



**République Algérienne Démocratique et
Populaire**

**Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la
Recherche Scientifique**

Université Amar Thelidji- Laghouat

FACULTE: Technologie

DEPARTEMENT : Electrotechnique



MEMOIRE DE MASTER

Présenté par : HADJ BELKACEMI Mohammed

OKBAOUI Sida Amar

DOMAINE : Science Technologie

FILIERE : Génie Electrique

OPTION : ÉLECTROTECHNIQUE INDUSTRIELLE

Thème :

**L'effet des écrans électrostatiques sur l'atténuation du champ
électrique généré par une ligne aérienne à Haute Tension**

Jury de soutenance :

Nom et Prénom	Grade	Qualité
MEKHANET Mohammed	M.C.A	Président
KOUIDRI Mohamed Ali	M.C.A	Examinateur
DJEKIDEL Rabah	M.C.A	Encadreur
HADJADJ Marwan	M.C.A	Co-encadreur

Année Universitaire : 2019/ 2020

Résumé

ملخص:

تؤدي خطوط الطاقة وظيفة نقل الطاقة الكهربائية لمسافات طويلة من الإنتاج إلى المستهلكين. تولد هذه الخطوط مجالات كهربائية مرتفعة. من أجل تقليل تأثيرات هذه المجالات، يتم استخدام الشاشات الكهروستاتيكية (التدريع السلبي) بشكل عام. يمكن أن تنتج هذه الشاشات تأثيرات غير مرغوب فيها، مثل زيادة المجال الكهربائي السطحي للموصل وزيادة خسائر التفريغ الهالي.

الكلمات المفتاحية: المجال الكهربائي، الخط العلوي للجهد العالي، الشاشة الكهروستاتيكية، المجال الكهربائي السطحي، تأثير الهالة

Résumé :

Les lignes électriques assurent la fonction le transport de l'énergie électrique sur les longues distances de la production vers les consommateurs. Ces lignes génèrent des champs électriques intenses. Afin de réduire les effets de ces champs, on utilise généralement les écrans électrostatiques (blindage passif). Ces écrans peuvent produire des effets indésirables, tel que l'augmentation du champ électrique superficiel du conducteur, et l'accroissement des pertes par effet de couronne.

Mots-clés: champ électrique, ligne aérienne à haute tension, écran électrostatique, champ superficiel, effet de couronne.

Abstract :

Power lines perform the function of transporting electrical energy over long distances from production to consumers. These lines generate intense electric fields. In order to reduce the effects of these fields, electrostatic screens (passive shielding) are generally used. These screens can produce unwanted effects, such as, increased surface electric field of the conductor, and increased corona losses.

Keywords: electric field, high voltage overhead line, electrostatic screen, surface electric field, corona effect.

Dédicace

Dédicace

Je dédie ce modeste travail : À mes très chers parents, en témoignage et en gratitude de leur dévouement et leur soutien permanent durant toutes mes années d'études, leurs sacrifices illimités, leur réconfort moral et tous les efforts qu'ils ont consentis pour mon éducation et mon instruction pour me voir réussir un jour. Que Dieu les garde inchallah, , ma famille, à tous mes proches, à tous mes amis.

REMERCIEMENT

REMERCIEMENT

Trouver les bons mots pour dire « merci » est une chose difficile. Tout d'abord, nous tenons à exprimer toute nos gratitudes au professeur DJIKIDEL Rabeah pour sa sympathie, ses compétences et sa grande disponibilité. Sans lui, nous n'aurions pas finalisé ce projet.

Nos remerciements vont aussi aux membres du jury. Qui ont bien voulu accepter d'évaluer notre travail, leur compétences et savoir sont des éléments qui apportent une plus-value à notre modeste travail, qu'ils trouvent tous ici l'expression de nos remerciements et notre reconnaissance.

En fin, nous tenons à remercier vivement tous ceux qui nous ont aidé de près ou de loin, que ce soit par leurs amitiés, leurs conseils ou par leur soutiens moraux.

Sommaire

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

CHAPITRE I : Étude bibliographique

I.1	Introduction.....	3
I.2	Equation de Maxwell.....	3
I.3	Equations de Poisson et Laplace	5
I.4	Définition Champ Electromagnétique.....	6
I.5	Champ électrique	7
I.6	Champ magnétique	8
I.7	Compatibilité électromagnétique	8
I.7.1	Définition de la CEM	8
I.7.2	Acteurs de la CEM.....	8
I.7.3	Source	9
I.7.3.1	Définition	9
I.7.3.2	Réseaux électriques comme source	9
I.7.4	Couplage	9
I.7.4.1	Définition.....	9
I.7.4.2	Chemin de couplage dans les réseaux électriques.....	9
I.7.4.3	Types de milieux	9
I.7.5	Victime	10
I.7.5.1	Définition	10
I.7.5.2	Réseaux électriques comme victime	10
I.7.6	Norme de la CEM.....	10
I.7.7	Limite admissible du champ électromagnétique.....	11
I.7.7.1	Sur l'être humaine	11
I.7.7.2	Sur le matériel	11
I.8	L'effet de couronne	11
I.8.1	Définition de l'effet couronne	11
I.8.2	Applications utilisant la décharge couronne	12
I.8.2.1	Paratonnerre	12
I.8.2.2	Neutralisation.....	13
I.8.2.3	Filtre électrostatique	13
I.8.2.4	Séparateur électrostatique.....	13

