

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE  
Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique  
Université 8 Mai 1945 – Guelma  
Faculté des Sciences et de la Technologie  
Département de Génie Électrotechnique et Automatique

Réf: ...../2020



## MEMOIRE

Présenté pour l'obtention du **diplôme** de **MASTER Académique**

**Domaine** : Sciences et Technologies

**Filière** : Électrotechnique

**Spécialité** : Réseaux Électriques

**Par** : - LIMANE Isamil Choayb  
- DJAHMI Aymen

**Thème**

**Calcul des champs électriques et magnétiques proches des lignes très haute tension.**

Soutenu publiquement, le : **03/10/2020** devant le jury composé de :

M. LMZADMI Ahcene	Professeur	Univ. Guelma	Président
M. BOUDEFEL Amar	MCA	Univ. Guelma	Encadreur
M. BELOUCIF Faïssel	MCB	Univ. Guelma	Examineur

**Année Universitaire : 2019/2020**

# Remerciements:

Je tiens à remercier avant tout

**ALLAH**

Qui m'a donné la force et le courage pour terminer mes études et élaborer ce modeste travail.

Un grand merci à mes parents qui croient toujours et inconditionnellement en moi et qui me sont soutenues non seulement spirituellement, mais aussi logistiquement lors de la rédaction de ce mémoire.

Je remercie très sincèrement mon encadreur :

**DR. BOUDEFEL AMAR**

A tous ceux qui nous ont donnés un coup de main par la communication des connaissances.

Soit par leurs encouragements et leurs conseils qui nous étaient d'une grande utilité pour l'accomplissement de nos tâches dans les meilleures conditions.

# Dédicace

Je dédie ce modeste travail :

## A ma très chère mère

Affable, honorable, aimable : tu représentes pour moi le symbole de la bonté par excellence, la source de tendresse et l'exemple du dévouement qui n'a pas cessé de m'encourager et de prier pour moi.

Ta prière et ta bénédiction m'ont été d'un grand secours pour mener à bien mes études.

Je te dédie ce travail en témoignage de mon profond amour. Puisse Dieu, le tout puissant, te préserver et t'accorder santé, longue vie et bonheur.

## A mon très cher père

Aucune dédicace ne saurait exprimer l'amour, l'estime, le dévouement et le respect que j'ai toujours eu pour vous.

Rien au monde ne vaut les efforts fournis jour et nuit pour mon éducation et mon bien être.

Ce travail est le fruit de tes sacrifices que tu as consentis pour mon éducation et ma formation.

A mon frère ET mes sœurs

A toutes ma famille : DJAHMI

A tous mes amis

«Mirou» «Lawina» «Loli» «Bilal» «Kadirou» «Seïfou» «Nemra» «Wassim»

A tous mes collègues et mon encadreur «Boudefel . A»

Et surtout pour les enfants « Roeya, Meriem, Amir Djad ».

Djahmi Aymen

# Dédicace

Je dédie ce modeste travail :

A ma très chère mère

Affable, honorable, aimable : tu représentes pour moi le symbole de la bonté par excellence, la source de tendresse et l'exemple du dévouement qui n'a pas cessé de m'encourager et de prier pour moi.

Ta prière et ta bénédiction m'ont été d'un grand secours pour mener à bien mes études.

Je te dédie ce travail en témoignage de mon profond amour. Puisse Dieu, le tout puissant, te préserver et t'accorder santé, longue vie et bonheur.

A mon très cher père

Aucune dédicace ne saurait exprimer l'amour, l'estime, le dévouement et le respect que j'ai toujours eu pour vous.

Rien au monde ne vaut les efforts fournis jour et nuit pour mon éducation et mon bien être.

Ce travail est le fruit de tes sacrifices que tu as consentis pour mon éducation et ma formation.

A mon frère ET mes sœurs

A toutes ma famille : LIMANE

A tous mes amis

«Mirou» «Lawina» «Loli» «Bilal» «Kadirou» «Seïfou» «Nemra»  
«Givenchy» «Batata» «Zinou» «Chemsou» «Haïthem»

A tous mes collègues et mon encadreur «Boudefel . A»

Et sur tout à ma petite princesse «Aryam».

Limane I. Chouaib

## ملخص

إن الحاجة إلى زيادة مستوى الجهد الكهربائي للشبكات الكهربائية من أجل تلبية احتياجات المستهلكين التي تستمر في الزيادة من سنة إلى أخرى قد صاحبها مشاكل ضارة بالبيئة بشكل عام وعلى الإنسان على وجه الخصوص. ترجع هذه المشكلات بشكل أساسي إلى المجال الكهربائي E والمجال المغناطيسي B المتشكل بالقرب من خطوط النقل ذات الضغط العالي HT وTHT.

ومع ذلك، فإن معرفة قيمة هذين المجالين أصبح أمرًا ضروريًا لمسؤولي الشبكات الكهربائية، من أجل الحد من تأثيراتهم على البيئة.

نقدم في هذا العمل طريقة بسيطة لكيفية حساب هذه الحقول في خطوط التوتر العالي THT، بالإضافة إلى الخصائص التي تميزها، حيث ترتبط شدة المجال الكهربائي E ارتباطًا مباشرًا بجهد النظام، بينما يرتبط المجال المغناطيسي B ارتباطًا مباشرًا بتيار الحمل، كذلك خصائص أخرى كارتفاع الخط وتباعد الأتوار ووضعيتهم كلها تؤثر على هذه القيم. وأخيرًا نعرض أهم سلبات هذه المجالات على البيئة المحيطة من هذه الخطوط.

**الكلمات المفتاحية:** خطوط النقل ذات الضغط العالي، المجال الكهربائي E، المجال المغناطيسي B، تأثيرات المجالين الكهربائي والمغناطيسي على البيئة.

## Résumé

La nécessité d'augmenter le niveau de tension des réseaux électriques afin de satisfaire les besoins des consommateurs qui ne cessent d'augmenter d'une année à l'autre a été accompagné par des problèmes néfastes sur l'environnement en général et les êtres humains en particulier. Ces problèmes sont dus essentiellement aux champs électriques E et magnétiques B créés aux voisinages des lignes HT et THT.

Cependant, la connaissance de la valeur de ces deux champs est devenue primordiale pour les constructeurs des réseaux électriques, afin de limiter leurs inconvénients sur l'environnement.

Dans ce travail nous présentons une méthode simple pour la détermination de ces champs pour les lignes THT, ainsi que les paramètres qui les caractérisent ; l'intensité du champ électrique E est directement liée à la tension du système, alors que, l'induction magnétique B est directement liée au courant de la charge, d'autres paramètres tels que la hauteur de la ligne et l'espacement des phases influent aussi sur ces valeurs. En termine notre travail par la présentation des inconvénients de ces champs sur l'environnement proche de ces lignes.

**Mots clefs :** ligne très haute tension, champ électrique, champ magnétique, inconvénients des champs électrique et magnétique sur l'environnement.

## **Abstract**

Summary The need to increase the voltage level of electrical networks in order to meet the needs of consumers which continue to increase from year to year has been accompanied by harmful problems on the environment in general and human beings. humans in particular. These problems are mainly due to the electric  $E$  and magnetic fields  $B$  created in the vicinity of the HV and VHV lines.

However, knowing the value of these two fields has become essential for builders of electrical networks, in order to limit their disadvantages on the environment.

In this work we present a simple method for the determination of these fields for VHV lines, as well as the parameters which characterize them; the intensity of the electric field  $E$  is directly related to the voltage of the system, while, the magnetic induction  $B$  is directly related to the load current, other parameters such as the height of the line and the phase spacing also influence these values. We finish our work by presenting the drawbacks of these fields on the environment near these lines.

**Keywords:** very high voltage line, electric field, magnetic field, disadvantages of electric and magnetic fields on the environment.

# Sommaire

Introduction générale	01
<b>CHAPITRE 1 – Introduction aux lignes haute et très haute tension</b>	
I.1. Introduction	03
I.2. Valeurs standard des tensions nominales	03
I.3. Valeurs moyennes des paramètres de la ligne	04
I.4. Capacité de transport et pertes de puissances	05
I.5. Les lignes de transport haute et très haute tension	07
I.5.1. Définition des lignes électriques	07
I.5.2. Types de lignes	07
I.5.3. Les lignes en faisceaux	08
I.5.4. Les pylônes utilisés en HT et THT	09
I.6. Conclusion	10
<b>CHAPITRE II – Champs électrostatiques des lignes THT</b>	
II.1. Introduction	11
II.2. Champ électrique d'un axe chargé	11
II.3. Champ électrique d'une ligne au voisinage du sol - méthode des images	13
II.4. Champ électrique de deux axes parallèles dans l'air	14
II.4.1. Coefficients de potentiel de Maxwell	15
II.5. Calcul de la charge de plusieurs conducteurs	15
II.6. Calcul de l'intensité du champ électrique d'une ligne triphasée	17
II.7. Conclusion	20
<b>CHAPITRE III – Champs magnétiques des lignes THT</b>	
III.1. Introduction	21
III.2. Induction magnétique créée par un conducteur seul	21
III.3. Flux embrassé par deux conducteurs dans un système à n conducteurs	22
III.4. Détermination de l'inductance des lignes	23
III.4.1. Pour un seul conducteur	23
III.4.2. Pour plusieurs conducteurs	23
III.5. Champ magnétique d'une ligne triphasée pour la configuration horizontale	25
III.6. Détermination des modules des champs $H_{ht}$ , $H_{vt}$ , $B_{ht}$ et $B_{vt}$	28
III.7. Conclusion	30
<b>CHAPITRE IV – Application sur des lignes THT</b>	
IV.1. Calcul du champ électrique des lignes THT	31
IV.1.1 Données des lignes à calculer	31
IV.1.2 Étapes de calcul	32
IV.1.3 Résultats de calcul	33
IV.1.4 Interprétations des résultats	35
IV.2. Calcul du champ magnétique des lignes THT	36
IV.2.1 Données des lignes à calculer	36
IV.2.2 Étapes de calcul	36
IV.2.3 Résultats de calcul	37
IV.2.4 Interprétations des résultats	39
IV.3. Influence du champ électrique élevé sur l'environnement	39
IV.3.1 Sur l'être humain	39



IV.3.2. Sur les animaux	39
IV.3.3. Sur les plantes	40
IV.3.4. Sur les voitures	40
IV.4. Influence du champ magnétique élevé sur l'environnement	40
IV.5. Conclusion	42
Conclusion générale	43
Bibliographie	44

## Liste des figures :

N°	Titre	Page
----	-------	------

### Chapitre I : Introduction aux lignes haute et très haute tension

<b>Figure I.1</b>	Modèle de ligne HT	05
<b>Figure I.2</b>	Configuration des conducteurs en faisceaux pour les lignes HT et THT.	08
<b>Figure I.3</b>	Relation entre R et B	08
<b>Figure I.4</b>	Exemple de pylônes haute et très haute tension.	10

### Chapitre II : Champs électrostatiques des lignes THT

<b>Figure II.1</b>	Surface cylindrique entourant un axe chargé	12
<b>Figure II.2</b>	Coupe d'une ligne à n conducteurs	13
<b>Figure II.3</b>	Champ électrique dû à deux axes parallèles (charges opposés)	14
<b>Figure II.4</b>	Configuration d'une ligne à n phases pour le calcul de la charge totale.	16
<b>Figure II.5</b>	Flèche f d'une ligne entre deux pylônes.	16
<b>Figure II.6</b>	Détermination du champ électrostatique au voisinage de la ligne.	17

### Chapitre III : Champs magnétiques des lignes THT

<b>Figure III.1</b>	Composante tangentielle de l'induction, conducteur plein	21
<b>Figure III.2</b>	Flux élémentaire embrassé par les conducteurs 3 et n sur $\Delta x$ .	22
<b>Figure III.3</b>	Plusieurs conducteurs aériens (a) avec leurs images par rapport à la terre (b).	24
<b>Figure III.4</b>	Méthode des images de Maxwell.	26

## Chapitre IV : Application sur des lignes THT

<b>Figure IV.1</b>	Type de Pylône utilisé pour les lignes THT à configuration horizontale.	31
<b>Figure. IV.2</b>	Intensité du champ électrique générée par une ligne de 400 KV	33
<b>Figure. IV.3</b>	Intensité du champ électrique générée par une ligne de 765 KV.	33
<b>Figure. IV.4</b>	Intensité du champ électrique générée par une ligne de 1050 KV.	34
<b>Figure. IV.5</b>	Influence de la distance S entre phases sur l'intensité du champ électrique.	34
<b>Figure. IV.6</b>	Influence du nombre de conducteurs N par phase sur l'intensité du champ électrique.	34
<b>Figure. IV.7</b>	Influence de la disposition des phases sur l'intensité du champ électrique.	35
<b>Figure. IV.8</b>	Intensité du champ magnétique générée par une ligne de 400 KV.	37
<b>Figure. IV.9</b>	Intensité du champ magnétique générée par une ligne de 750 KV.	38
<b>Figure.IV.10</b>	Influence de la hauteur de la ligne de 400 KV sur l'intensité du champ magnétique générée.	38
<b>Figure.IV.11</b>	Influence de la disposition des lignes sur l'intensité du champ magnétique générée.	38

## Liste des tableaux

N°	Titre	Page
----	-------	------

### Chapitre I : Introduction aux lignes haute et très haute tension

<b>Tableau I.1</b>	Niveaux des tensions nominales des réseaux haute et très haute tension.	03
<b>Tableau I.2</b>	Valeurs moyennes des paramètres de la ligne en configuration horizontale	04
<b>Tableau I.3</b>	Estimation de puissance et pertes de puissance pour une ligne THT.	06
<b>Tableau I.4</b>	Relation entre R et B	09

### Chapitre IV : Application sur des lignes THT

<b>Tableau IV.1</b>	Données des lignes à calculer	31
<b>Tableau IV.2</b>	Données des lignes pour calculer l'intensité du champ magnétique	36
<b>Tableau IV.3</b>	Limites d'expositions au champ magnétique	41

# Introduction Générale

## Introduction générale

Le transport de l'énergie électrique avec des lignes de très haute tension (THT) a commencé en 1952, lorsque la première ligne 380–400 kV a été mise en service en Suède. Depuis lors, les pays industrialisés du monde entier ont adopté cette tension et des niveaux de tension plus élevés. Ici en Algérie on y à 400 KV depuis quelques années seulement.

Très vite, on a découvert que l'impact de ces niveaux de tension sur l'environnement nécessitait une attention particulière en raison des tensions élevés des conducteurs, ce qui entraînait des problèmes d'interférence de la fréquence du réseau aux fréquences TV. Ainsi, les champs électrostatiques dans le voisinage de la ligne, l'effet couronne, les pertes de puissances, le bruit audible, les interférences radio et TV sont devenus des problèmes constants régissant la conception des lignes, la hauteur de la ligne et l'espacement des phases pour maintenir les champs interférents dans les limites spécifiées. [1]

De tels niveaux de tension ont un bénéfice économique certain en vue d'une réduction des pertes de transport, toutefois l'impact des lignes travaillant à de tels niveaux de tension sur leur voisinage est aussi grand que diversifié, le principal acteur étant les champs électrique et magnétique rayonnés par ces lignes.

Les lignes de transport se comportent comme un gigantesque guide ondes ouvert pour les ondes électromagnétiques de fréquences relativement basses et spécialement les fréquences industrielles. Ces champs interagissent avec le voisinage immédiat de la ligne de transport d'énergie en créant des courants et de la tension induite sur des victimes qui peuvent être aussi bien des appareils ou des êtres humains.

Depuis plus de 30 ans de nombreux travaux de recherche portant sur les effets de l'exposition aux champs électromagnétiques générés par les lignes de transport de l'énergie électrique. Ces études sont caractérisées par la diversité des méthodes utilisées pour la caractérisation de ces champs et la définition des mécanismes de leur couplage avec les tissus biologiques et l'appareillage électrique.

Notre mémoire est structurée en quatre chapitres comme suit :

Dans le premier chapitre, nous présentons les lignes THT utilisées dans le transport de l'énergie électrique et ses paramètres importants tels que : niveau de tension, pertes de puissances, les conducteurs en faisceaux, ...etc.

