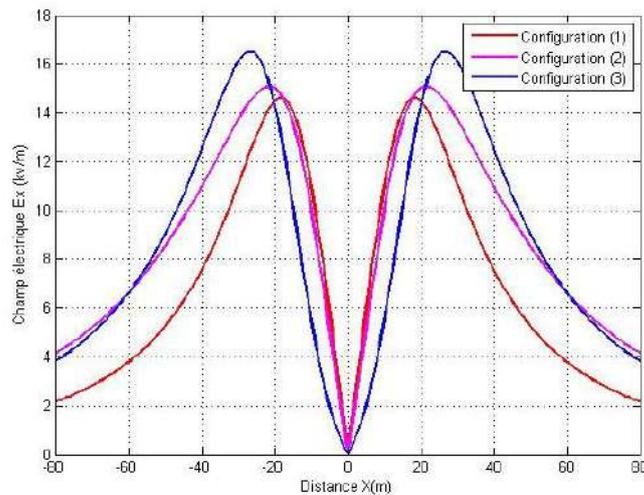
a. Composante  $E_x$  du champ électrique.



b. Champ électrique total  $E_t$ .

Figure III.17 Profil du champ électrique suivant l'axe des X au pied du pylône.

$Y=70$



a. Composante  $E_x$  du champ électrique.

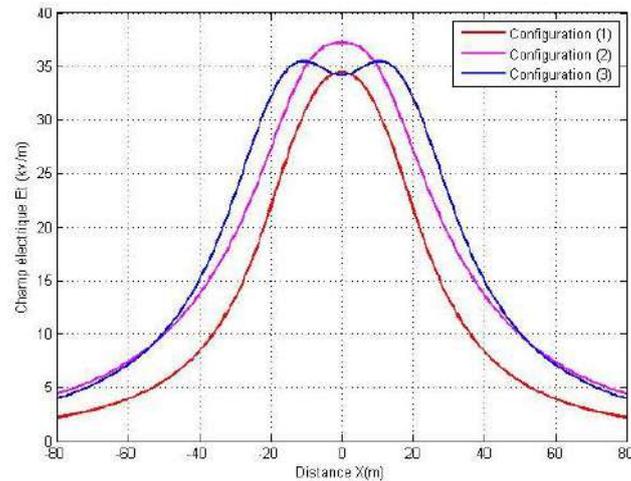
b. Champ électrique total  $E_t$ .

Figure III.18 Profil du champ électrique suivant l'axe des X à la mi-portée ( $Y=140$  m)

### II.3 Discussion des résultats

Les résultats du calcul du champ électrique sous une ligne de transport à 400 kV On voit que le champ électrique diminue lorsque l'on s'éloigne des pylônes sur la surface du sol, et les résultats montrent aussi que la configuration en double câble (configuration 1) est plus avantageuse que les configurations (2) et (3). Cela est dû au fait que la première configuration génère un champ électrique moins élevé que les autres configurations.

### III. Champ électrique au voisinage d'une ligne électrique a haute tension de 220KV

Dans cette partie on propose quatre configurations différentes permet d'évaluer les niveaux d'exposition et d'étudier les variations du champ électrique en fonction de la configuration de la ligne.

En effectuant des calculs dans quatre différentes configurations des lignes de transport d'énergie THT, en nappe horizontal, en nappe vertical, en delta et delta inversé. Pour une comparaison rigoureuse du champ électrique, les lignes ont le même degré de compactage, la même tension, le même courant par conducteur et les mêmes hauteurs, il devient possible de comparer les résultats et de déterminer quelle configuration entraîne des niveaux de champ électrique plus faibles ou plus élevés.