Sommaire

I.8.2.5	Avantage de la décharge couronne dans le réseau.....	14
I.9	Ligne de transport haute tension.....	15
I.9.1	Définition	15
I.9.2	La cause d'utilisation des lignes à haute tension.....	15
I.9.3	Classification de tensions et fonctionnement	15
I.9.4	Les Composants principales des lignes aériennes haute tension.....	16
I.9.4.1	Pylônes.....	16
I.9.4.2	Conducteurs	16
I.9.4.3	Les entretoises	19
I.9.4.4	Isolateurs	20
I.9.4.5	Câbles de garde	20
I.10	Conclusion	20

CHAPITRE II : Méthodes de calcul du champ électrique

II.1	Introduction.....	21
II.2	Différentes méthodes de calcul du champ électrique.....	21
II.2.1	La Méthode des éléments finis de frontière (M.E.F.F).....	21
II.2.1.1	Le Principe.....	21
II.2.1.2	Formulation indirecte de la M.E.F.F.....	22
II.2.1.3	Formulation directe de la M.E.F.F.....	22
II.2.2	La Méthode des Différences Finies (M.D.F).....	22
II.2.2.1	Principe.....	22
II.2.2.2	Maillage de la géométrie.....	23
II.2.2.3	Transformation de l'équation différentielle.....	23
II.2.3	La méthode des charges fictives.....	25
II.2.4	Méthode des images.....	27
II.2.4.1	Le théorème de Gauss.....	27
II.2.4.2	Champ électrique au voisinage d'un conducteur.....	27
II.2.4.3	Méthode des images électrostatiques.....	28
II.3	Calcul du champ électrique d'une ligne aérienne par la méthode des images.....	30
II.4	Réduction du champ électrique généré par une ligne aérienne (Effet d'écrans).....	34
II.5	Le champ électrique superficiel des conducteurs.....	35

Sommaire

II.6	Pertes par effet de couronne.....	36
II.7	Conclusion.....	38

Chapitre III : Résultats et interprétations

III.1	Introduction	40
III.2	Le champ électrique sous une ligne électrique triphasée aérienne.....	40
III.3	Réduction du champ électrique sous les lignes HT.....	48
III.4	Conclusion	52
Conclusion générale		55

Liste des figures

Liste des figures

Figure I.1. Relations fondamentales entre les différentes grandeurs physiques caractérisant le champ électromagnétique.....	5
Figure I.2. Champ électromagnétique.....	6
Figure I.3. Acteurs de la CEM.....	8
Figure I.4. Utilisation de la décharge couronne pour le paratonnerre.....	12
Figure I.5. Utilisation de la décharge couronne dans le filtre électrostatique.....	13
Figure I.6. Utilisation de la décharge couronne la séparation électrostatique.....	13
Figure I.7. La ligne de circuit simple avec disposition DELTA.....	17
Figure I.8. La ligne de circuit simple avec disposition NAPPE.....	17
Figure I.9. la ligne de circuit simple avec disposition TRIANGLE.....	17
Figure I.10. la ligne de circuit simple avec disposition DRAPEAU.....	18
Figure I.11. La ligne de circuit double avec disposition DANUBE.....	18
Figure I.12. La ligne de circuit double avec disposition DOUBLE DRAPEAU.....	18
Figure II.1. Maillage carré.....	24
Figure II.2. Point central et ses voisins.....	24
Figure II.3. Distribution de Charges équivalentes pour la région en dehors de la surface sphère de rayon a: (a) sphère chargée en volume de rayon a, (b) charge ponctuelle, et (c) charge surfacique de la sphère de rayon $r < a$	28
Figure II.4. (a) Charge au-dessus d'un sol parfaitement conducteur, et (b) Charges induites sur le sol remplacé par une charge équivalente.....	29
Figure II.5. Faisceau de conducteurs.....	32
Figure II.6. Conducteurs i et j avec les images i' et j' utilisées pour le calcul des coefficients de potentiel.....	33
Figure II.7. Représentation du champ électrique généré par Les conducteurs d'une ligne triphasée et ses images.....	34
Figure II.8. Disposition géométrique des conducteurs phases et écrans d'une ligne triphasée HT.....	35
Figure III.1. Géométrie d'une ligne électrique triphasée disposée en nappe horizontale.....	41
Figure III .2. Profil du champ électrique à 1m du sol pour une ligne en nappe horizontale de 400 kV.....	42
Figure III.3. Profil du champ électrique à 1m du sol pour une ligne en nappe horizontale en fonction de plusieurs niveaux de tension	43
Figure III.4. Profil du champ électrique à 1m du sol pour une ligne en nappe horizontale en fonction de la distance de séparation entre les conducteurs.....	44