Dans le deuxième chapitre, on présente une méthode de calcul de l'intensité du champ électrique  $E$  générée par les lignes THT.

Pour le troisième chapitre, on présente une méthode de calcul de l'induction magnétique  $B$  générée par les lignes THT.

Le dernier chapitre, est une application de ce qui a présenté dans les chapitres 2 et 3, sur des lignes THT de différents niveaux de tension.

Nous clôturons notre travail par une conclusion générale.

Nous tenons à signaler que la plus grande partie de l'étude théorique ainsi que les données des lignes THT ont été prise de la référence [1].

# CHAPITRE 1

**Introduction aux lignes haute et très haute tension**



## I.1. Introduction

Les sources d'énergie électrique à usage industriel et domestique peuvent être divisées en deux grandes catégories : (1) transportables ; et (2) Localement utilisable.

Le type transportable est évidemment l'énergie hydroélectrique et conventionnelle thermique.

Pour l'énergie utilisée localement, on distingue :

1. Puissance thermique conventionnelle dans les centres de charge urbains ;
2. Micro-centrales hydroélectriques ;
3. L'énergie éolienne ;
4. Solaire thermique ;
5. Cellules solaires ou énergie photo-voltaïque;
6. Géo-thermique;
7. Énergie de la biomasse : (a) Forêts ; (b) la végétation ; et (c) les déchets animaux.

## I.2. Valeurs standard des tensions nominales

Les tensions adoptées pour la transmission de l'énergie électrique en courant alternatif doivent être conformes aux spécifications standard formulées dans tous les pays et au niveau international. Un exemple de ces valeurs sont représenté dans le tableau suivant :

**Tableau I.1** : Niveaux des tensions nominales des réseaux haute et très haute tension.

<b>Tension nominale en KV</b>	132	220	275	345	400	500	750	1000	1150
<b>Limite maximale de fonctionnement en KV</b>	145	245	300	362	420	520	765	1050	1200

Les tensions de fonctionnement maximales spécifiées ci-dessus ne doivent en aucun cas être dépassées dans aucune partie du système, car les niveaux d'isolation de tous les équipements sont basés sur ces valeurs.

### I.3. Valeurs moyennes des paramètres de la ligne

Pour les lignes haute tension (HT) et très haute tension (THT), plus on augmente la tension (donc diminution du courant) on diminue les pertes de puissances ( $I^2 \cdot R$  par phase), un autre moyen pour diminuer les pertes de puissances active et réactive pour ce type de réseau est la diminution des paramètres de la ligne (la résistance  $R$  et la réactance  $X$ ), pour cela on utilise des lignes en faisceaux.

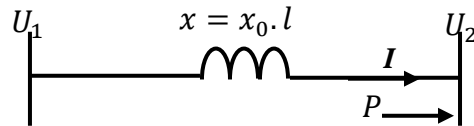
Le tableau I.2 présente les valeurs moyennes des paramètres de la ligne de configuration horizontale, pour deux niveaux de tension.

**Tableau I.2 :** Valeurs moyennes des paramètres de la ligne en configuration horizontale

<b>Tension du système en KV</b>	400	750	1000	1200
<b>Hauteur moyenne, en m</b>	15	18	21	21
<b>Distance entre phases, en m</b>	12	15	18	21
<b>Types de conducteurs</b>	2 x 32 mm Par phase	4 x 30 mm Par phase	6 x 46 mm Par phase	8 x 46 mm Par phase
<b>Distance entre conducteurs de la phase en faisceaux, B (en m)</b>	0.4572	0.4572	---	---
<b>Rayon R de la phase en faisceaux (en m)</b>	---	---	0.6	0.6
<b><math>r_0</math> (<math>\Omega/km</math>)</b>	0.031	0.0136	0.0036	0.0027
<b><math>x_0</math> (<math>\Omega/km</math>)</b>	0.327	0.272	0.231	0.231
<b><math>(r_0/x_0)</math></b>	10.55	20	64.2	85.6

Pour les réseaux HT et THT, la valeur de la résistance est négligeable devant la réactance, donc on peut exprimer la puissance  $P$  transportée par la ligne de la figure I.1 comme suit :

$$P = \frac{U_1 \cdot U_2}{x} \cdot \sin(\delta) \quad (I.1)$$



**Figure I.1 :** Modèle de ligne HT.

Avec  $P$  : puissance triphasée, en MW

$U_1$  et  $U_2$  sont les tensions composées au début et à la fin de la ligne, en KV.

$x$  est la réactance de liaison entre  $U_1$  et  $U_2$ ,  $x = x_0 \cdot l$ .

$l$  est la longueur de la ligne, en km

$\delta$  est l'angle de déphasage entre  $U_1$  et  $U_2$ .

Pour une estimation préliminaire de  $P$ , nous prendrons  $U_1 = U_2 = U = U_N$ .

#### I.4. Capacité de transport et pertes de puissances

Si on tient compte des estimations ci-dessus, on peut exprimer la puissance transitée par la ligne comme suit :

$$P = \frac{U_1 \cdot U_2}{x} \cdot \sin(\delta) = \frac{U^2}{x_0 \cdot l} \cdot \sin(\delta) \quad (\text{I.2})$$

Pour un facteur de puissance unitaire, le courant  $I$  demandée par une charge de puissance  $P$  sera :

$$I = \frac{P}{\sqrt{3}U} = \frac{U}{\sqrt{3}x_0 \cdot l} \sin(\delta) \quad (\text{I.3})$$

On peut estimer les pertes de puissances active, si on tient compte de la résistance  $r = r_0 \cdot l$  de la ligne ;

$$\Delta P = 3 \cdot r \cdot I^2 = 3 \cdot r_0 \cdot l \cdot \frac{U^2 \sin^2(\delta)}{3 \cdot x_0^2 l^2} = U^2 \sin^2(\delta) \cdot (r_0 / x_0^2 \cdot l) \quad (\text{I.4})$$

Ce qui donne

$$\Delta P(\text{en } \%) = \frac{\Delta P}{P} \cdot 100 = 100 \cdot \sin(\delta) \cdot (r_0 / x_0) \quad (\text{I.5})$$

Le tableau I.3 donne la puissance transitée ainsi que les pertes de puissances  $\Delta P(\text{en } \%)$  pour plusieurs niveaux de tensions et  $\delta = 30^\circ$

**Tableau I.3** : Estimation de puissance et pertes de puissance pour une ligne THT.

Tension de système en KV	400	750	1000	1200
$\Delta P(\text{en } \%)$	$\frac{50}{10.55} = 4.76$	$\frac{50}{20} = 2.5$	$\frac{50}{64.2} = 0.78$	$\frac{50}{85.6} = 0.584$
Longueur de la ligne, en km	$P = \frac{0.5 \cdot U^2}{x_0 \cdot l} \text{ en MW}$			
400	670	2860	6000	8625
600	450	1900	4000	5750
800	335	1430	3000	4310
1000	270	1140	2400	3450
1200	225	950	2000	2875

A partir des valeurs du tableau I.3, on peut tirer les remarques importantes suivantes :

- 1- Pour la même longueur de la ligne, un système de 750 KV peut transporter quatre fois de puissance que celui de 400 KV. Donc plus on augmente le niveau de la tension du réseau plus on augmente sa capacité de transport.
- 2- Une ligne de 1200 KV peut transporter la puissance de trois lignes de 750 KV, et douze lignes de 400 KV
- 3- La capacité de transport de la ligne pour le même niveau de la tension diminue avec l'augmentation de la longueur de la ligne, (inversement proportionnel à la longueur de la ligne).
- 4- Cependant, le pourcentage de perte de puissance  $\Delta P(\%)$  reste indépendant de la longueur de ligne car il dépend du rapport de la résistance linéique du conducteur à la réactance linéique ( $r_0/x_0$ ), et de l'angle de déphasage  $\delta$  entre  $U_1$  et  $U_2$ .
- 5- Le pourcentage de perte de puissance  $\Delta P(\%)$  diminue avec l'augmentation de la tension du système, raison importante pour la nécessité d'augmenter la tension de transport des lignes électriques.

## I.5. Les lignes de transport haute et très haute tension

### I.5.1. Définition des lignes électriques

Une ligne électrique est un ensemble de conducteurs, d'isolants et d'éléments accessoires destinés au transport de l'énergie électrique. Les conducteurs sont en général en aluminium, en cuivre, en acier... etc. Les isolants ont une partie solide (porcelaine, verre, papier, etc..) combinée avec un gaz (air, SF<sub>6</sub>) ou un liquide (huile).

Le transport de l'énergie électrique du producteur au consommateur se fait à l'aide de lignes électriques, qui constituent les artères d'un système d'énergie électrique.

Ces lignes sont composées de trois (3) phases, qui constituent un système triphasé. L'avantage du triphasé est que la somme des tensions et la somme des courants sur l'ensemble des trois phases est égale à zéro. Ceci a pour effet de diminuer le champ électrique et magnétique quand on s'écarte des phases. Le transit de l'électricité par les lignes est toujours accompagné par la présence :

✓ d'un champ électrique qui est lié à :

- La tension.
- La proximité des autres phases, du (des) câble(s) de garde, de la terre ou tout objet à proximité.
- La configuration de la ligne (220 KV, 400 kV, ...).

✓ d'un champ magnétique qui est lié à :

- La valeur du courant circulant dans les conducteurs.
- La configuration de la ligne.

Plus la tension (et donc le courant en régime normal d'utilisation), sera élevée, plus les champs électrique et magnétique seront importants.

### I.5.2. Types de lignes

Les lignes électriques peuvent être classées suivant plusieurs critères :

- ✓ situation dans l'espace : lignes aériennes, lignes souterraines (câbles),
- ✓ niveau de tension,
- ✓ nature de la tension : continue, alternative monophasée ou triphasée.

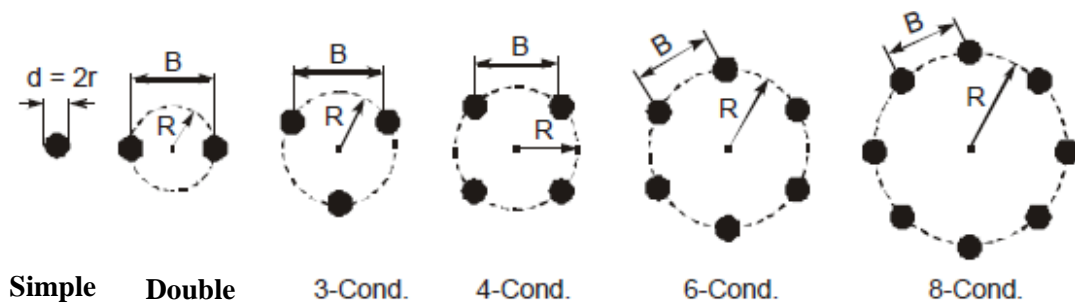
Les lignes de transport d'énergie se répartissent en deux niveaux principaux de tension :

- ✓ la THT entre 220 à 800 kV, ces lignes constituent le réseau national dit de grand transport et d'interconnexion (la THT est essentiellement de deux niveaux 220 et 400 kV en Algérie)

✓ la HT entre 45 et 160 kV, ces lignes servent à la répartition d'énergie au niveau régional à partir des grands postes THT (la HT est essentiellement de deux niveaux 63 et 90 KV).

### I.5.3. Les lignes en faisceaux

Les lignes en faisceaux sont utilisées exclusivement pour les réseaux HT et THT, afin de réduire les pertes de puissances. La figure I.2 montre les différents types de conducteurs en faisceaux utilisés pour les lignes haute tension.



**Figure I.2 :** Configuration des conducteurs en faisceaux pour les lignes HT et THT.

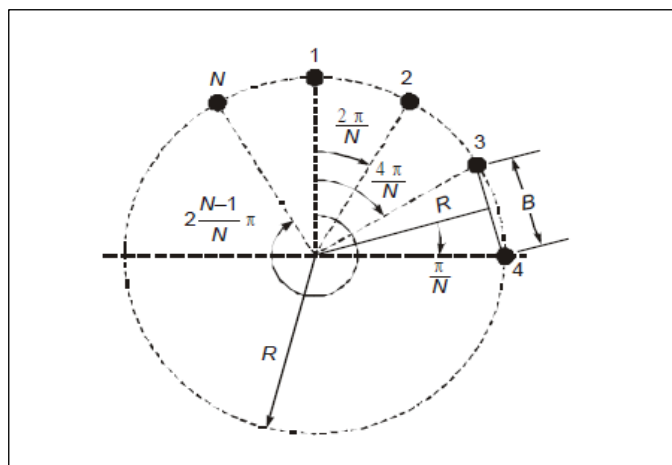
Avec :  $d = 2.r$  est le diamètre d'un seul conducteur et  $r$  son rayon ;

$B$  : la distance entre deux conducteurs adjacents ;

$R$  : Rayon de la ligne en faisceau.

#### A. Relation entre R et B

La relation entre  $R$  et  $B$  est expliquée par la figure I.3.



**Figure I.3 :** Relation entre  $R$  et  $B$

On a:

$$\frac{B}{2} = R \cdot \sin(\pi/N) \Rightarrow R = \frac{B}{2 \cdot \sin(\pi/N)} \quad (\text{I.6})$$

Le tableau suivant donne les rapports  $\frac{B}{R}$  et  $\frac{R}{B}$  pour N varie de 2 à 18 ;

**Tableau I.4 : Relation entre R et B**

<b>N</b>	2	3	4	6	8	12	18
<b>R/B</b>	0.5	0.578	0.7071	1	1.308	1.874	2.884
<b>B/R</b>	2	$\sqrt{3}$	$\sqrt{2}$	1	0.7654	0.5344	0.3472

### B. Rayon moyen géométrique

Pour les lignes en faisceaux, on utilise dans les calculs le paramètre  $r_{\text{éq}}$  appelé le **rayon moyen géométrique** ou simplement le **rayon équivalent** et qui se détermine par la relation suivante :

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

Exemple

$$\text{Pour } N = 2; r_{\text{éq}} = (2 \cdot r \cdot R)^{1/2}$$

$$\text{Pour } N = 3; r_{\text{éq}} = (3 \cdot r \cdot R^2)^{1/3}$$

$$\text{Pour } N = 4; r_{\text{éq}} = (4 \cdot r \cdot R^3)^{1/4}$$

$$\text{Pour } N = 6; r_{\text{éq}} = (6 \cdot r \cdot R^5)^{1/6}$$

### I.5.4. Les pylônes utilisés en HT et THT

La nécessité d'augmenter la 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. Plusieurs arrangements de conducteurs différents sont utilisés. La figure I.4.(a) montre un pylône avec des conducteurs disposés horizontalement. La disposition horizontale augmente les largeurs du pylône, ce qui produit un effet plus visible. La figure I.4.(b) montre un pylône d'une ligne à double circuit avec des conducteurs disposés verticalement. Cela se traduit par une apparence plus haute et plus compacte.

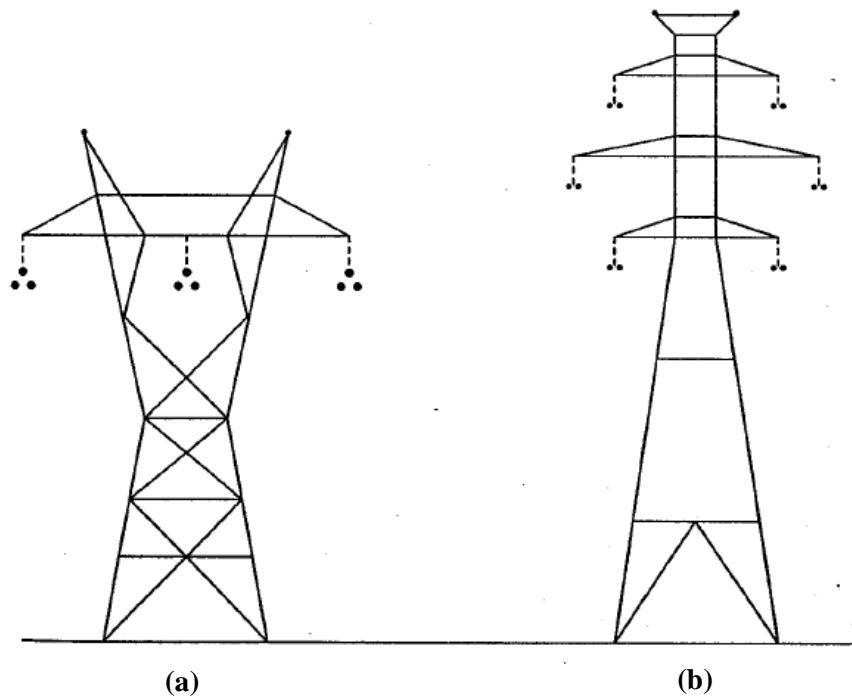


Figure I.4 : Exemple de pylônes haute et très haute tension. [3]

## I.6. Conclusion

Dans ce chapitre on a vu que, l'augmentation de la demande en énergie électrique a obligé les sociétés d'électricité d'augmenter le niveau de tension, afin de transporter le maximum de puissance à des distances éloignées, donc la nécessité d'augmenter le niveau de la tension de transport des réseaux électriques est devenu primordiale.