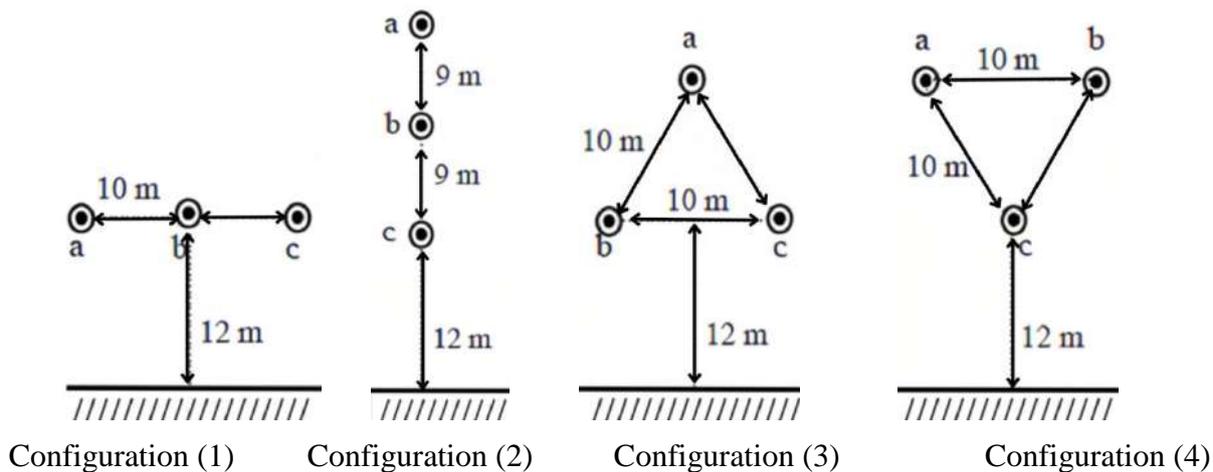
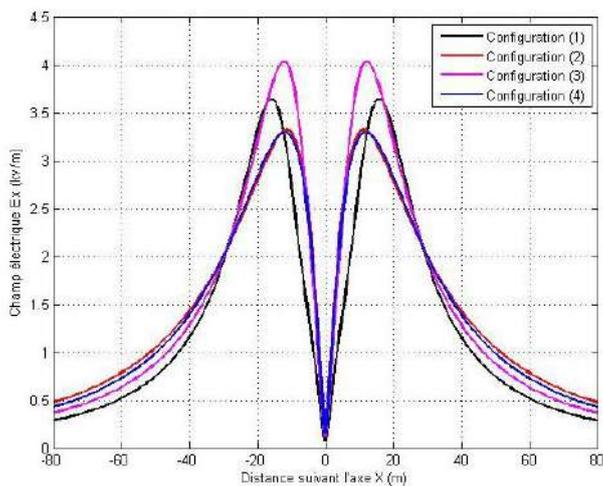
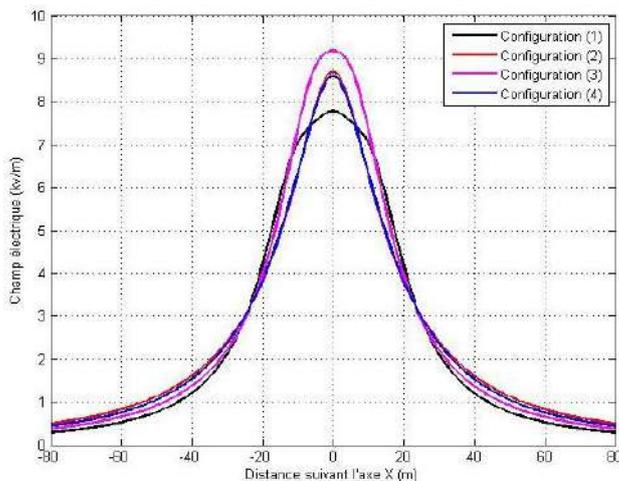


Figure III.19 Configurations des lignes de transport d'énergie :

(1) Horizontale, (2) Verticale, (3) Triangulaire, (4) Triangulaire inversée.