Liste des figures

Figure III.5. Profil du champ électrique à 1m du sol pour une ligne en nappe horizontale en fonction de la hauteur des conducteurs au-dessus du sol	45
Figure III.6. Profil du champ électrique d'une ligne en nappe horizontale en fonction de la hauteur du point d'observation	46
Figure III.7. Représentation géométrique des différentes configurations d'une ligne électrique. (a) nappe horizontale, (b) nappe verticale, (c) triangle, (d) triangle inverse.....	46
Figure III.8. Profil du champ électrique à 1m du sol pour des différentes configurations d'une ligne électrique.....	47
Figure III.9. Géométrie d'une ligne électrique triphasée disposée en nappe horizontale avec des écrans électrostatiques.....	48
Figure III.10. Champ électrique à 1 m du sol pour une ligne en nappe de 400 kV sans et avec les écrans électrostatiques.....	49
Figure III.11. Pertes par effet de couronne en fonction de la distance de séparation moyenne entre les conducteurs.....	51
Figure III.12. Pertes par effet de couronne en fonction du rayon équivalent du conducteur.....	52

Liste des tableaux

Liste des tableaux

Tableau I.1. Classification et normalisation Européen de réseau électrique.....	16
Tableau III.1.Valeurs maximales des champs électriques obtenus pour les différentes configurations à simple circuit.....	48
Tableau III.2. Efficacité du nombre des conducteurs écrans sur la réduction du champ électrique.....	49
Tableau III.3.Influence des conducteurs écrans sur le champ électrique superficiel maximal.....	50
Tableau III.4.Influence des conducteurs écrans sur les pertes par effet de couronne.....	50

Liste des symboles

E : est le champ électrique.

H : le champ magnétique.

B : l'induction magnétique.

D : l'induction électrique.

m_d : est le coefficient de rugosité du conducteur, facteur tenant compte l'état de surface des conducteurs, il varie entre 0,83 et 0,87.

m_t : est le coefficient météorologique, facteur tenant compte les conditions climatiques : pluie, neige...

r : est le rayon du sous-conducteur en cm.

GMD : est la séparation moyenne entre les phases en cm.

β : est le facteur qui recueille l'effet de la disposition des conducteurs.

n : est le nombre de sous-conducteurs par phase.

d : est la distance de séparation entre les sous-conducteurs.

g_0 : le champ d'ionisation de l'air ≈ 30 kV/cm où 21.2 kV/cm en valeur efficace.

δt : est le facteur de densité de l'air, Dans des conditions standard (pour $p = 76$ cm Hg et $t = 25$ °C), la valeur de $\delta = 1$.

q : la matrice des charges des conducteurs.

V : la matrice des potentiels (le sol est considéré au potentiel nul)

P : la matrice carrée des coefficients de capacités propres et mutuelles des conducteurs.

$h_{i\text{ moy}}$: la hauteur moyenne du conducteur (i) à partir du sol.

ϵ_0 : permittivité de l'air.

d : rayon géométrique du faisceau

δ : la distance entre deux sous conducteurs consécutives.

Introduction générale

Un réseau électrique est un ensemble d'infrastructures énergétiques plus ou moins disponibles permettant d'acheminer l'énergie électrique des centres de production vers les consommateurs d'électricité. Il est constitué de lignes électriques exploitées à différents niveaux de tension, connectées entre elles dans des postes électriques. Les postes électriques permettent de répartir l'électricité et de la faire passer d'une tension à l'autre grâce aux transformateurs.

Le champ électrique à la fréquence industrielle (50 et 60 Hz) est un phénomène qui existe autour de tout ouvrage de transport d'énergie électrique, lignes et postes aériens, c'est la valeur de plus en plus élevée des tensions utilisées, qui provoque des conséquences indésirables. Un champ électrique très élevé signifie inéluctablement une durée de vie courte et un manque de fiabilité. En conséquence, il est très utile de connaître complètement la distribution du potentiel et du champ électrique dans les équipements à haute tension et très haute tension. Les champs électriques créés par les lignes de transport à haute tension peuvent avoir des effets néfastes sur l'environnement et la santé humaine, souvent il est nécessaire de diminuer les valeurs de ces champs par les techniques de blindage passif et actif.

L'intérêt pratique de l'étude des champs électriques en haute tension réside simplement dans le fait que les champs électriques élevés constituent:

- Une contrainte pour le matériel électrique.
- Un danger pour le personnel d'exploitation des postes, des lignes et des laboratoires à haute tension.
- Pour les isolations (par exemple: diélectriques des condensateurs) ou les systèmes d'isolations (comme: pylônes, isolateurs et parafoudres) sont déterminantes pour la fiabilité et la durée de vie du matériau considéré.

L'objet de ce présent travail est de déterminer la distribution du champ électrique sous et au voisinage d'une ligne aérienne à haute tension et d'analyser les effets présentés par le blindage passif.

Le premier chapitre s'intéresse à une étude bibliographique sur les équations de Maxwell pour le potentiel et le champ électrique dans le cas général, ainsi à la présentation d'une notion sur la compatibilité électromagnétique (CEM) et les différents phénomènes

Introduction générale

électromagnétiques, également les conséquences du phénomène de l'effet de couronne autour des lignes de transport et les différents éléments constitutifs d'un réseau d'énergie électrique.