Un autre paramètre important, est l'utilisation des conducteurs en faisceaux pour les lignes de transport haute et très haute tension.



# CHAPITRE 2

## **Champs électrostatiques des lignes THT**

## II.1. Introduction

Les effets électrostatiques des lignes THT sont causés par la tension extrêmement élevée tandis que les effets électromagnétiques sont dus au courant de charge de ligne et aux courants de court-circuit. Les dangers existent en raison des deux causes à des degrés divers. Il s'agit, par exemple, d'une chute de tension à la surface de la terre due à des courants de défaut élevés, d'un contournement direct des conducteurs de ligne vers des êtres humains ou des animaux. Les champs électrostatiques endommagent la vie humaine, les plantes, les animaux et les objets métalliques tels que les clôtures et les conduites enfouies. Dans certaines circonstances défavorables, ceux-ci donnent lieu à des courants de choc de diverses intensités.

Dans ce chapitre on va présenter une méthode simple pour le calcul de l'intensité du champ électrique créé au voisinage des lignes THT.

## II.2. Champ électrique d'un axe chargé

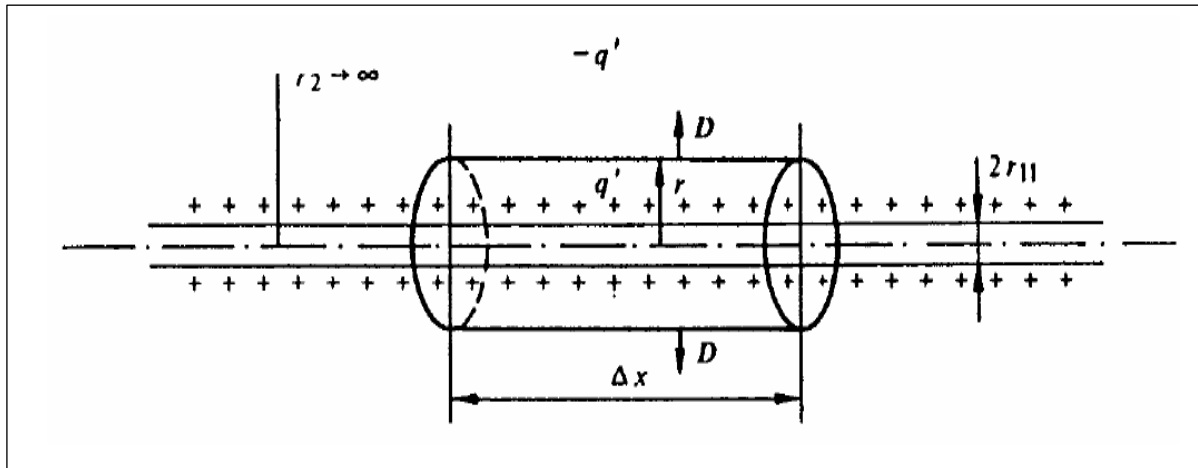
Soit un cylindre de longueur infinie (conducteur métallique fin et très long) dont la charge linéique est «  $q'$  ». La permittivité du milieu environnant est donnée par :  $\varepsilon = \varepsilon_0 \varepsilon_r$ .

$\varepsilon_0$  : est la permittivité diélectrique du vide, c'est une constante universelle qui vaut «  $1/(36 \cdot \pi \cdot 10^9) = 8,85 \text{ pF/m}$  ».

$\varepsilon_r$  : est la permittivité diélectrique relative du milieu, elle vaut « 1 » pour la plupart des gaz (notamment pour l'air).

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.1), 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  $D$  (vecteur de densité électrique) 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.1, 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.1 :** Surface cylindrique entourant un axe chargé [4].

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 :

$$\vec{D} = \varepsilon_0 \varepsilon_r \vec{E} \quad (\text{II.1})$$

Nous obtenons alors :

$$\oint \vec{D} \cdot \vec{dS} = q' \cdot \Delta x \quad (\text{II.2})$$

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

$$\vec{D}(r) = \frac{q'}{2 \cdot \pi \cdot r} \cdot \vec{e}_r \quad (\text{II.3})$$

Le champ électrique y correspondant est donné par :

$$\vec{E}(r) = \frac{q'}{2 \cdot \pi \cdot \varepsilon_0 \cdot \varepsilon_r \cdot r} \cdot \vec{e}_r \quad (\text{II.4})$$

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

$$\vec{E} = -\overrightarrow{\text{grad}}V \quad (\text{II.5})$$

Et le potentiel est déterminé par intégration :

$$V = - \int_{r_0}^r \vec{E} \cdot \vec{dr} \quad (\text{II.6})$$

Où ' $r_0$ ' localise la référence (point 'A' sur la figure II.3) 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 :

$$V(r) = - \int_{r_{11}}^r \vec{E} \cdot \vec{dr} = \frac{-q'}{2 \cdot \pi \cdot \varepsilon} \cdot \ln \frac{r}{r_{11}} \quad (\text{II.7})$$

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  $\varepsilon_r \neq 1$ ).

### II.3. Champ électrique d'une ligne au voisinage du sol - méthode des images

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  $n$ -ième 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.2). Le champ ne s'en trouve ainsi pas modifié et le calcul devient immédiat.

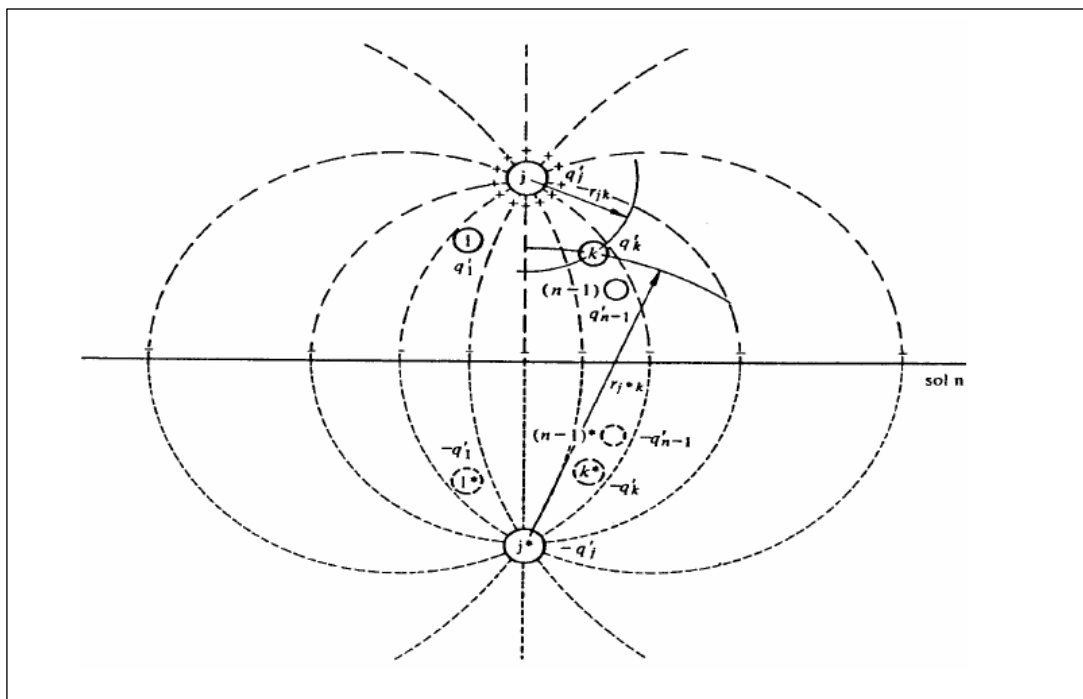


Figure II.2 : Coupe d'une ligne à  $n$  conducteurs [4].

### II.4. Champ électrique de deux axes parallèles dans l'air

Soit une paire d'axes parallèles ( $j$ ) et ( $j^*$ ), de longueur infinie (figure I.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 :

$$\vec{E} = \frac{q'_j}{2\pi\epsilon_0 r_{jp}} \cdot \vec{e}_{jp} \quad (\text{II.8})$$

Et

$$\vec{E}^* = \frac{-q'_j}{2\pi\epsilon_0 r_{j^*p}} \cdot \vec{e}_{j^*p} \quad (\text{II.9})$$

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

$\vec{e}_{jp}$  et  $\vec{e}_{j^*p}$  sont les vecteurs unitaires orientés respectivement selon 'pj' et 'pj\*'.

Nous prenons ensuite les contributions de chaque conducteur (principe de superposition), nous aurons :

$$\vec{E}_j = \vec{E} + \vec{E}^* \quad (\text{II.10})$$

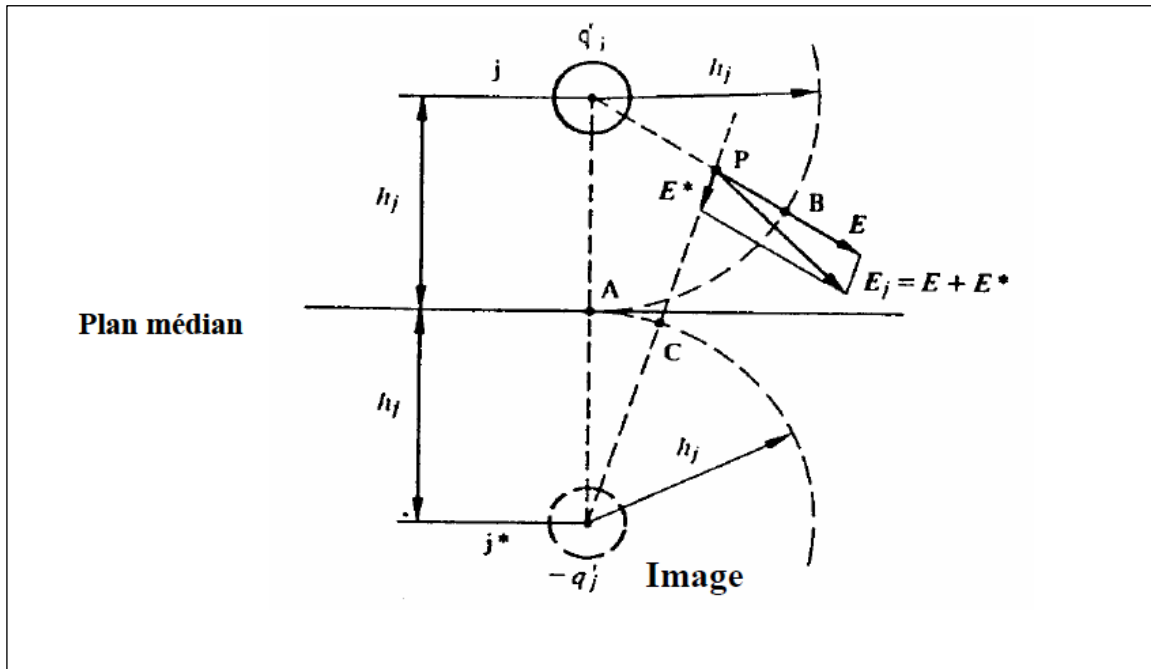


Figure II.3 : Champ électrique dû à deux axes parallèles (charges opposés) [4].

### II.4.1. 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  $-q'_j$  :

$$v_p = \int_{r_{jp}}^{h_j} \frac{q'_j}{2\pi\epsilon_0 \cdot r} dr - \int_{h_j}^{r_{j^*p}} \frac{q'_j}{2\pi\epsilon_0 \cdot r^*} dr^* = \frac{q'_j}{2\pi\epsilon_0} \ln \frac{h_j}{r_{jp}} + \frac{q'_j}{2\pi\epsilon_0} \ln \frac{r_{j^*p}}{h_j} = \frac{q'_j}{2\pi\epsilon_0} \ln \frac{r_{j^*p}}{r_{jp}} \quad (\text{II.11})$$

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

$$v_{pn} = \frac{1}{2\pi\epsilon_0} \sum_{j=1}^{n-1} q'_j \ln \frac{r_{j^*p}}{r_{jp}} \quad (\text{II.12})$$

Si le point 'P' est placé sur le conducteur 'k', la formule (II.11) permet de calculer la tension entre ce conducteur et la terre :

$$v_{kn} = \frac{1}{2\pi\epsilon_0} \sum_{j=1}^{n-1} q'_j \ln \frac{r_{j^*k}}{r_{jk}} \quad (\text{II.13})$$

Où  $r_{jk}$  et  $r_{j^*k}$  sont les distances entre l'axe géométrique du conducteur 'k' et respectivement les axes des conducteurs 'j' et 'j\*'. Pour  $j = k$ , on a  $r_{k^*k} = 2 \cdot h_k$  représente la distance entre le conducteur et son image, tandis que  $r_{kk}$  est le rayon du conducteur 'k'.

Si nous posons :

$$P_{kj} = \ln \frac{r_{j^*k}}{r_{jk}} \quad (\text{II.14})$$

La tension  $v_{kn}$  s'écrit :

$$v_{kn} = \frac{1}{2\pi\epsilon_0} \sum_{j=1}^{n-1} P_{kj} \cdot q'_j \quad (\text{II.15})$$

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

Les coefficients  $P_{kj}$  sont appelés **coefficients de potentiel de Maxwell**.

### II.5. Calcul de la charge de plusieurs conducteurs

Pour une ligne à plusieurs phases, comme le montre la figure II.4, on peut déterminer la charge totale  $q$  de la ligne à partir de l'expression matricielle suivante :

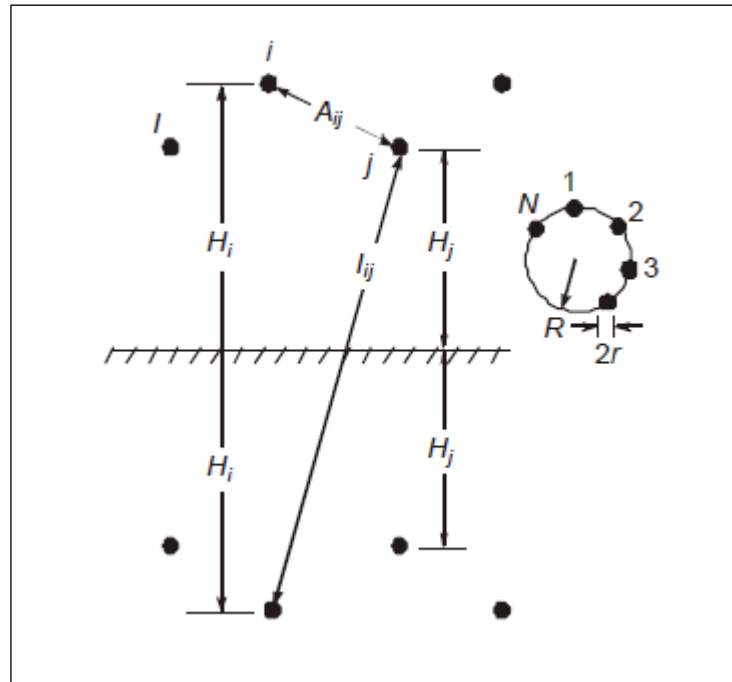
$$\frac{1}{2\pi\epsilon_0} [q] = [P]^{-1} [V] = [M] [V] \quad (\text{II.16})$$

Avec  $[q] = [q_1, q_2, q_3, \dots, q_n]_t$  la matrice colonne des charges pour les n phases ; (II.17)

$[V] = [V_1, V_2, V_3, \dots, V_n]_t$  la matrice colonne des tensions simples pour les n phases ;

$[P] = n \times n$  Matrice des coefficients des potentiels de Maxwell, avec

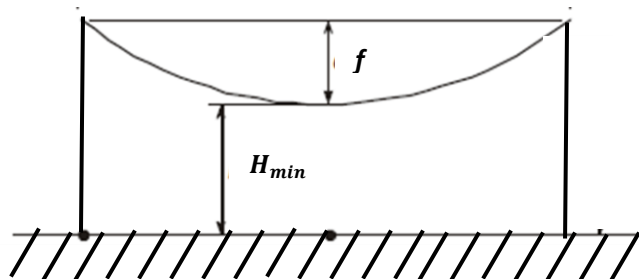
$$P_{ii} = \ln(2H_i/r_{\acute{e}q}) \text{ et } P_{ij} = \ln(I_{ij}/A_{ij}), i \neq j \tag{II.18}$$



**Figure II.4 :** Configuration d’une ligne à n phases pour le calcul de la charge totale. [1]

Avec  $H_i$  est la hauteur moyenne du conducteur  $i$  par rapport à la terre, et ce détermine comme le montre la figure II.5 par l’expression suivante :

$$H_i = H_{min} + \frac{f}{3} \tag{II.19}$$



**Figure II.5 :** Flèche  $f$  d’une ligne entre deux pylônes.

Avec :  $H_i$  hauteur du conducteur  $i$  par rapport à la terre ;

$I_{ij}$  distance entre le conducteur  $i$  et l’image du conducteur  $j$  par rapport à la terre, avec  $i \neq j$  ;

$A_{ij}$  distance aérienne entre les conducteurs  $i$  et  $j$ ,  $i \neq j$  ;

$r_{\text{éq}} = R(N \cdot r/R)^{1/N}$  Rayon moyen géométrique des lignes en faisceaux ;

$R = \frac{B}{2 \cdot \sin(\pi/N)}$  Rayon d'une phase en faisceaux ;

N : Nombre de conducteurs par phase ;

r : rayon d'un seul conducteur ;

$i, j = 1, 2, 3, \dots, n$ .