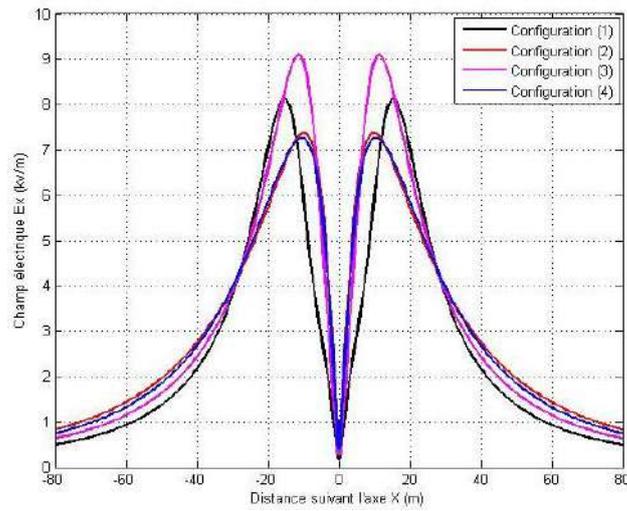


b. Le champ électrique de composante Ex.

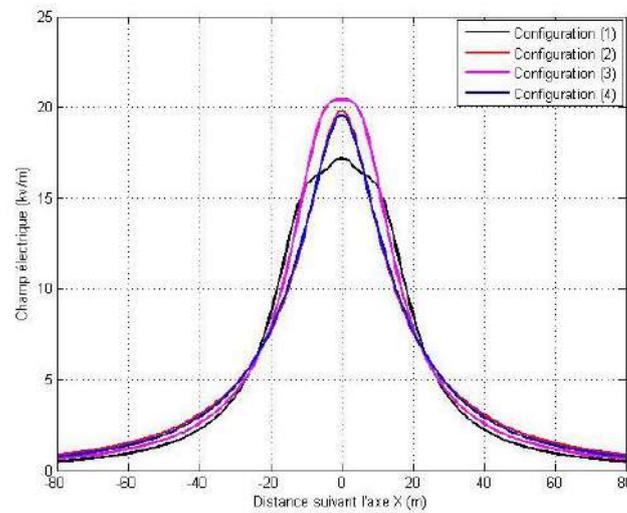


b.Champ électrique Et.

Figure III.20 Profil du champ électrique suivant l'axe des X au pied du pylône.

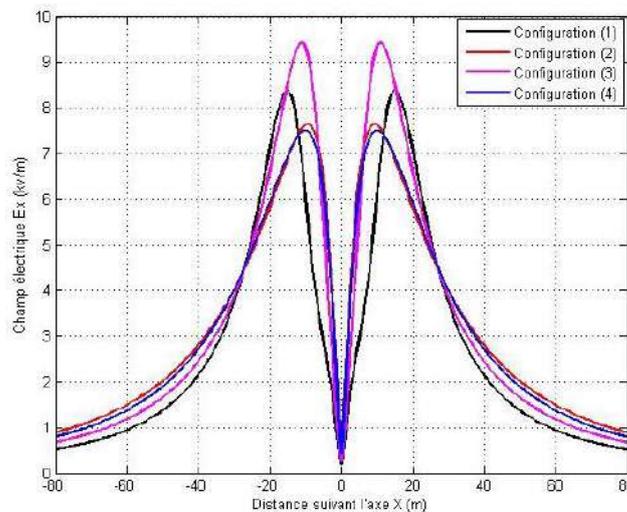


b. Le champ électrique de composante  $E_x$ .

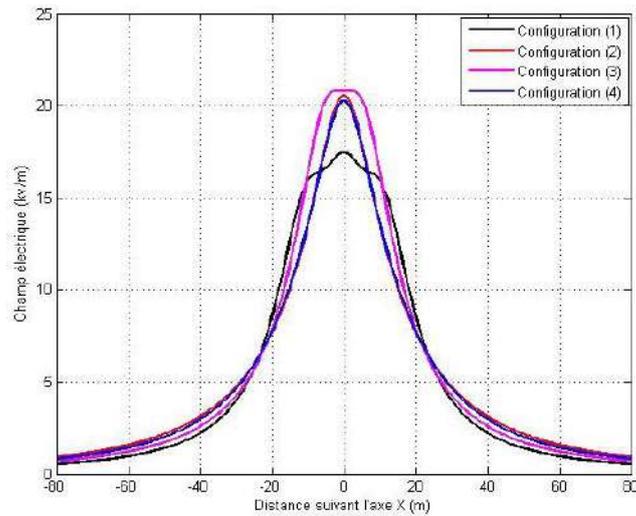


b.Champ électrique  $E_t$ .