Le deuxième chapitre porte sur un rappel sur les principales méthodes numériques utilisées dans le calcul du champ électrique, également à la présentation de la méthode des images, sa procédure pour le calcul numérique du champ électrique au voisinage d'une ligne aérienne à haute tension.

Le dernier chapitre présente les résultats issus de la simulation numérique réalisée à l'aide d'un programme de calcul sous l'environnement Matlab. Ces résultats ont été discutés et analysés

Nous clôturons ce travail par une conclusion générale et d'envisager quelques perspectives.

CHAPITRE I

Etude Bibliographique

I.1 Introduction

Les lignes électriques haute tension sont des sources d'énergie électromagnétique, elles génèrent un champ électrique et un champ magnétique qui se découplent à la fréquence 50Hz qui interagissent avec l'environnement, ces champs induisent des courants et des champs électriques à l'intérieur du corps humain situé au voisinage de ces lignes, les composantes du champ magnétique produites par une ligne haute tension sont plus néfastes pour la santé humaine que celles du champ électrique ceci est expliqué par le fait que le champ électrique ne pénètre pas à l'intérieur du corps humain et peut être atténué par des écrans électrostatiques, contrairement au champ magnétique, le champ magnétique ne peut pas être stoppé par les bâtis et pénètre à l'intérieur du corps humain.

Nous traitons dans ce chapitre un rappel de la formulation générale des phénomènes physiques en électromagnétisme, la formulation des équations de Maxwell, la définition du champ électromagnétique, Nous aborderons ensuite quelques définitions relatives à la compatibilité électromagnétique (CEM), aux sources de perturbations et aux couplages, ainsi les éléments constitutifs des réseaux électriques.

I.2 Equation de Maxwell

Tous les phénomènes de l'électromagnétisme sont décrits par les quatre équations de Maxwell locales. Ces équations aux dérivées partielles peuvent être séparées en équations de couplage électromagnétique (1) et (2) de conservation (3) et (4). Ce sont [1]:

$$\text{Loi de Faraday : } \operatorname{rot} E = -\frac{\partial B}{\partial t} \quad (\text{I.1})$$

$$\text{Conservation du flux magnétique : } \operatorname{div} B = 0 \quad (\text{I.2})$$

$$\text{Loi de d'Ampère : } \operatorname{rot} H = (J + \frac{\partial D}{\partial t}) \quad (\text{I.3})$$

$$\text{Loi de Gauss électrique : } \operatorname{div} D = \rho \quad (\text{I.4})$$

E : est le champ électrique.

H : le champ magnétique.

B : l'induction magnétique.

D : l'induction électrique et

Les champs vectoriels précédents ne sont pas indépendants les uns des autres, leur liaison est fonction du milieu où ils régent. Ainsi pour définir complètement le phénomène électromagnétique à l'intérieur d'un milieu isotrope et homogène, caractérisé au point de vue électromagnétique par une conductivité électrique σ , une permittivité électrique ϵ , on rajoute aux équations précédentes les lois de comportement de ce milieu [1].

Loi d'ohm généralisé

$$J = \sigma(E + V_d \wedge B) + J_s \quad (I.5)$$

Où, σ est la conductivité électrique, V_d la vitesse de déplacement des charges, et J_s la densité de courante source.

Relation magnétique linéaire :

$$B = \mu_0 H \quad (I.6)$$

Relation diélectrique linéaire :

$$D = \epsilon_0 E \quad (I.7)$$

L'électrostatique qui est l'étude des effets électriques créés par des charges immobiles (au repos), et des forces qu'elles exercent entre elles, c'est-à-dire de leurs interactions, la charge est une propriété de la matière qui lui fait produire et subir des effets électriques et magnétiques, pour les applications électrostatiques, les valeurs et les positions ne varient pas en fonction du temps. Les termes qui dépendent du temps, dans les équations de Maxwell s'annulent, et les champs électriques et magnétiques ne sont plus reliés. Cela donne naissance à des modèles plus simples.

On peut résumer les relations entre les différentes grandeurs caractérisant le champ électromagnétique par le schéma de la figure (I-1).