Puisque les tensions de ligne varient de manière sinusoïdale avec le temps à la fréquence du réseau, les charges de faisceau  $q_1$  à  $q_n$  varieront également de manière sinusoïdale. Par conséquent, le champ électrostatique induit au voisinage de la ligne varie également aussi à la fréquence du réseau.

## II.6. Calcul de l'intensité du champ électrique d'une ligne triphasée

Soit une ligne triphasée en faisceau, dont les tensions des trois phases sont données par la matrice suivante :

$$[V] = V_m [\sin(\omega t + \varphi), \sin(\omega t + \varphi - 120^\circ), \sin(\omega t + \varphi + 120^\circ)] \quad (\text{II.20})$$

En général, on sélectionne un système de coordonnées x et y qui se situe au niveau de la terre en dessous et au milieu de la ligne, soit par exemple les coordonnées des conducteurs de la ligne  $(x_i, y_i)$ , comme le montre la figure II.6.

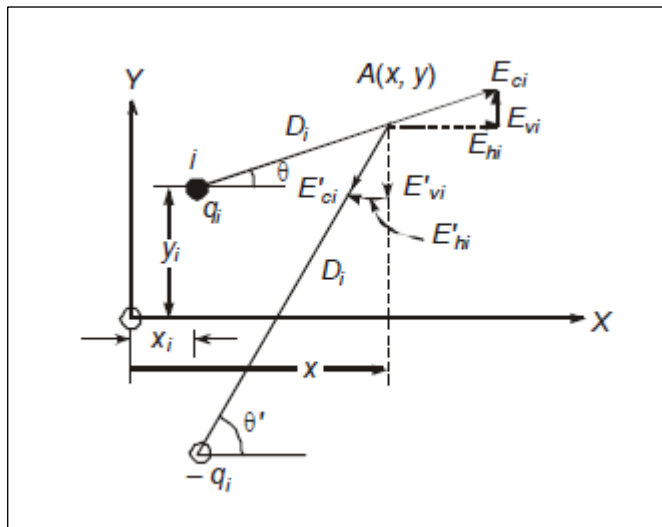


Figure II.6 : Détermination du champ électrostatique au voisinage de la ligne. [1]



Un point  $A(x, y)$  est représenté sur la figure II.6 pour déterminer les différentes composantes (verticale, horizontale et totale) du champ électrique  $E$ . le vecteur du champ crée par la charge  $q_i$  du conducteur ;

$$E_c = (q_i/2\pi\epsilon_0)(1/D_i) \quad (\text{II.21})$$

$$\text{Avec } D_i^2 = (x - x_i)^2 + (y - y_i)^2$$

Les composantes verticale et horizontale ( $E_h$ ) de  $E_c$  sont

$$E_h = E_c \cdot \cos\theta = (q_i/2\pi\epsilon_0)(x - x_i)/D_i^2 \quad (\text{II.22})$$

$$E_v = E_c \cdot \sin\theta = (q_i/2\pi\epsilon_0)(y - y_i)/D_i^2 \quad (\text{II.23})$$

De la même façon, l'image de la charge  $q_i$  par rapport à la terre induit au point A :

$$E'_c = (q_i/2\pi\epsilon_0)(1/D'_i)$$

$$\text{Où : } (D'_i)^2 = (x - x_i)^2 + (y + y_i)^2,$$

$$\begin{cases} E'_h = E'_c \cdot \cos\theta = (q_i/2\pi\epsilon_0)(x - x_i)/(D'_i)^2 \\ E'_v = E'_c \cdot \sin\theta = (q_i/2\pi\epsilon_0)(y + y_i)/(D'_i)^2 \end{cases} \quad (\text{II.24})$$

Les composantes totales du champ électrique dans la direction horizontale et verticale créés au point A par les deux charges  $q_i$  et son image par rapport à la terre.

$$E_{hi} = (q_i/2\pi\epsilon_0)(x - x_i) \cdot [1/D_i^2 - 1/(D'_i)^2] \quad (\text{II.25})$$

$$E_{vi} = (q_i/2\pi\epsilon_0) \cdot [(y - y_i)/D_i^2 - (y + y_i)/(D'_i)^2] \quad (\text{II.26})$$

Par conséquent, pour  $n$  phases, la somme des composantes horizontale et verticales des champs créés au point A seront :

$$E_{hn} = \sum_{i=1}^n E_{hi} \text{ et } E_{vn} = \sum_{i=1}^n E_{vi} \quad (\text{II.27})$$

Enfin le champ électrique totale sera :

$$E_{in} = (E_{hn}^2 + E_{vn}^2)^{1/2} \quad (\text{II.28})$$

Donc pour une ligne triphasée on peut écrire,

En prenant :

$$J_i = (x - x_i) \cdot [1/D_i^2 - 1/(D'_i)^2] \quad (\text{II.29})$$

$$K_i = [(y - y_i)/D_i^2 - (y + y_i)/(D'_i)^2] \quad (\text{II.30})$$

Ce qui donne, la phase 1 crée au point A la composante horizontale totale  $E_{h1}$  donnée comme suit :

$$E_{h1} = (q_1/2\pi\varepsilon_0).J_1$$

Avec la charge  $q_1$  est donnée par les formules (II.16), (II.17) et (II.18) comme suit ;

$$q_1/2\pi\varepsilon_0 = V_m[M_{11}\sin(\omega t + \varphi) + M_{12}\sin(\omega t + \varphi - 120^\circ) + M_{13}\sin(\omega t + \varphi + 120^\circ)]$$

Ce qui donne :

$$\begin{aligned} E_{h1} &= (q_1/2\pi\varepsilon_0).J_1 \\ &= V_m.J_1[M_{11}\sin(\omega t + \varphi) + M_{12}\sin(\omega t + \varphi - 120^\circ) + M_{13}\sin(\omega t + \varphi + 120^\circ)] \end{aligned}$$

De même pour les phases 2 et 3 :

$$\begin{aligned} E_{h2} &= (q_2/2\pi\varepsilon_0).J_2 \\ &= V_m.J_2[M_{21}\sin(\omega t + \varphi) + M_{22}\sin(\omega t + \varphi - 120^\circ) + M_{23}\sin(\omega t + \varphi + 120^\circ)] \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} E_{h3} &= (q_3/2\pi\varepsilon_0).J_3 \\ &= V_m.J_3[M_{31}\sin(\omega t + \varphi) + M_{32}\sin(\omega t + \varphi - 120^\circ) + M_{33}\sin(\omega t + \varphi + 120^\circ)] \end{aligned}$$

La composante horizontale totale  $E_{hn}$  sera :

$$\begin{aligned} E_{hn} &= V_m[(J_1M_{11} + J_2M_{21} + J_3M_{31})\sin(\omega t + \varphi) \\ &\quad + (J_1M_{12} + J_2M_{22} + J_3M_{32})\sin(\omega t + \varphi - 120^\circ) \\ &\quad + (J_1M_{13} + J_2M_{23} + J_3M_{33})\sin(\omega t + \varphi + 120^\circ)] \\ &= V_m[J_{h1}\sin(\omega t + \varphi) + J_{h2}\sin(\omega t + \varphi - 120^\circ) + J_{h3}\sin(\omega t + \varphi + 120^\circ)] \end{aligned}$$

Dans la forme polaire, on peut écrire :

$$E_{hn} = V_m[J_{h1}\angle(\varphi) + J_{h2}\angle(\varphi - 120^\circ) + J_{h3}\angle(\varphi + 120^\circ)] \quad (\text{II.31})$$

Par exemple pour  $\varphi = 0^\circ$ , on a :

$$\begin{aligned} J_{h1}\angle(\varphi) + J_{h2}\angle(\varphi - 120^\circ) + J_{h3}\angle(\varphi + 120^\circ) &= (J_{h1} - 0.5J_{h2} - 0.5J_{h3}) + \\ &\quad j(0 - 0.866J_{h2} + 0.866J_{h3}) \end{aligned} \quad (\text{II.32})$$

Ce qui donne la valeur maximale de la composante horizontale :

$$\begin{aligned}
E_{hnm} &= [(J_{h1} - 0.5J_{h2} - 0.5J_{h3})^2 + 0.75(J_{h3} - J_{h2})^2]^{1/2} \cdot V_m \\
&= [J_{h1}^2 + J_{h2}^2 + J_{h3}^2 - J_{h1} \cdot J_{h2} - J_{h2} \cdot J_{h3} - J_{h3} \cdot J_{h1}]^{1/2} \cdot V_m \\
&= J_h \cdot V_m
\end{aligned}$$

La valeur efficace de la composante horizontale du champ électrique au point A due aux trois phases de la ligne sera :

$$E_{hn} = \frac{E_{hnm}}{\sqrt{2}} = J_h \cdot \frac{V_m}{\sqrt{2}} = J_h \cdot V \quad (\text{II.33})$$

Où V est la tension efficace simple de la ligne.

De la même manière, on peut déterminer la valeur efficace de la composante verticale  $E_{vn}$  :

$$E_{vn} = K_v \cdot V = V \cdot (K_{v1}^2 + K_{v2}^2 + K_{v3}^2 - K_{v1} \cdot K_{v2} - K_{v2} \cdot K_{v3} - K_{v3} \cdot K_{v1})^{1/2} \quad (\text{II.34})$$

Avec :

$$\begin{cases}
K_{v1} = K_1 M_{11} + K_2 M_{21} + K_3 M_{31} \\
K_{v2} = K_1 M_{12} + K_2 M_{22} + K_3 M_{32} \\
K_{v3} = K_1 M_{13} + K_2 M_{23} + K_3 M_{33}
\end{cases} \quad (\text{II.35})$$

Où les valeurs de  $K_1$ ,  $K_2$  et  $K_3$  sont obtenues à partir de la formule (II.30) pour  $i = 1, 2, 3$ .

## II.7. Conclusion

Dans ce chapitre, on a utilisé la méthode des images pour la détermination des composantes verticale et horizontale de l'intensité de champ électrique créé au voisinage d'une ligne triphasée THT.

# CHAPITRE 3

## **Champs magnétiques des lignes THT**

### III.1. Introduction

La connaissance de la valeur du champ magnétique des lignes électriques aériennes haute et très haute tension est une tâche importante dans l'analyse des réseaux haute tension, Un intérêt particulier est dédié aux effets négatifs du champ magnétique engendré par les réseaux électriques à haute tension sur la santé humaine. Pour diminuer les effets négatives, on minimise les valeurs du champ magnétique au voisinage des lignes par l'optimisation de leur structure et leurs conditions d'exploitation. La recommandation du IEEE estime que les valeurs de l'induction magnétique sont limitées à  $100 \mu T$  pour l'exposition publique et à  $500 \mu T$  pour l'exposition professionnelle.

Dans ce travail on présente un procédé d'analyse en deux dimensions du champ magnétique engendré par une ligne de transport d'énergie aérienne.

Le champ magnétique produit par une ligne électrique est étendu vers l'infini. Mais, les valeurs ne sont significatives qu'en voisinage de la ligne. Le domaine où se fait le calcul du champ doit, généralement, être fini pour l'analyse numérique.

### III.2. Induction magnétique créée par un conducteur seul

Le passage d'un courant électrique d'intensité ' $i$ ', dans un conducteur cylindrique de longueur supposée infinie, crée un champ d'induction magnétique circulaire dont la composante tangentielle à l'extérieur du conducteur est donnée par le théorème d'Ampère :

$$B = \mu_0 i / (2. \pi. r) \quad [T] \quad (\text{III.1})$$

Avec  $\mu_0 = 4. \pi. 10^{-7} \text{ [H/m]}$  est la perméabilité du vide.

La figure III.1 représente « $B = f(r)$ » pour un conducteur plein, parcouru par le courant ' $i$ '.

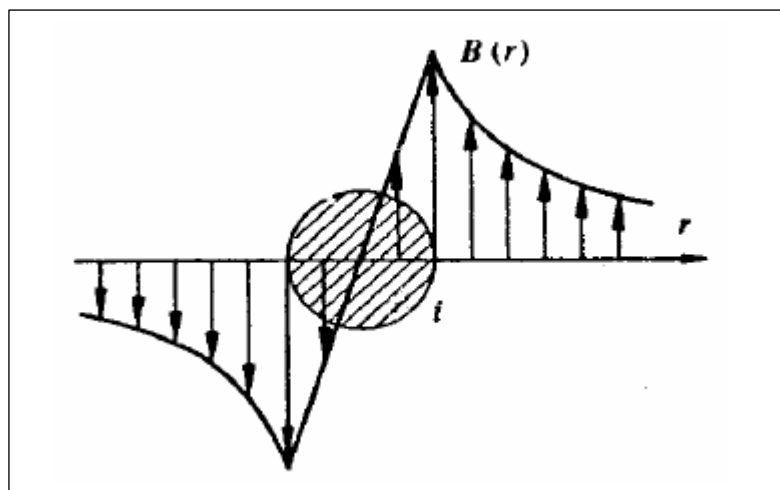


Figure III.1 : Composante tangentielle de l'induction, conducteur plein [4].

Lorsqu'il y a plusieurs conducteurs, l'induction résultante est la somme des vecteurs induction produits par chaque conducteur.

### III.3. Flux embrassé par deux conducteurs dans un système à n conducteurs

Nous ferons l'hypothèse que la somme des courants est nulle. Nous pouvons choisir l'un des conducteurs comme conducteur de retour (c'est le cas pour le sol qui sera considéré comme le conducteur n).

$$i_n = -(i_1 + i_2 + \dots + i_{n-1}) \quad [A] \quad (III.2)$$

Nous obtenons, de cette manière, un ensemble de (n-1) dispositions similaires formées par des paires de conducteurs '1' et 'n', et '2' et 'n', ..., 'n-1' et 'n'. Nous pouvons donc nous limiter à l'étude d'une seule paire formée par un conducteur 'aller' et le conducteur de retour 'n', les phénomènes restant semblables pour les autres paires.