Figure III.21 Profil du champ électrique suivant l'axe des X au cordonnée Y=70m.



b. Le champ électrique de composante  $E_x$ .



### b. Champ électrique Et.

Figure III.22 Profil du champ électrique suivant l'axe des X à la mi-portée.

### III.1 Discussion des résultats

Les résultats du calcul du champ électrique sous une ligne à haute tension de 220 kV, On voit que le champ électrique diminue lorsque l'on s'éloigne des pylônes sur la surface du sol, et les résultats montrent que la configuration horizontale (configuration 1) est plus avantageuse que les autres configurations. En effet, la première configuration génère un champ électrique moins élevé que les trois autres configurations. En optant pour la configuration horizontale, on peut réduire l'exposition aux niveaux de champ électrique et garantir une meilleure sécurité pour les personnes et l'environnement.

### IV. Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons calculé le champ électrique au voisinage des lignes électriques aériennes à haute tensions THT en modifiant à chaque fois la configuration des lignes. D'après les résultats, il est clair que l'intensité du champ électrique est moins intense sous les conducteurs de phase et augmente jusqu'au pic près du conducteur de phase; puis diminue avec l'augmentation de la distance latérale. Il a également été constaté que le champ électrique dépend de plusieurs facteurs, tels que l'espacement entre deux conducteurs adjacents et la hauteur des conducteurs au-dessus du sol, le type des lignes, simple ou double circuit et type d'exposition des lignes. Pour les lignes à double terre, il est possible de régler les phases dans une manière appropriée afin d'obtenir une réduction significative du champ électrique. On note que la valeur du champ électrique à mi-portée est beaucoup plus élevée qu'au pied du pylône.

## CONCLUSION GENERALE

Les lignes HT/THT, indispensables à toute forme d'activité et incontournables pour le développement et la satisfaction de la demande toujours croissante en énergie de notre pays, peuvent être aujourd'hui source de questionnement dans l'opinion publique.

La connaissance de la valeur de l'intensité du champ électrique  $E$  généré par les lignes THT de transport de l'énergie électrique est devenue primordiale pour les gestionnaires de ces lignes, afin de limiter leurs inconvénients sur l'environnement.

Dans ce travail on a présenté une méthode analytique connue sous le nom méthode des charges fictives et la méthode des images pour l'évaluation de l'intensité du champ électrique au voisinage des lignes de transport d'énergie THT.

L'objectif de notre présent travail est le calcul de l'intensité du champ électrique au voisinage d'une ligne de transport d'électricité à haut tension.

Pour répondre à cet objectif, nous avons, dans un premier temps, étudié les différentes architectures des réseaux électriques, les différentes configurations des lignes électriques aériennes et leurs éléments constructifs, dans un deuxième temps, présenté un modèle mathématique de calcul du champ électrique.

Enfin, dans le chapitre III, nous avons appliqué les formulations analytiques du calcul du champ électrique en 3D pour les différentes configurations envisagées. La comparaison des résultats issus des différentes configurations prédit que:

- Le champ électrique généré par les lignes THT est proportionnel à la quantité de charge transportée par la ligne, il diminue au fur et à mesure qu'on s'éloigne de l'axe du point source.
- La modification des paramètres géométriques de la ligne est une technique très attractive pour la diminution des intensités du champ électrique et la réduction de leurs effets sur la santé humaine et l'environnement.

En perspective de ce travail, il serait de regarder de plus près la réduction du champ électromagnétique émis par le réseau de transport d'énergie aussi bien en basse fréquence qu'en régime transitoire (impact direct d'une onde de foudre sur les lignes THT).