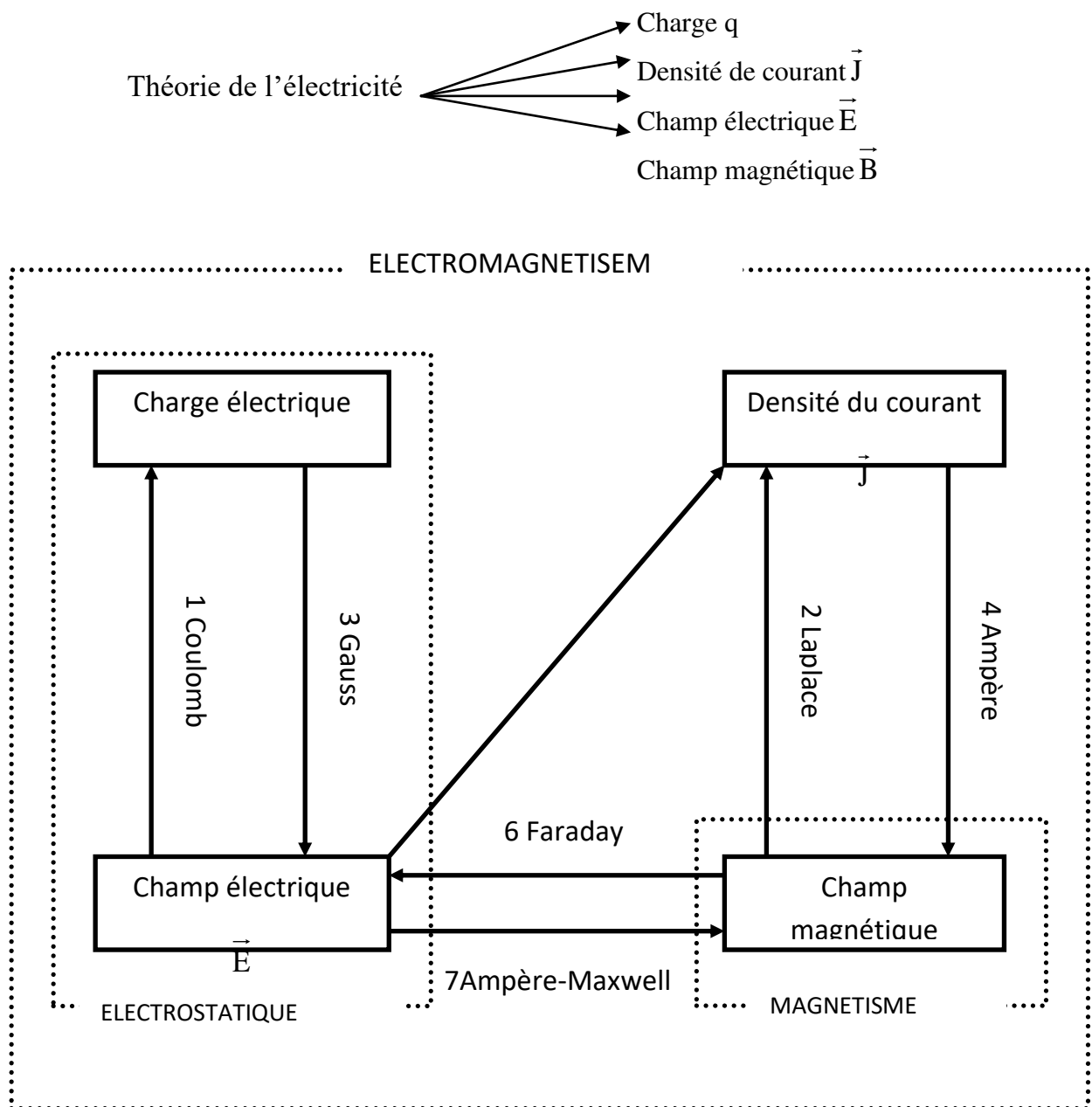


Figure (I-1). Relations fondamentales entre les différentes grandeurs physiques caractérisant le champ électromagnétique

I.3. Equations de Poisson et Laplace

En remplaçant le champ électrostatique dans la forme locale du théorème de Gauss par le gradient du potentiel électrostatique, nous obtenons :

$$\operatorname{div} \vec{E} = \frac{\rho}{\varepsilon} = \operatorname{div} (-\overrightarrow{\operatorname{grad}} V) = \frac{\rho}{\varepsilon} \Rightarrow \Delta V + \frac{\rho}{\varepsilon} = 0 \quad (\text{I.8})$$

Où:

$$\Delta = \frac{\partial^2}{\partial x^2} + \frac{\partial^2}{\partial y^2} + \frac{\partial^2}{\partial z^2} \quad \text{Le nouvel 'opérateur } \Delta \equiv \operatorname{div} \overrightarrow{\operatorname{grad}} \text{ est appelé laplacien scalaire.}$$

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

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 :

$$\Delta V = 0 \quad (\text{I.9})$$

Qui gouverne la répartition du potentiel dans les matériaux isolants généralement utilisés dans les appareillages H. T à savoir la porcelaine, le verre et l'air.

On peut noter que cette équation gouverne aussi la répartition du potentiel dans les matériaux conducteurs tels que les électrodes car ceux-ci sont des volumes équipotentiels [2].

I.4. Définition Champ Electromagnétique

Un champ électromagnétique est la représentation dans l'espace de la force électromagnétique qu'exercent des particules chargées. Concept important de l'électromagnétisme, ce champ représente l'ensemble des composantes de la force électromagnétique s'appliquant sur une particule chargée se déplaçant dans un référentiel galiléen. Une particule de charge q et de vitesse v subit une force qui s'exprime par [3] :

$$\vec{F} = q(\vec{E} + \vec{v} \wedge \vec{B}) \quad (\text{I.10})$$

Où \vec{E} est le champ électrique et \vec{B} est le champ magnétique. Le champ électromagnétique est l'ensemble (\vec{E}, \vec{B}) .