Par exemple, pour la paire '3' et 'n' (figure III.2), le flux élémentaire  $\Delta\phi_{3n}$  (provenant de chaque conducteur) embrassé par la boucle formée par ces deux conducteurs sur la longueur  $\Delta x$  est :

$$\Delta\phi_{3n} = \Delta\phi_{3n,1} + \Delta\phi_{3n,2} + \Delta\phi_{3n,3} + \Delta\phi_{3n,n} \quad [Wb] \quad (III.3)$$

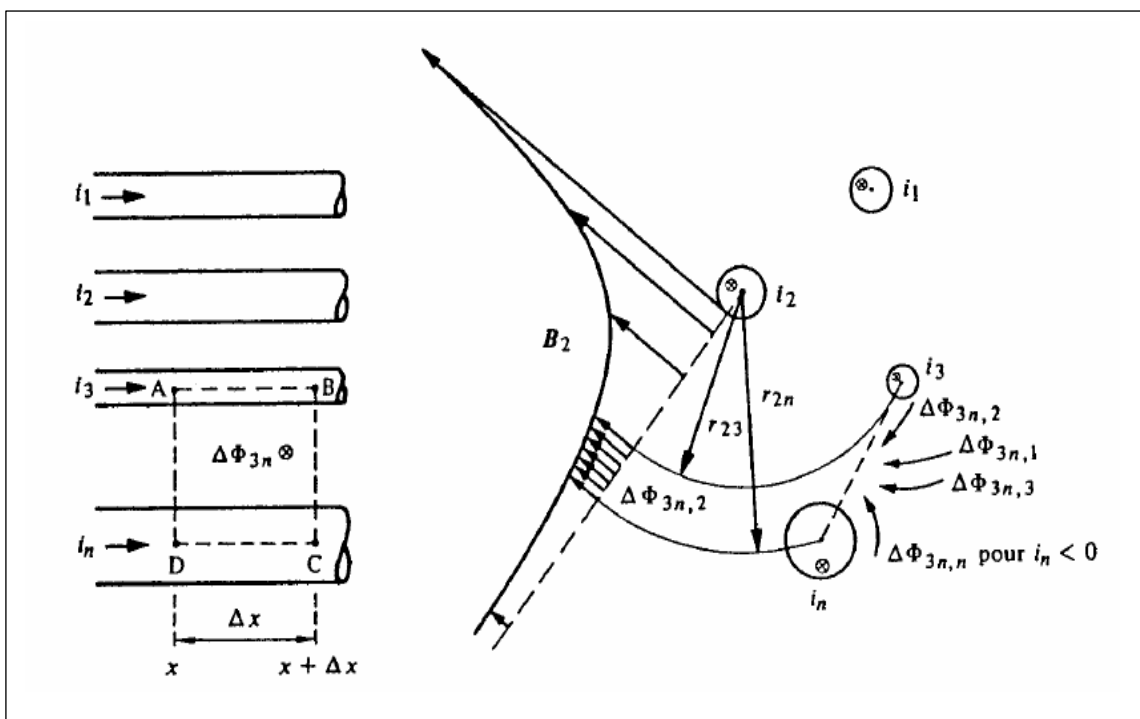


Figure III.2 : Flux élémentaire embrassé par les conducteurs 3 et n sur  $\Delta x$ . [4]

Où  $\Delta\phi_{3n}$  est le flux d'induction embrassé par un rectangle ABCDA, dont les côtés A-B et C-D sont situés, respectivement, dans les conducteurs '3' et 'n' à des endroits quelconques à l'intérieur de ces derniers.

La relation entre le flux embrassé et l'induction est donnée par le théorème de Gauss :

$$\phi = \int_S \vec{B} \cdot \vec{dS} \quad [Wb] \quad (\text{III.4})$$

En précisant les limites d'intégration dans les expressions des  $\Delta\phi_{3n,k}$  et en tenant compte de l'équation (III.1), nous trouvons :

$$\Delta\phi_{3n,1} = \Delta x \int_{r_{13}}^{r_{1n}} \mu_0 \frac{i_1}{2\pi r} dr = \Delta x \frac{\mu_0}{2\pi} \ln\left(\frac{r_{1n}}{r_{13}}\right) i_1 \quad [Wb] \quad (\text{III.5})$$

$$\Delta\phi_{3n,3} = \Delta x \int_{r_{33}}^{r_{3n}} \mu_0 \frac{i_3}{2\pi r} dr = \Delta x \frac{\mu_0}{2\pi} \ln\left(\frac{r_{3n}}{r_{33}}\right) i_3 \quad [Wb] \quad (\text{III.6})$$

$$\Delta\phi_{3n,2} = \Delta x \int_{r_{23}}^{r_{2n}} \mu_0 \frac{i_2}{2\pi r} dr = \Delta x \frac{\mu_0}{2\pi} \ln\left(\frac{r_{2n}}{r_{23}}\right) i_2 \quad [Wb] \quad (\text{III.7})$$

### III.4. Détermination de l'inductance des lignes

#### III.4.1. Pour un seul conducteur

On détermine l'inductance L d'un conducteur de rayon r qui se trouve à une distance H par rapport à la terre par l'expression suivante :

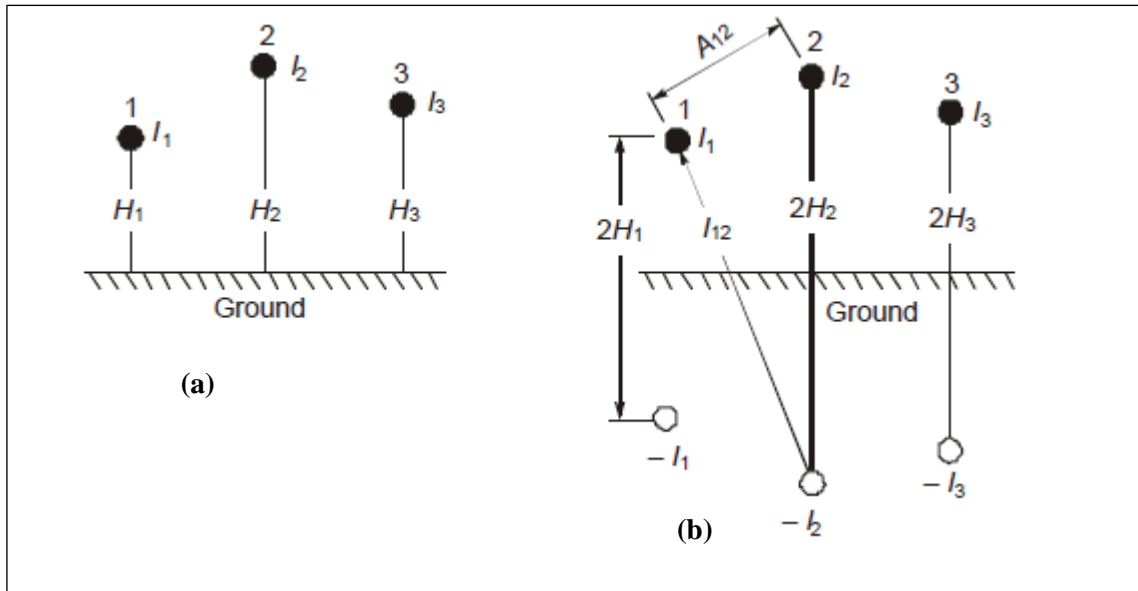
$$L = 0.2 \ln(2H/r) \quad (\text{III.8})$$

Pour un conducteur en faisceau, on remplace r par  $r_{\text{éq}}$  (rayon moyen géométrique).

On appelle le facteur  $P = \ln(2H/r)$  coefficient de Maxwell.

#### III.4.2. Pour plusieurs conducteurs

Si on a plusieurs conducteurs qui se trouvent à des distances différentes au-dessus de la terre. Chaque conducteur est traversé par un courant I. On représente les images de ces conducteurs par rapport à la terre, donc seront traversés par des courants par les mêmes courants mais dans la direction opposite, comme le montre la figure III.3.



**Figure III.3:** Plusieurs conducteurs aériens (a) avec leurs images par rapport à la terre (b). [1]

Le flux magnétique d'un conducteur est égal à la somme des flux créés par le courant qui traverse ce conducteur et les courants qui traversent les autres conducteurs. Pour le conducteur 1 par exemple, le courant  $I_1$  qui traverse ce conducteur crée le flux  $\psi_{11}$  :

$$\psi_{11} = (\mu_0/2\pi)I_1 \ln(2H/r)$$

Pour un conducteur en faisceau, on remplace  $r$  par  $r_{\text{éq}}$  (rayon moyen géométrique).

Si on tient compte que le courant  $I_2$  qui traverse le conducteur 2, alors ce conducteur et son image créent au conducteur 1 le flux  $\psi_{12}$  tel que :

$$\psi_{12} = \frac{\mu_0 \mu_r}{2\pi} I_2 \ln(I_{12}/A_{12}) \quad (\text{III.9})$$

Avec  $\mu_r = 1$ , la perméabilité relative de l'air

Le facteur  $P_{12} = \ln(I_{12}/A_{12})$  est appelé coefficient mutuelle de Maxwell entre les conducteurs 1 et 2.

Dans le cas général, les coefficients mutuelles de Maxwell entre les conducteurs  $i$  et  $j$  sont donnés pour

$$i, j = 1, 2, \dots, n.$$

$$P_{ij} = \ln(I_{ij}/A_{ij}), i \neq j \quad (\text{III.10})$$



Alors, pour un système à  $n$  conducteurs (phases), représenté par la figure III.3, la matrice du flux est donnée par :

$$[\psi]_n = \frac{\mu_0 \mu_r}{2\pi} [P]_{nn} [I]_n = [L]_{nn} [I]_n \quad (\text{III.11})$$

Avec:

$$[\psi]_n = [\psi_1, \psi_2, \dots, \psi_n]_t,$$

$$[I]_n = [I_1, I_2, \dots, I_n]_t,$$

Les coefficients de Maxwell sont déterminés comme suit :

$$P_{ii} = \ln(2H/r_{\text{éq}}) \text{ et } P_{ij} = P_{ji} = \ln(I_{ij}/A_{ij}), i \neq j \quad (\text{III.12})$$

La diagonale de la matrice  $[L]_{nn}$  représente les inductances simples, les autres éléments de la matrice représentent les inductances mutuelles.

### III.5. Champ magnétique d'une ligne triphasée pour la configuration horizontale

En se basant sur la méthode des images de Maxwell, on calcule le champ magnétique créée à n'importe quel point de l'espace au voisinage de la ligne. Dans la plupart des applications, l'intensité du champ magnétique au niveau de la terre est la valeur importante calculée.

La figure III.4 (a) représente les trois phases d'une ligne haute tension avec leurs images par rapport à la terre,  $h$  est la hauteur de chaque phase,  $s$  est la distance entre phases, on place l'axe des coordonnées  $x$  et  $y$  sur la terre dont l'origine se trouve au centre de la ligne.

Le passage d'un courant  $I_c$  (le sens du courant par exemple sortant de la page) à travers la phase C crée au point  $P(x,y)$ , comme le montre la figure III.4 (b), un champ magnétique dont l'amplitude est calculé comme suit :

$$H_c = I_c / 2\pi D_c \quad (\text{III.13})$$

$$D_c = \sqrt{(x-s)^2 + (y-h)^2} \quad (\text{III.14})$$

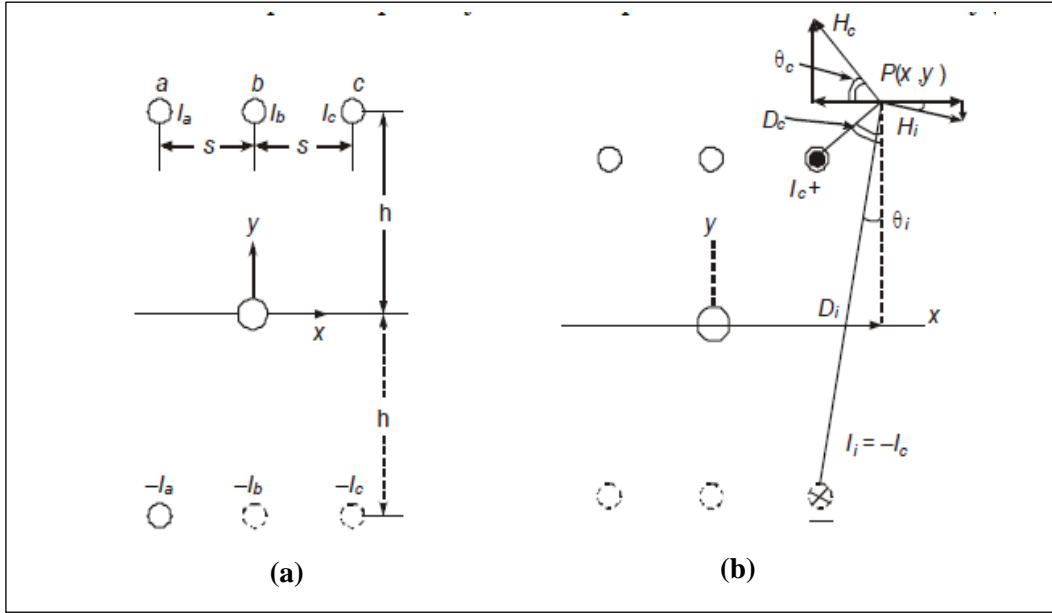


Figure III.4: Méthode des images de Maxwell. [1]

Le vecteur du champ magnétique à deux composantes : horizontale  $H_{ch}$  et verticale  $H_{cv}$  données comme suit :

Pour la composante horizontale :

$$H_{ch} = H_c \cos \theta_c = -\frac{I_c}{2\pi} \frac{1}{D_c} \frac{y-h}{D_c} = -\frac{I_c}{2\pi} \frac{y-h}{(x-s)^2 + (y-h)^2} \quad (\text{III.15})$$

Pour la composante verticale :

$$H_{cv} = H_c \sin \theta_c = \frac{I_c}{2\pi} \frac{1}{D_c} \frac{x-s}{D_c} = \frac{I_c}{2\pi} \frac{x-s}{(x-s)^2 + (y-h)^2} \quad (\text{III.16})$$

Pour l'image de la phase C, le courant  $I_c$  (dont le sens est l'inverse à celui de la phase C, donc entrant à la page), alors ce courant crée au point P le champ  $H_i$  (Figure III.4.b).

$$H_i = \frac{I_c}{2\pi} \frac{1}{D_i}, \text{ avec } D_i = \sqrt{(x-s)^2 + (y+h)^2} \quad (\text{III.17})$$

De la même manière, la composante horizontale et verticale de  $H_i$  sont :

Pour la composante horizontale :

$$H_{ih} = H_i \cos \theta_i = \frac{I_c}{2\pi} \frac{1}{D_i} \frac{y+h}{D_i} = \frac{I_c}{2\pi} \frac{y+h}{(x-s)^2 + (y+h)^2} \quad (\text{III.18})$$

Pour la composante verticale :

$$H_{vh} = H_i \sin \theta_i = -\frac{I_c}{2\pi} \frac{1}{D_i} \frac{x-s}{D_i} = -\frac{I_c}{2\pi} \frac{x-s}{(x-s)^2 + (y+h)^2} \quad (\text{III.19})$$

D'après la figure III.4.b, on voit que les composantes horizontale et verticale de  $H_i$ , sont dans la direction opposée de celles de  $H_c$ . Donc, en conclu que la composante horizontale et verticale du champ totale  $H$  au point P due au courant  $I_c$  et de son image  $I_i = -I_c$  seront :

Pour la composante horizontale :

$$H_h = H_c \cos \theta_c + H_i \cos \theta_i = \frac{I_c}{2\pi} \left[ \frac{y+h}{(x-s)^2 + (y+h)^2} - \frac{y-h}{(x-s)^2 + (y+h)^2} \right] \quad (A/m) \quad (\text{III.20})$$

Pour la composante verticale :

$$H_v = H_c \sin \theta_c + H_i \sin \theta_i = \frac{I_c}{2\pi} \left[ \frac{x-s}{(x-s)^2 + (y+h)^2} - \frac{x-s}{(x-s)^2 + (y+h)^2} \right] \quad (A/m) \quad (\text{III.21})$$

La densité de flux correspondante pour chaque composante sera :

$$B_h = \mu_0 H_h, \text{ et } B_v = \mu_0 H_v \quad (T) \quad (\text{III.22})$$

Avec  $\mu_0 = 4. \pi 10^{-7} \text{ (H/m)}$ .