---

## Bibliographie

- [1] M. Abdel-Salam, M. Th El-Mohandes and H. El-Kishky, "Electric field around parallel dc and multi-phase ac transmission lines", *IEEE Trans. Electr. Insul.*, Vol. 25, pp. 1145-1152, 1990.
- [2] A. S. Abdallah, "Electric field from transmission lines nearby populated areas in Egypt theory versus experiment", *11th Int'l. Sympos. High Voltage Eng.*, (Conf. Pub. No. 467), Vol. 2, pp. 119–122, 1999.
- [3] J. C. Salari, A. Mpalantinos, and J. I. Silva, "Comparative Analysis of 2-D and 3-D Methods for Computing Electric and Magnetic Fields Generated by Overhead Transmission Lines", *IEEE Trans. Power Delivery*, Vol. 24, , pp. 338-344, 2009.
- [4] Miguel O.B.C. Melo Luiz C.A.Fonseca, E. Fontana and S. R Naidu, "Electric and Magnetic Fields of Compact Transmission Lines", *IEEE Trans. Power Delivery*, Vol. 14, pp. 200-204, 1999.
- [5] H. M. Ismail and A.R. Abu-Gammaz, "Electric field and right of way of Kuwait high voltage transmission system", *Electric Power Syst.R*
- [6] A. Cigre, *Electrical and magnetic fields generated by transmission networks, example of calculation of electromagnetic disturbances by the CIGRE method*, International Conference of Large High voltage Electrical Networks, Paris Edition Dunod, 21-43 (1983)
- [7] . Kulkarni, W.Z. Gandhare, Proximity effects of high voltage transmission lines on humans, *ACEEE Int. J. on Electrical and Power Engineering* 3, 1, 28- 32 (2012)
- [8] W. Tourab, A. Babouri, Measurement and modeling of personal exposure to the electric and magnetic fields in the vicinity of high voltage power lines, *Safety and Health at Work* 7, 10, 102–110, (2016)
- [9] R. Amiri, H. Hadi, M. Marich, The influence of sag in the electric field calculation around high voltage overhead transmission lines, In:2006 IEEE Conference on Electrical Insulation and Dielectric Phenomena. IEEE, 206-209, (2006)
- [10] A. Mujezinović, A. Čaršimamović & I. Turković, Electric field calculation around the overhead transmission lines using finite element method, 11th Conference Bosnia-Herzegovina committee of CIGRE, Neum, September 2013.
- [11] B. Cestnik, K. Grabner & N. Ljubijankić, Electromagnetic field calculation and measurement of electric power facilities according to Slovenian legislation, *International Colloquium Power Frequency Electromagnetic Fields ELF EMF*, Sarajevo 2009.

- [12] BRAHMIA Tareq et KOUADRIA Faris « Modélisation des paramètres des lignes électriques » 2020
- [13] Bellamouchi Abdelhai, Bekkouche Moussa, Bekkouche ELhadi « Conception et simulation de lignes électriques à haute tension » 2021
- [14] Bachiri farhat, ziouche Kamel « étude de la construction d'une ligne arienne Ht/THT » 2009
- [15] BELKHIRI YAMINA « Etudes des Phénomènes d'Induction Electromagnétiques Liés au Voisinage des Ouvrages THT de Transport de l'Electricité » 2018
- [16] Traité de l'ingénieur «Doc D 4 422 » (André CHANAL et Jean-Pierre LEVEQUE, 2000
- [17] Mekhilef Fadia « Elaboration du Dossier Technique d'une Ligne Electrique HT » 2021
- [18] Paul Gill. Electrical power equipment maintenance and testing. CRC press, 2008.
- [19] Oussama MESSAD, Nouh AGGUINI « Calcul des paramètres et caractéristiques des lignes électriques triphasées »
- [20] LIMANE Isamil Choayb, DJAHMI Aymen « Calcul des champs électriques et magnétiques proches des lignes très haute tension. » 2019/2020
- [21] ZEROUAL Hanane, MECHERFI Kheira Nour El Houda « Analyse des moyens de réduction du champ électrique au voisinage des lignes électriques haute tension. » 2020/2021
- [22] Romaric ADEGBOLA, François Xavier FIFATIN, Richard Gilles AGBOKPANZO, Amevi ACAKPOVI, Maurel AZA-GNANDJI “Modelling and Simulation of Electric Fields in the Vicinity of High Voltage Transmission Line”