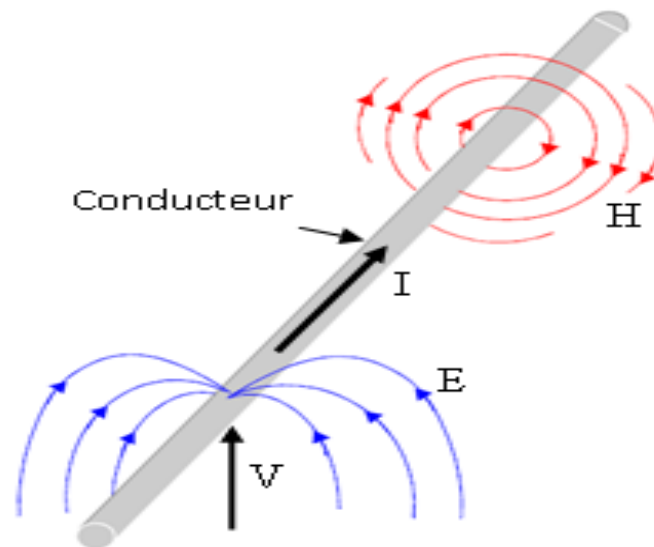


Figure (I-2) : Champ électromagnétique

Les appareils électriques et les appareils de coupure sont durant leur fonctionnement, soumis à l'action du champ électromagnétique (électrique et magnétique), pour cela on doit étudier ce champ pour pouvoir le calculer pour plusieurs raisons :

- Autour des isolateurs et des bornes de transformateurs à haute tension règnent un champ électrostatique important.
- Dans les conducteurs, les champs électrocinétiques assurent la circulation du courant électrique.
- Dans les produits métallurgiques chauffés par induction le champ électrique et le champ magnétique se combinent pour créer le courant de Foucault souhaités.
- L'évolution du champ en chaque point de l'espace permet de déduire le flux ; qui détermine les forces électromotrices pour un fonctionnement générateur et le couple pour un fonctionnement moteur.

I.5 Champ électrique

La notion de champ électrique a deux sens :

Au sens qualificatif. 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 la valeur ; dont la grandeur est égale au quotient de force s'exerçants sur une quantité d'électrique par cette quantité et dont direction est celle de la force [4].

$$E(r) = \frac{F(r)}{q} \quad (\text{I.11})$$

I.6 Champ magnétique

Le passage d'un courant électrique I, dans un conducteur cylindrique de longueur supposée infini, crée un champ d'induction magnétique dont la composante tangentielle à l'extérieure du conducteur est donner par [4] :

$$B = \frac{\mu_0 I}{2\pi r} \quad (\text{I.12})$$

r est la distance entre le conducteur est le point d'observation et μ_0 perméabilité magnétique du vide, Les variations (dans le temps et dans l'espace) de ces deux grandeurs(E, B) sont liées entre elles par les équations se Maxwell.

I.7 Compatibilité électromagnétique

I.7.1 Définition de la CEM

La CEM est l'aptitude d'un appareil ou d'un système à fonctionner dans son environnement électromagnétique de façon satisfaisante, sans émettre des perturbations insupportables ni être perturbé par les autres appareils [5].

I.7.1 Acteurs de la CEM

Les acteurs qui mettent en évidence la CEM sont : Source, Couplage et Victime. Le schéma de la figure I.3, la position de ces acteurs dans un processus d'étude de la CEM.



Figure. (I.3): Acteurs de la CEM

I.7.3 Source

I.7.3.1 Définition

Tout appareil, qui émet une perturbation électromagnétique, est qualifié de source. Parmi les principales causes de perturbations, on cite ; la distribution d'énergie électrique, les ondes hertziennes, les décharges électrostatiques et la foudre [5].

I.7.3.2 Réseaux électriques comme source

La tension et le courant génèrent respectivement des champs électrique et magnétique. Le transit de l'énergie mise en jeu étant à basse fréquence, les champs électrique et magnétique sont alors indépendants ; il s'agit des champs proches où le calcul se fait séparément. Des coupures brèves de l'énergie (dv/dt ou dI/dt), génèrent des champs électrique et magnétique à haute fréquence ; on parle alors de champ lointain où les champs électrique et magnétique sont étroitement liés par une onde électromagnétique.

I.7.4 Couplage

I.7.4.1 Définition

1 Le couplage est le chemin de transmission des perturbations électromagnétiques de la source vers la victime [5].

I.7.4.2 Chemin de couplage dans les réseaux électriques

Les conducteurs de la ligne sont des chemins de couplage. Ils peuvent conduire les harmoniques issus des variations ou des chocs de foudre.

L'air environnant est aussi un chemin de propagation car c'est un support des champs magnétique et électrique.

I.7.4.3 Types de milieux

a. Milieu conducteur

Un milieu conducteur est décrit, localement à la matière, par la loi d'Ohm.

$$\vec{j} = \sigma \vec{E} \quad (\text{I.13})$$

σ : Conductivité électrique [$\Omega \cdot m^{-1}$].