Jusqu'à maintenant on a déterminé le champ magnétique au point P due au courant  $I_c$  et de son image  $I_i = -I_c$ , de la même façon on peut déterminer le champ magnétique créé par les autres courants  $I_a$  et  $I_b$  ainsi que leurs images.

Soit par exemple un système triphasé équilibré dont l'expression complexe des courant de phase est donnée comme suit :

$$I_a = I \angle 0^\circ \text{ A}, \quad I_b = I \angle (-120^\circ) \text{ A} \text{ et } I_c = I \angle (+120^\circ) \text{ A}.$$

Les composantes horizontale et verticale du champ magnétique totale  $H_t$  créé au point P par ces trois courants seront :

Pour la composante horizontale :

$$\begin{aligned} H_{ht} = & \frac{I_a}{2\pi} \left[ \frac{y+h}{(x+s)^2 + (y+h)^2} - \frac{y-h}{(x+s)^2 + (y-h)^2} \right] \\ & + \frac{I_b}{2\pi} \left[ \frac{y+h}{x^2 + (y+h)^2} - \frac{y-h}{x^2 + (y-h)^2} \right] \\ & + \frac{I_c}{2\pi} \left[ \frac{y+h}{(x-s)^2 + (y+h)^2} - \frac{y-h}{(x-s)^2 + (y-h)^2} \right], \quad (A/m) \end{aligned} \quad (\text{III.23})$$

Pour la composante verticale :

$$\begin{aligned}
 H_{vt} = & \frac{I_a}{2\pi} \left[ \frac{x+s}{(x+s)^2 + (y-h)^2} - \frac{x+s}{(x+s)^2 + (y+h)^2} \right] \\
 & + \frac{I_b}{2\pi} \left[ \frac{x}{x^2 + (y-h)^2} - \frac{x}{x^2 + (y+h)^2} \right] \\
 & + \frac{I_c}{2\pi} \left[ \frac{x-s}{(x-s)^2 + (y-h)^2} - \frac{x-s}{(x-s)^2 + (y+h)^2} \right], (A/m)
 \end{aligned} \tag{III.24}$$

Dans la cas particulier le champ magnétique au niveau de la terre et à une distance  $x$  de l'origine  $O$  des axes (du centre de la ligne) sera calculé comme suit en prenons  $y = 0$  :

$$H_{ht} = \frac{I_a}{2\pi} \frac{2h}{(x+s)^2 + h^2} + \frac{I_b}{2\pi} \frac{2h}{x^2 + h^2} + \frac{I_c}{2\pi} \frac{2h}{(x-s)^2 + h^2} \tag{III.25}$$

$$H_{vt} = \frac{I_a}{2\pi} \times 0 + \frac{I_b}{2\pi} \times 0 + \frac{I_c}{2\pi} \times 0 = 0 \tag{III.26}$$

### III.6. Détermination des modules des champs $H_{ht}$ , $H_{vt}$ , $B_{ht}$ et $B_{vt}$

Pour un système triphasé l'expression des courants des trois phases dans la forme polaire est la suivante :

$$\begin{aligned}
 I_a = I \angle 0^\circ = I(1 + j0), \quad I_b = I \angle (-120^\circ) = I(-0.5 - j0.866) \text{ et } I_c = I \angle (+120^\circ) \\
 = I(-0.5 + j0.866).
 \end{aligned}$$

Donc à partir des formules (III.24) et (III.25), on peut exprimer les facteurs géométriques suivantes :

Pour la composante horizontale :

$$K_a = \frac{y+h}{(x+s)^2 + (y+h)^2} - \frac{y-h}{(x+s)^2 + (y-h)^2} \tag{III.27}$$

$$K_b = \frac{y+h}{x^2 + (y+h)^2} - \frac{y-h}{x^2 + (y-h)^2} \tag{III.28}$$

$$K_c = \frac{y+h}{(x-s)^2 + (y+h)^2} - \frac{y-h}{(x-s)^2 + (y-h)^2} \tag{III.29}$$

Pour la composante verticale :

$$J_a = \frac{x+s}{(x+s)^2 + (y-h)^2} - \frac{x+s}{(x+s)^2 + (y+h)^2} \tag{III.30}$$

$$J_b = \frac{x}{x^2+(y-h)^2} - \frac{x}{x^2+(y+h)^2} \quad (\text{III.31})$$

$$J_c = \frac{x-s}{(x-s)^2+(y-h)^2} - \frac{x-s}{(x-s)^2+(y+h)^2} \quad (\text{III.32})$$

Donc, on peut écrire les formules (III.24) et (III.25) dans la forme polaire comme suit :

$$\begin{aligned} H_{ht} &= \frac{I}{2\pi} [K_a + K_b(-0.5 - j0.866) + K_c(-0.5 + j0.866)] \\ &= \frac{I}{2\pi} [\{K_a - 0.5(K_b + K_c)\} + j0.866(K_c - K_b)] \end{aligned} \quad (\text{III.33})$$

Ce qui donne le module de cette composante :

$$\begin{aligned} |H_{ht}| &= \frac{I}{2\pi} [\{K_a - 0.5(K_b + K_c)\}^2 + 0.75(K_c - K_b)^2]^{1/2} \\ &= \frac{I}{2\pi} (K_a^2 + K_b^2 + K_c^2 - K_a K_b - K_b K_c - K_c K_a)^{1/2} \quad (\text{A/m}) \end{aligned} \quad (\text{III.34})$$

De même :

$$\begin{aligned} H_{vt} &= \frac{I}{2\pi} [J_a + J_b(-0.5 - j0.866) + J_c(-0.5 + j0.866)] \\ &= \frac{I}{2\pi} [\{J_a - 0.5(J_b + J_c)\} + j0.866(J_c - J_b)] \end{aligned}$$

Ce qui donne pour le module :

$$|H_{vt}| = \frac{I}{2\pi} (J_a^2 + J_b^2 + J_c^2 - J_a J_b - J_b J_c - J_c J_a)^{1/2} \quad (\text{A/m}) \quad (\text{III.35})$$

Enfin les deux composantes de l'induction magnétique seront :

Pour la composante horizontale :

$$|B_{ht}| = \mu_0 |H_{ht}| \quad (\text{T}) \quad (\text{III.36})$$

Pour la composante verticale :

$$|B_{vt}| = \mu_0 |H_{vt}| \quad (\text{T}) \quad (\text{III.37})$$

### III.7. Conclusion

Dans ce chapitre un code de calcul du champ magnétique en deux dimensions a été accompli, utile pour la quantification du champ au niveau du sol.

Avec la méthode des images, on a pu déterminer les composantes verticale et horizontale du champ magnétique  $H$  et de calculer ensuite les valeurs correspondantes de l'induction magnétique  $B$ , créées par une ligne triphasée THT à un point de l'espace.

D'après les expressions obtenues, on voit que le champ magnétique est proportionnel au courant de phase, d'autres remarques seront faites dans le chapitre suivant.

# CHAPITRE 4

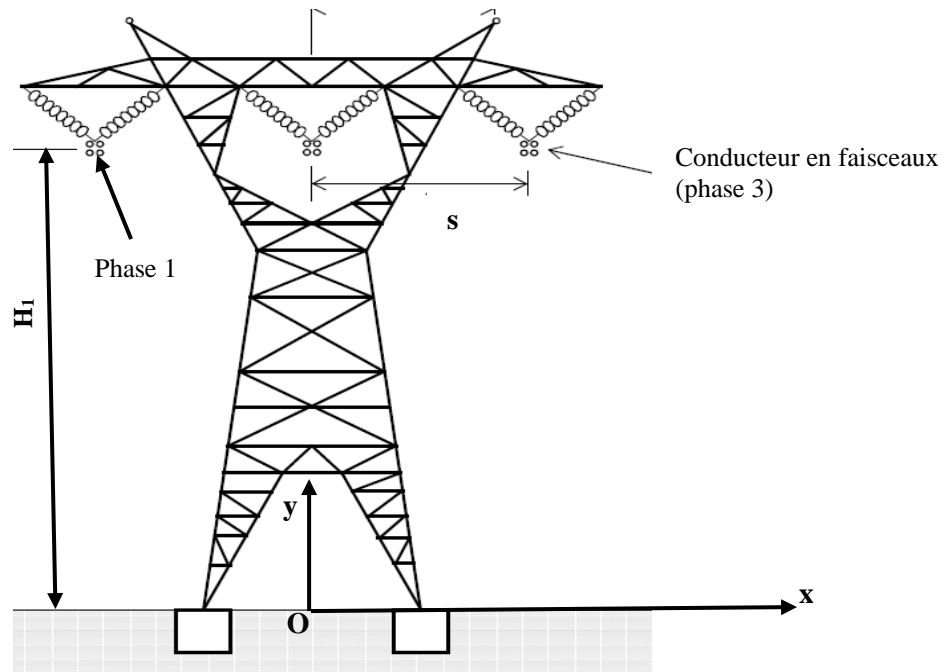
**Application sur des lignes THT**

## IV.1. Calcul du champ électrique des lignes THT

### IV.1.1. Données des lignes à calculer

La première partie de ce chapitre est destinée au calcul de l'intensité du champ électrique  $E$  générée par les lignes THT de transport de l'énergie électrique.

La configuration des lignes est horizontale, comme le montre la figure IV.1.



**Figure IV.1 :** Type de Pylône utilisé pour les lignes THT à configuration horizontale.

Les données des lignes à calculer sont regroupées dans le tableau IV.1 suivant :

**Tableau IV.1 :** Données des lignes à calculer [1].

Tension des lignes (KV) (phase-phase)	Hauteur H(m) des lignes	Distance s(m) entre phases	Nombre N de conducteur par phase	Diamètre d(cm) du conducteur de faisceau	Distance B(cm) entre deux conducteurs adjacents du faisceau
400	13	12	2	3.18	45.72
	15				
765	18	15	4	3.5	45.72
1050	21	18	6	3	60



### IV.1.2. Étapes de calcul

Les étapes de calcul de l'intensité du champ électrique pour chaque type de ligne sont les suivantes :

**Etape 01 :** Détermination de la matrice  $[P]$  des coefficients de potentiel de maxwell, avec

$$P_{ii} = \ln\left(\frac{2H}{r_{\acute{e}q}}\right), P_{ij} = \ln\left(\frac{I_{ij}}{A_{ij}}\right), \quad r_{\acute{e}q} = R(N \cdot r/R)^{1/N}, R = \frac{B}{2 \cdot \sin(\pi/N)}$$

Par exemple pour la première ligne de 400 KV, on a  $N = 2 \Rightarrow R = \frac{B}{2} = \frac{45.72}{2} = 22.86 \text{ cm}$ .

**Etape 02 :** Détermination des coordonnées des trois phases par rapport à l'axe Oxy placé sur la terre au centre de la ligne (Figure IV.1), ce qui donne pour la première ligne les coordonnées suivantes :

$$x_1 = -12, x_2 = 0, x_3 = 12, y_1 = y_2 = y_3 = 13 \text{ et } y = 0$$

$y = 0$  Parce que on veut calculer le champ à la terre.

**Etape 03 :** au point A(x,0) le long de l'axe (Ox), on détermine les facteurs  $K_i$  de la formule (II.30) comme suit pour la première ligne :

$$K_1 = \frac{-26}{[(x+12)^2 + 169]}$$

$$K_2 = \frac{-26}{x^2 + 169}$$

$$K_3 = \frac{-26}{[(x-12)^2 + 169]}$$

**Etape 04 :** On détermine les facteurs  $K_{vi}$  :

$$K_{v1} = K_1 M_{11} + K_2 M_{21} + K_3 M_{31}$$

$$K_{v1} = \frac{-4.493}{(x+12)^2 + 169} + \frac{0.666}{x^2 + 169} + \frac{0.208}{(x-12)^2 + 169}$$

$$K_{v2} = K_1 M_{12} + K_2 M_{22} + K_3 M_{32}$$

$$K_{v2} = \frac{0.666}{(x+12)^2 + 169} - \frac{4.58}{x^2 + 169} + \frac{0.666}{(x-12)^2 + 169}$$

$$K_{v3} = K_1 M_{13} + K_2 M_{23} + K_3 M_{33}$$

$$K_{v3} = \frac{0.208}{(x+12)^2+169} + \frac{0.666}{x^2+169} - \frac{4.493}{(x-12)^2+169}$$

Etape 05 : On détermine le facteur  $K_v$

$$K_v = (K_{v1}^2 + K_{v2}^2 + K_{v3}^2 - K_{v1}K_{v2} - K_{v2}K_{v3} - K_{v3}K_{v1})^{1/2}$$

Etape 06 : On détermine  $E_v$  par :

$$E_v = K_v \cdot V / \sqrt{3} \quad KV/m$$

### IV.1.3. Résultats de calcul

Avec un programme de calcul écrit en Matlab on a trouvé les résultats suivants :

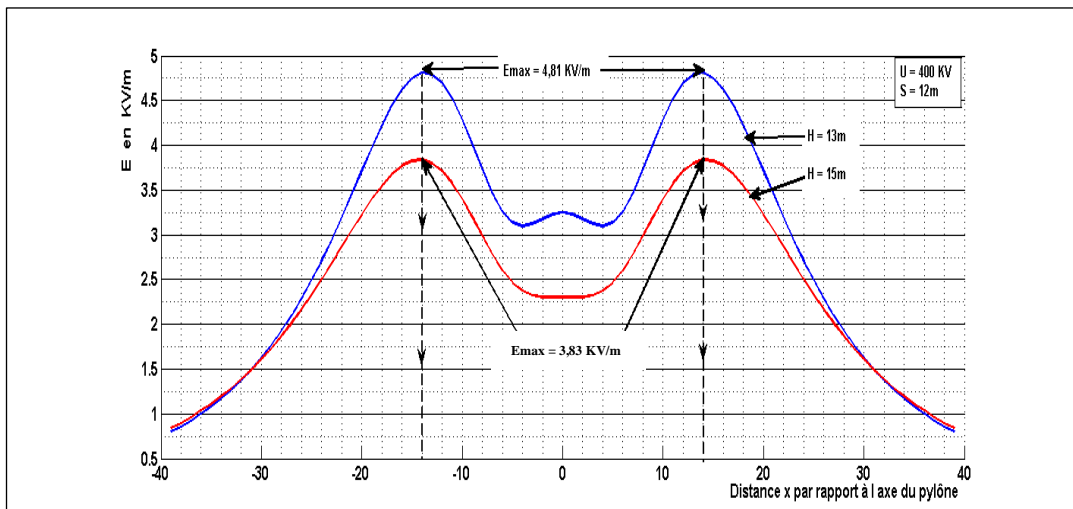


Figure. IV.2 : Intensité du champ électrique générée par une ligne de 400 KV

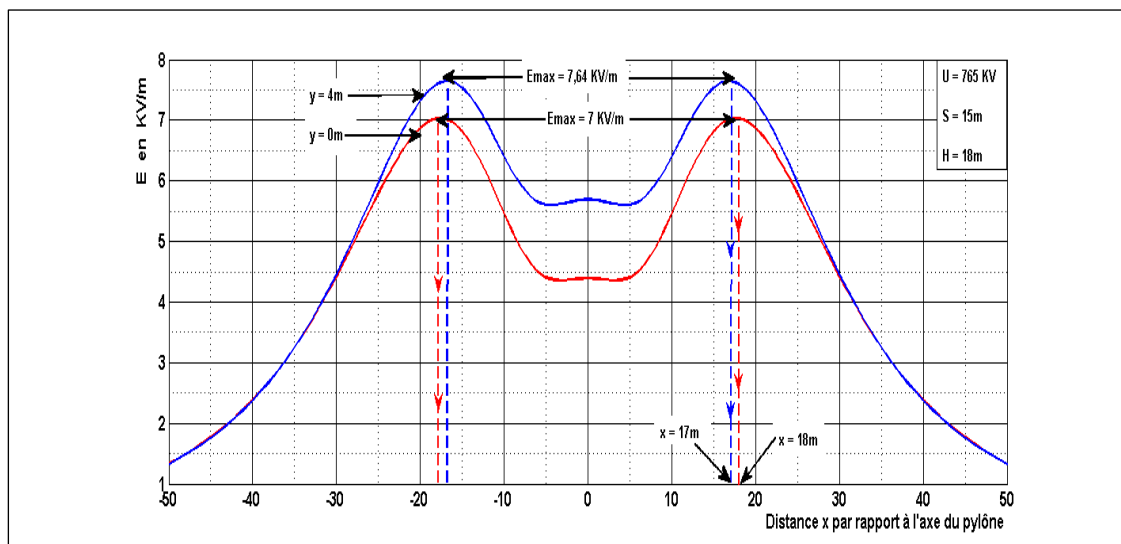


Figure. IV.3 : Intensité du champ électrique générée par une ligne de 765 KV.

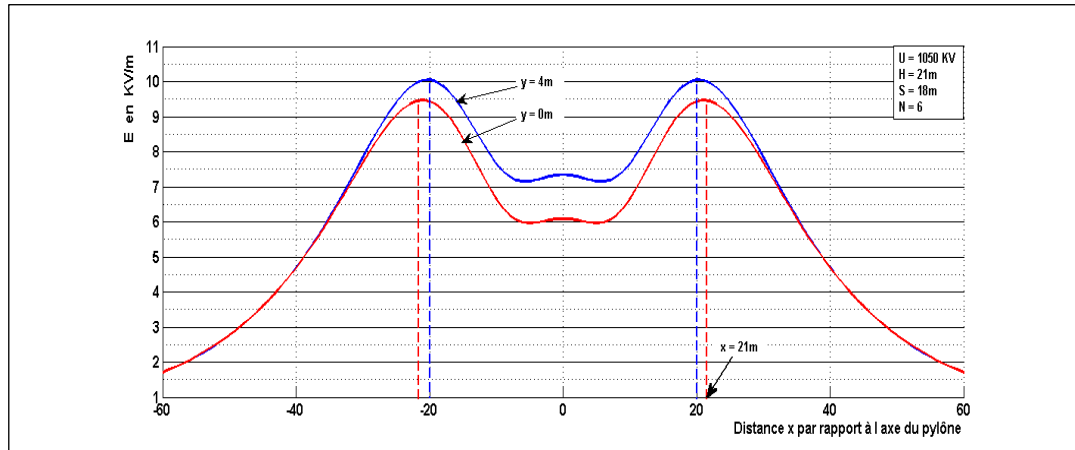


Figure. IV.4 : Intensité du champ électrique générée par une ligne de 1050 KV.

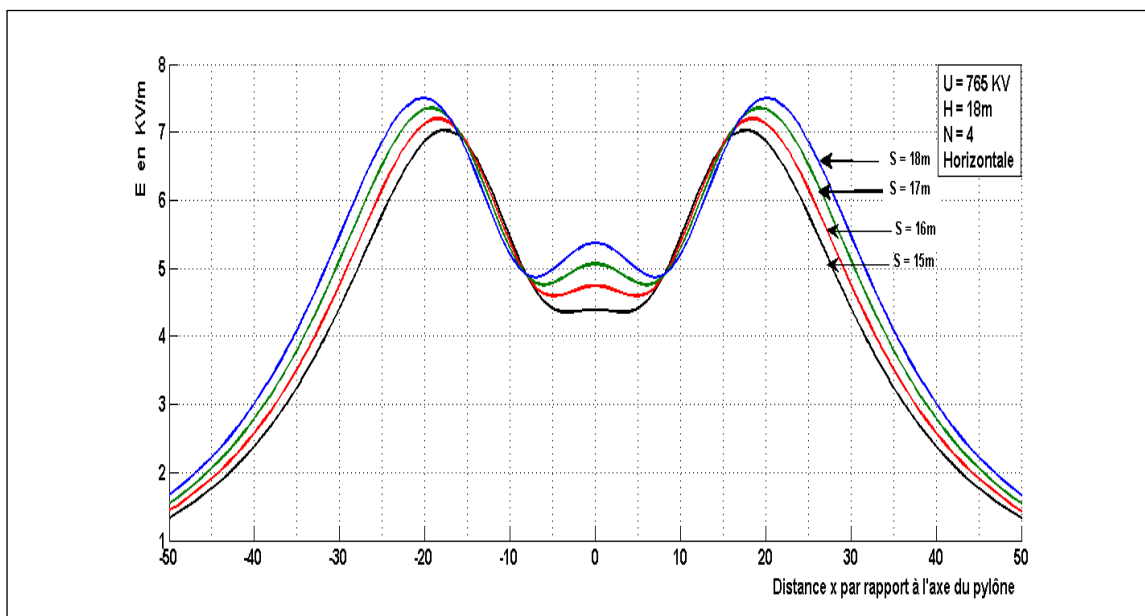


Figure. IV.5 : Influence de la distance S entre phases sur l'intensité du champ électrique.

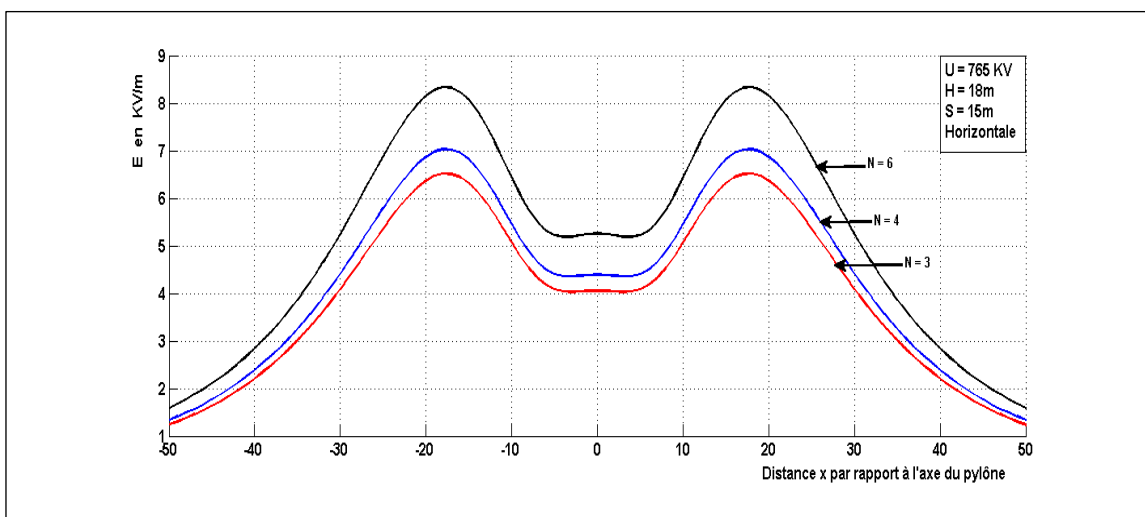
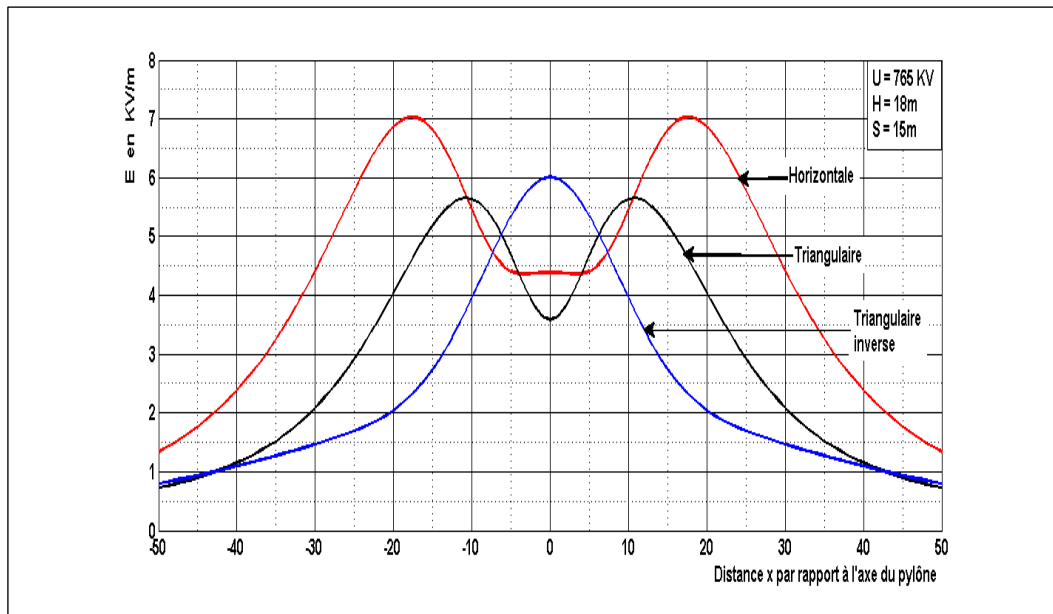


Figure. IV.6 : Influence du nombre de conducteurs N par phase sur l'intensité du champ électrique.



**Figure. IV.7 :** Influence de la disposition des phases sur l'intensité du champ électrique.

#### IV.1.4. Interprétations des résultats :

D'après les courbes des figures IV.1 à 6, l'intensité du champ électrique  $E$  générée par les lignes THT :

- ✓ Augmente avec l'augmentation de la tension.
- ✓ Pour le même niveau de tension, l'intensité du champ électrique calculée au niveau de la terre ( $y=0$ m), pour la disposition horizontale de la ligne varie d'un point à l'autre et que la valeur maximale n'est pas au milieu de la ligne mais à une distance  $x \approx \pm(1 \text{ à } 1,1)H$  (avec  $H$  est la hauteur de la ligne par rapport à la terre), par exemple pour la ligne de 400 KV, la valeur maximale est obtenue (pour  $H= 13$  m) à la distance  $x \approx \pm 1,1H = \pm 14,3$  m, de même pour la ligne de 1050 KV de hauteur  $H= 21$  m, elle est à  $x = \pm 1,0H = \pm 21$  m,
- ✓ L'intensité du champ électrique diminue en éloignant de l'axe de la ligne,
- ✓ L'intensité du champ électrique diminue avec l'augmentation de la hauteur  $H$  de la ligne,
- ✓ L'intensité du champ électrique augmente avec l'augmentation de la distance  $S$  entre les phases (Figure. IV.4),
- ✓ L'intensité du champ électrique augmente avec l'augmentation du nombre de conducteurs  $N$  par phase (Figure. IV.5),
- ✓ L'intensité du champ électrique prend la valeur maximale à l'axe de la ligne dans le cas de la configuration triangle inverse (Figure. IV.6),

- ✓ Pour la configuration horizontale, l'intensité du champ électrique est la plus grande par rapport aux autres configurations (Figure. IV.6).

## IV.2. Calcul du champ magnétique des lignes THT

### IV.2.1. Données des lignes à calculer

Les données des lignes à calculer sont regroupées dans le tableau IV.2 suivant :

**Tableau IV.2 :** Données des lignes pour calculer l'intensité du champ magnétique [1].

Tension des lignes (KV) (phase-phase)	Longueur des lignes (en km)	Courant par phase (en A)	Hauteur H(m) des lignes	Distance S(m) entre phases	Nombre N de conducteur par phase	Diamètre d(cm) du conducteur de faisceau	Distance B(cm) entre deux conducteurs adjacents
<b>400</b>	400	883	15	12	2	3.18	45.72
	600	588					
	800	441					
<b>750</b>	600	1327	18	15	4	3	45.72
	800	995					
	1000	796					

### IV.2.2. Étapes de calcul

Les étapes de calcul de l'intensité du champ magnétique pour chaque type de ligne sont les suivantes :

**Etape 01 :** données de la ligne : hauteur H, distance S entre phases et module du courant de phase.

**Etape 02 :** Détermination des facteurs  $K_i$  du champ magnétique H comme suit :

Pour la composante horizontale :

$$K_a = \frac{y+h}{(x+s)^2 + (y+h)^2} - \frac{y-h}{(x+s)^2 + (y-h)^2}$$

$$K_b = \frac{y+h}{x^2 + (y+h)^2} - \frac{y-h}{x^2 + (y-h)^2}$$

$$K_c = \frac{y+h}{(x-s)^2 + (y+h)^2} - \frac{y-h}{(x-s)^2 + (y-h)^2}$$

Pour la composante verticale :

$$J_a = \frac{x + s}{(x + s)^2 + (y - h)^2} - \frac{x + s}{(x + s)^2 + (y + h)^2}$$

$$J_b = \frac{x}{x^2 + (y - h)^2} - \frac{x}{x^2 + (y + h)^2}$$

$$J_c = \frac{x - s}{(x - s)^2 + (y - h)^2} - \frac{x - s}{(x - s)^2 + (y + h)^2}$$

**Etape 03 :** Détermination des modules des composantes verticale et horizontale de H comme suit :

$$H_{ht} = \frac{I}{2\pi} (K_a^2 + K_b^2 + K_c^2 - K_a K_b - K_b K_c - K_c K_a)^{1/2}$$

$$H_{vt} = \frac{I}{2\pi} (J_a^2 + J_b^2 + J_c^2 - J_a J_b - J_b J_c - J_c J_a)^{1/2}$$

**Etape 04 :** calcul du module de H par la formule suivante :

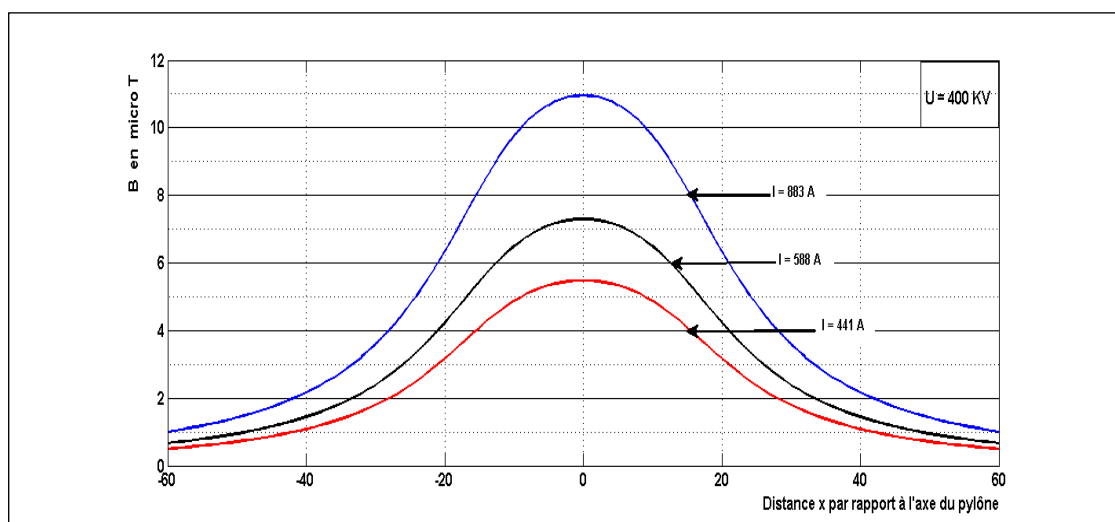
$$H = \sqrt{H_{ht}^2 + H_{vt}^2}$$

**Etape 05 :** Détermination de l'intensité du champ magnétique B par l'expression suivante

$$B_{ht} = \mu_0 \cdot H_{ht} \cdot 10^6 \quad (\text{en } \mu T)$$

### IV.2.3. Résultats de calcul

Avec un programme de calcul écrit en Matlab on a trouvé les résultats suivants :



**Figure. IV.8 :** Intensité du champ magnétique générée par une ligne de 400 KV.

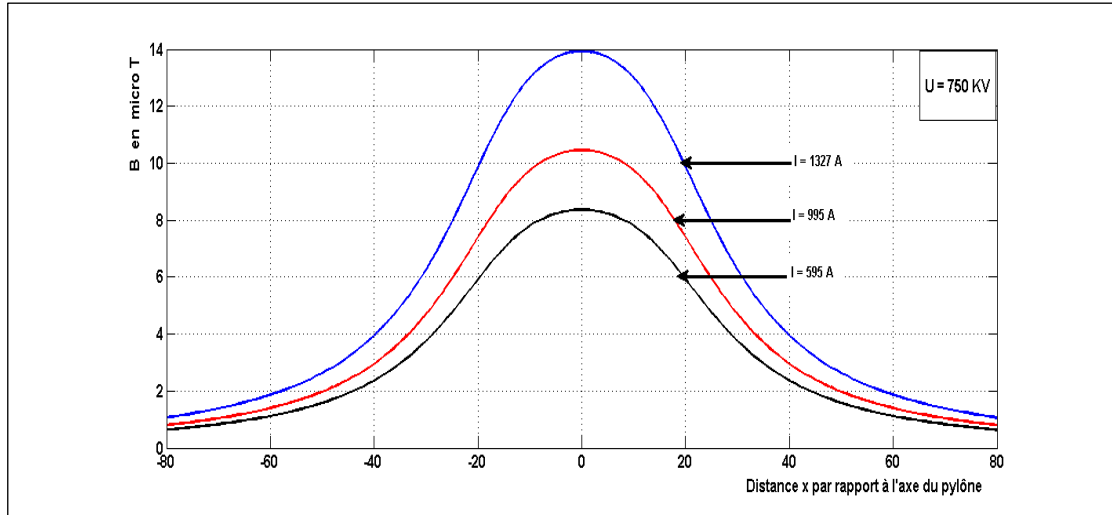


Figure. IV.9 : Intensité du champ magnétique générée par une ligne de 750 KV.