La loi d'Ohm, est, pour les circuits électriques devient : $U=RI$

Pour une tension sinusoïdale et en notation complexe la loi se généralise où Z est l'impédance. $U=ZI$

b. Milieu isolant

Un milieu isolant est caractérisé par une conductance nulle, donc aucun courant électrique.

c. Milieu magnétique

Un milieu magnétique favorise la circulation du champ magnétique. Il est caractérisé par :

$$\begin{cases} B = \mu H \\ \mu = \mu_0 \mu_r \end{cases} \quad (\text{I.14})$$

μ_r : Perméabilité magnétique relative du milieu

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

d. Milieu diélectrique

Un milieu diélectrique favorise la circulation du champ électrique. Il est caractérisé par :

$$\begin{cases} D = \varepsilon E \\ \varepsilon = \varepsilon_0 \varepsilon_r \end{cases} \quad (\text{I.15})$$

ε : Permittivité diélectrique appelée aussi constante diélectrique

$\varepsilon_0= 10^{-9} /36\pi$ [F/m] Permittivité diélectrique du vide.

ε_r : Permittivité diélectrique relative du milieu

I.7.5 Victime

I.7.5.1 Définition

La victime, dans la trilogie source/couplage/victime, représente tout matériel susceptible d'être perturbé [5].

I.7.5.2 Réseaux électriques comme victime

Les coups de foudre sont des perturbations naturelles caractérisés par des décharges électriques ; lorsqu'elles touchent les lignes de transport d'énergie, ces derniers deviennent des victimes.

I.7.6 Norme de la CEM

Dans de nombreux domaines d'activité, l'action des perturbations électromagnétiques sur les systèmes électriques peut entraîner des dysfonctionnements ; c'est pourquoi la validation de la compatibilité électromagnétique (CEM) des systèmes, qui suit les phases de conception et développement, est basée sur l'application de normes bien définies [5].

I.7.7 Limite admissible du champ électromagnétique

I.7.7.1 Sur l'être humaine

Relativement à l'électricité de 50/60 Hz, les valeurs limites, en fonction des effets immédiats que peuvent avoir sur l'être humain les champs électriques et magnétiques sont de $100\mu\text{T}$ pour le champ magnétique et de 5 kV/m pour le champ électrique. Ces valeurs ne tiennent compte que de la protection contre les effets thermiques (chaleur) et non des effets biologiques liés à une exposition sur le long terme.

En ce qui concerne l'exposition chronique, les valeurs limites sont de 10V/m pour le champ électrique et de $0.2\ \mu\text{T}$ pour le champ magnétique. Pendant le sommeil, les individus sont plus sensibles aux champs électromagnétiques. Dans ce cas, les limites doivent être bien plus basses dans des lieux de repos. Elles sont de 5V/m pour le champ électrique et $0.05\mu\text{T}$ pour le champ magnétique.

I.7.7.2 Sur le matériel

Considérons la norme 55022 qui concerne une catégorie importante d'appareils électriques et les appareils de traitement de l'information. Cette norme est directement dérivée de la publication n°22 du CISPR et distingue deux classes d'appareils :

- Les appareils de classe A qui sont destinés à être utilisés en milieu industriel, commercial ou d'affaires ;
- Les appareils de classe B qui sont destinés à être utilisés dans des locaux d'habitation.

A des fins de sécurité pour préserver la santé humaine ou des biens matériels, la directive 89/336/CEE, relative au rapprochement des législations des états membre, impose une réglementation vis-à-vis de la comparabilité électromagnétique.

I.8 L'effet de couronne

I.8.1 Définition de l'effet couronne

L'effet couronne est lié à l'apparition de l'avalanche électronique qui se développe dans un intervalle gazeux séparant deux électrodes asymétriques soumises à un champ électrique hétérogène à des pressions de quelques torrs à quelques atmosphères. La décharge couronne se manifeste dans les conditions naturelles. Elle apparaît sous forme d'une gaine lumineuse qui apparaît autour des conducteurs entourés par l'air, lorsque la valeur maximale du champ électrique atteint celle du champ d'ionisation de l'air et se manifeste sur toute la gamme de fréquences de la tension. La décharge couronne se caractérise par des phénomènes de nature optique, acoustique et électrique [6].

Lorsque le champ électrique en un point du fluide est suffisamment fort, le fluide s'ionise autour de ce point et devient conducteur. En particulier, si un objet chargé possède des pointes ou des coins, le champ électrique y sera plus important qu'ailleurs (c'est le pouvoir des pointes), c'est là en général, que se produira une décharge de corona. Ce phénomène tendra à se stabiliser de lui-même puisque la région ionisée devenant conductrice, la pointe aura apparemment tendance à disparaître. Les particules chargées se dissipent alors sous l'effet de la force électrique et se neutralisent au contact d'un objet de charge inverse. Les décharges de corona se produisent donc en général autour d'une électrode de rayon de courbure fort (un défaut du conducteur formant une pointe par exemple) tel que le champ électrique à ses environs soit suffisamment important pour permettre la formation d'une couche d'air ionisé, et une autre de rayon de courbure faible (une plaque métallique ou la terre).