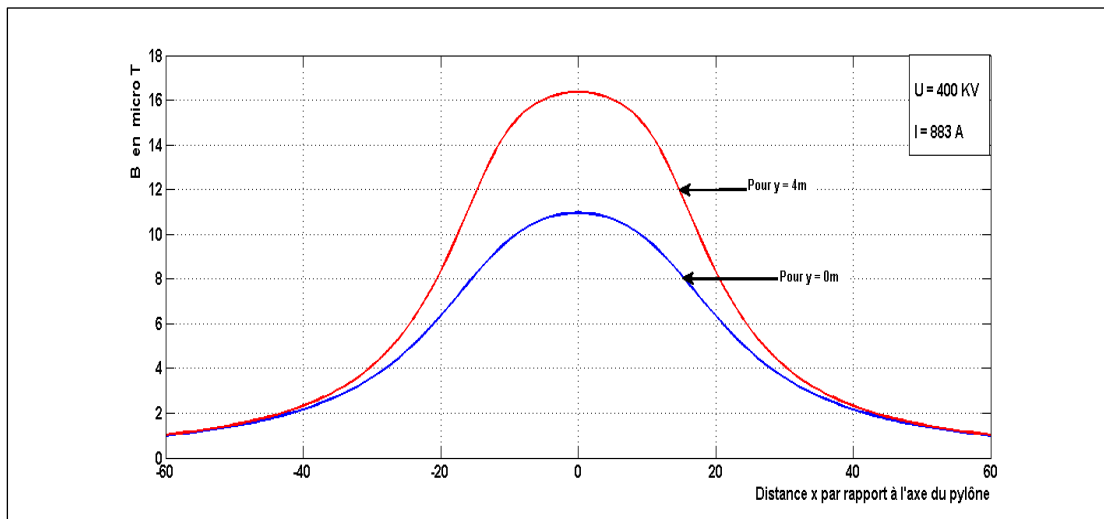


Figure. IV.10 : Influence de la hauteur de la ligne de 400 KV sur l'intensité du champ magnétique générée.

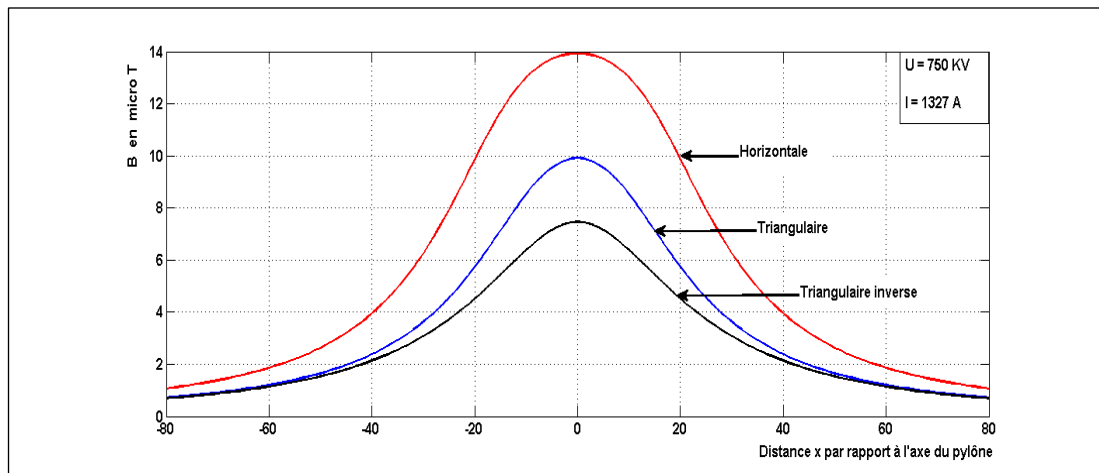


Figure. IV.11 : Influence de la disposition des lignes sur l'intensité du champ magnétique générée.

#### IV.2.4. Interprétations des résultats :

D'après les courbes des figures IV.7 à 10, l'intensité du champ magnétique B générée par les lignes THT :

- ✓ Est proportionnel au courant I qui traverse la ligne, comme le montre la figure IV.7 pour le même niveau de tension de la ligne (400 KV) et si le courant diminue de moitié alors l'intensité du champ magnétique B générée diminue aussi de la moitié,
- ✓ La valeur maximale de l'induction magnétique B se trouve au centre de la ligne,
- ✓ L'intensité du champ magnétique diminue en s'éloignant de l'axe de la ligne.
- ✓ L'intensité du champ magnétique augmente avec la diminution de la hauteur H de la ligne (Figure IV.9),
- ✓ Pour la disposition horizontale l'induction magnétique B est la plus grande par rapport aux autres configurations (Figure IV.10).

### IV.3. Influence du champ électrique élevé sur l'environnement [1]

L'utilisation des lignes THT augmente le risque de danger des champs élevés générés sur l'environnement proche des lignes comme (a) les êtres humains, (b) les animaux, (c) les plantes, (d) les véhicules. Nous discutons ici le danger que représente le champ électrique sur ces cas :

#### IV.3.1. Sur l'être humain

L'effet d'un champ électrique élevé généré par une ligne THT sur les êtres humains a été beaucoup plus étudié que sur tout autre animal ou objet en raison de ses effets graves et choquants qui ont entraîné des pertes en vies humaines.

Il a été vérifié expérimentalement que la limite pour le champ électrique est de 15 kV/m (valeur efficace), pour que les êtres humains subissent un choc éventuel. Alors, les lignes THT doivent être conçues de telle sorte que cette limite ne doit pas dépassée. La distance minimale au-dessous d'une ligne est le facteur déterminant le plus important. À titre d'exemple, aux États-Unis ont sélectionné la valeur de 9 kV/m à 1200 kV pour leur ligne de 1150 kV et pour ce faire ils ont utilisé une distance minimale à mi-portée de 23,2 m.

#### IV.3.2. Sur les animaux

Des expériences réalisées en cages sous des lignes THT ont montré que les pigeons et les poules sont affectés par un champ électrique d'environ 30 kV/m. Ils sont incapables de ramasser du



grain à cause du claquement de leur bec qui a affecté leur croissance. D'autres animaux reçoivent une charge sur leur corps et lorsqu'ils se dirigent vers un abreuvoir pour boire de l'eau, une étincelle s'éclate généralement de leur nez au tuyau ou à l'auge mis à la terre.

### IV.3.3. Sur les plantes

Il a été prouvé par les expériences que jusqu'à une intensité de champ de 20 kV/m les plantes telles que le blé, le riz, la canne à sucre, etc., ne subissent pas de dommages.

Ainsi, on peut dire que la valeur de 20 kV/m générée par une ligne THT peut être considérée comme la limite sûre pour qu'un être humain travaille proche de cette ligne.

### IV.3.4. Sur les voitures

Les véhicules garés sous une ligne THT ou la traversant acquièrent une charge électrostatique si leurs pneus sont en matériau isolant. Si les parkings sont situés sous une ligne THT, la distance minimale de sécurité recommandée est de 20 m pour les lignes de 400 kV par exemple. Les camions nécessiteront un dégagement supplémentaire de 3 m. Le danger réside dans le fait qu'un être humain tente d'ouvrir la porte et de subir un choc.

## IV.4. Influence du champ magnétique élevé sur l'environnement [1]

Les champs magnétiques sont essentiellement des réservoirs d'énergie avec une densité d'énergie de  $e = B^2/2 \cdot \mu_0 \left( J/m^3 \right)$ , où B est en Tesla et  $\mu_0 = 4 \cdot \pi \cdot 10^{-7} H/m$ . Cette énergie est connue pour son influence sur les tissus du corps humain dans les activités quotidiennes. Certains de ces effets sont bénéfiques, tels que l'utilisation médicale pour la guérison des fractures, mais la plupart sont nocifs et posent des risques pour la santé parmi lesquels ont été comptés de nombreux types de cancers. Ces cancers sont : la leucémie ou le cancer du sang, le lymphome qui affaiblit le système immunitaire du corps face aux affections cancéreuses, les troubles nerveux conduisant à des lésions cérébrales telles que la maladie d'Alzheimer, le cancer du sein chez les espèces féminines et masculines, et plusieurs autres conditions dangereuses trop nombreuses pour énumérer ici.

L'étude des risques pour la santé associés aux champs magnétiques à fréquence industrielle (50 et 60 Hz) a acquis une importance mondiale dans les domaines médical, biologique, physique et technique et fait l'objet d'études intensives, y compris le rayonnement de champ magnétique des lignes THT et de distribution. Nous ne décrivons et discuterons que de quelques faits et

mécanismes de base qui donnent lieu à des risques pour la santé associés aux champs magnétiques.

On pense également, mais pas avec certitude, que le champ magnétique à fréquence industrielle induit une tension dans le tissu qui à son tour produit un flux de courant en raison de la conductivité électrique du tissu (environ 0,1 à 0,2 Siemen/mètre). Certains chercheurs échappent à cette théorie car les parois cellulaires sont constituées de protéines qui agissent comme des barrières isolantes au flux de courant. Par conséquent, d'autres mécanismes sont recherchés pour expliquer l'influence des champs magnétiques sur les conditions cancérogènes.

Certaines organisations internationales telles que l'Organisation mondiale de la santé (OMS), l'Association internationale de radioprotection (IRPA) ainsi que d'autres organisations nationales de différents pays ont donné des directives pour limiter le champ magnétique dans les maisons ou dans des professions telles que les travailleurs des lignes THT. Dans les maisons où vivent des enfants et des adultes et où le câblage électrique transporte du courant à fréquence industrielle, le champ magnétique résultant continuellement a été soupçonné de provoquer des conditions cancéreuses chez les occupants. Cette observation a été publiée dans la littérature médicale, biologique et électrique pour la première fois en Amérique du Nord en 1979 par deux scientifiques de Denver City, Colorado State, USA. Ils s'appellent Nancy Wertheimer et Edward Leeper. Avant cette date en 1966, deux scientifiques russes avaient publié leur rapport sur leurs découvertes selon lesquelles les électriciens travaillant avec des lignes de distribution électrique - hommes et femmes - avaient un cancer du sein. Ils soupçonnent le champ magnétique des lignes conductrices de courant d'être la cause principale et conseillent au gouvernement de limiter l'exposition des travailleurs au champ magnétique.

Les directives russes qui en résultent sont les suivantes :

**Tableau IV.3 :** Limites d'expositions au champ magnétique

<b>Durée d'exposition au champ B (en h)</b>	1	2	3	4	5	6	7	8
<b>Valeur limite du champ B (en Gauss)</b>	754	616	503	402	314	251	201	176

Sachant que  $1\text{Gauss} = 10^{-4}\text{ T}$ .

Depuis lors, de nombreuses organisations internationales et nationales ont suggéré les mêmes limites.

C'est ce qu'on appelle un « risque professionnel ».

Pour le grand public, l'exposition est d'environ 1 à 2 heures par jour dans les lieux publics où les lignes de distribution à proximité peuvent donner lieu à une exposition aux champs magnétiques. En outre, dans de nombreux pays, les écoles et les centres commerciaux sont situés à proximité des lignes de transport à haute tension et ont été soupçonnés d'être à l'origine de maladies cancéreuses chez les écoliers et les employés des magasins. Il existe de nombreux exemples de ce type de champs magnétiques à fréquence industrielle associés, avec d'autres causes, à des circonstances produisant le cancer.

Les directives de l'OMS et de l'IRPA recommandent que pour les travailleurs des lignes électriques, une densité de courant de  $5\text{mA/m}^2$  ne devrait pas être dépassée sur la surface du corps. Pour le grand public, la limite de densité de courant sur le corps est de  $1\text{mA/m}^2$ . Car à  $1\text{mA/m}^2$ , il n'y a pas d'apparition de défaut de santé visible, tandis qu'à  $5\text{mA/m}^2$ , il y a juste un risque de défaut mais les travailleurs sont en général protégés par un uniforme approprié. Ainsi, les limites de l'intensité du champ magnétique sont d'environ **5 Gauss (500  $\mu\text{T}$ ) pour les électriciens et de 1 Gauss (100  $\mu\text{T}$ ) pour le grand public.**

## IV.5. Conclusion

Dans ce chapitre on a fait une application des calculs présentés aux chapitres II et III pour le calcul de l'intensité des champs électrique E et magnétique B générés par des lignes THT de transport de l'énergie électrique, pour cela avec des programmes écrits en Matlab, on a tracé plusieurs courbes pour différentes situations.

Aussi dans ce chapitre on a présenté les effets de ces champs sur l'environnement en générale qui entoure ces lignes, et en particulier sur l'être humain.

# Conclusion Générale

## Conclusion générale

La connaissance de la valeur de l'intensité des champs électrique E et magnétique B générés 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 simple (méthode des images) pour la détermination de l'intensité de ces deux champs, pour cela on a trouvé que :

- ✓ La valeur de l'intensité du champ électrique E est :
  - a- Proportionnel à la tension du système ;
  - b- Inversement proportionnel à la hauteur de la ligne ;
  - c- Diminue en s'éloignant de l'axe de la ligne ;
  - d- La valeur maximale n'est pas à l'axe de ligne mais au-delà d'une distance  $x = (1 \text{ à } 1,1).H$ , avec H est la hauteur de la ligne.
  
- ✓ La valeur de l'induction magnétique B est :
  - a- Proportionnel au courant de charge par phase ;
  - b- Inversement proportionnel à la hauteur de la ligne ;
  - c- Diminue en s'éloignant de l'axe de la ligne ;
  - d- La valeur maximale de B est obtenue sous l'axe de la ligne.

En ce qui concerne les inconvénients de ces champs sur l'environnement, beaucoup de recherches ont montré que la valeur limite du champ électrique E est de 15 KV/m pour les êtres humains et de 20 KV/m pour les plantes et les animaux.

Pour le champ magnétique B, une valeur minimale de  $100 \mu T$  pour le grand public et de  $500 \mu T$  pour les professionnels.

# Références Bibliographiques

## Bibliographie

### Ouvrages :

- [1] R.D. BEGAMUDRE, “Extra High Voltage AC Transmission Engineering”, New Age International Publishers - 3<sup>ème</sup> édition, 2006.
- [2] Khalil Denno, “High Voltage Engineering in Power systems”, CRC Press, 2018.
- [3] SAADAT Hadi, “Power System Analysis” McGraw-Hill College, 1998.
- [4] LILIEEN Jean-Louis, ”Transport et Distribution de l’Energie Electrique”, Manuel de travaux pratiques, Faculté des Sciences Appliquées, Université de Liège, juin 2013.

### Mémoires et thèses :

- [5] MEHDI Hichem, “ Etude des problèmes de compatibilité électromagnétique liés au passage en 400 KV des lignes de transport d’énergie électrique”, Mémoire de Magister, Université des Sciences et de la Technologie d’Oran.
- [6] DAFRI Mourad, « Modélisation Expérimentale et théorique des champs électromagnétiques rayonnés par les lignes électriques haute tension », Mémoire de Master, Université Badji Mokhtar – Annaba, juin 2016.