I.8.2 Applications utilisant la décharge couronne

I.8.2.1 Paratonnerre

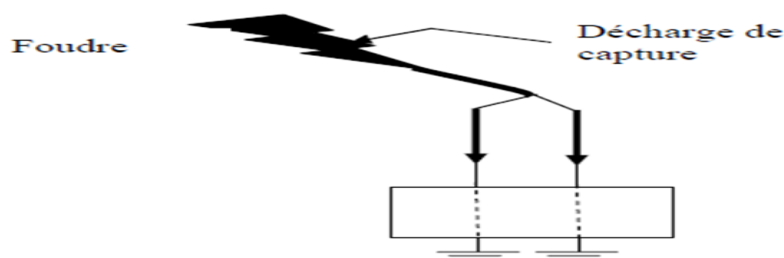


Figure (I.4) : Utilisation de la décharge couronne pour le paratonnerre

L'effet couronne augmente la conductivité de l'air autour de la pointe ; le canal de la foudre qui opte pour le chemin le moins résistant est capté par le paratonnerre (Figure (I.4)) [7].

I.8.2.2 Neutralisation

La surface de l'avion se charge par frottement avec l'air. Les charges créées par effet couronne produites par des flèches disposées sur les ailes de l'avion éliminent par neutralisation les charges surfaciques [7].

I.8.2.3 Filtre électrostatique

Le fil central produit par effet couronne des charges électriques négatives. Les grains de poussière qui se chargent négativement sont attirés et captés par le cylindre qui les empêche de ressortir. Le cylindre joue le rôle d'un filtre de poussières, lequel une fois saturé sera remplacé par un nouveau filtre (Figure (I.5)) [7].

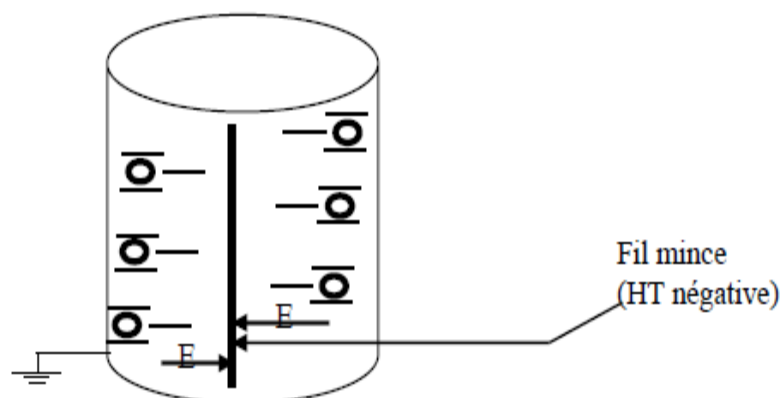


Figure (I.5): Utilisation de la décharge couronne dans le filtre électrostatique

I.8.2.4 Séparateur électrostatique

Un mélange de particules granuleuses acquiert des charges électriques créées par effet couronne grâce à une électrode à pointes reliée à une source de haute tension négative. Ces particules se comportent différemment selon qu'elles sont isolantes ou métalliques et tombent dans des endroits différents (Figure (I.6)) [7].

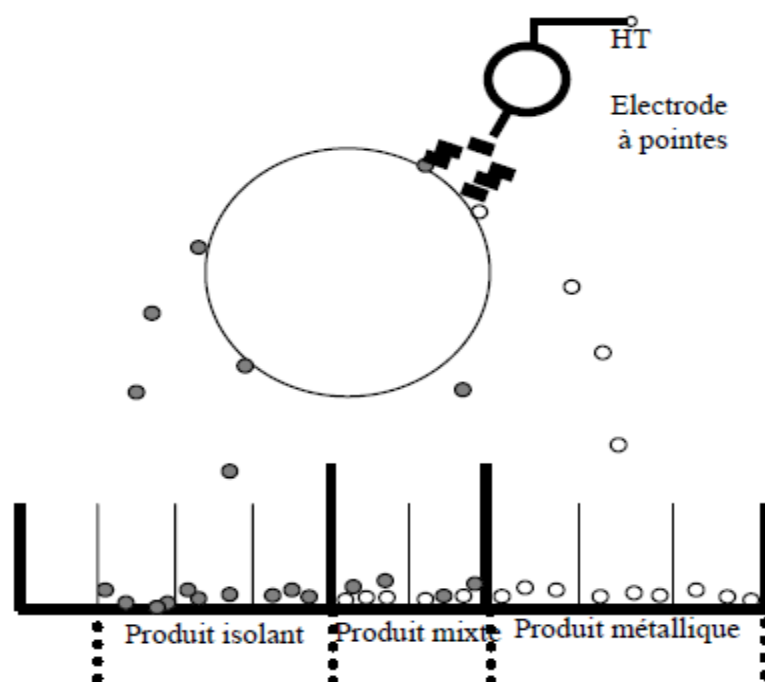


Figure (I.6): Utilisation de la décharge couronne la séparation électrostatique

Les décharges de corona ont de nombreuses autres applications commerciales et industrielles, tel que.

- Production d'ozone.
- Traitement de surface de certains polymères.
- Photocopieur.
- Laser à azote.
- Refroidissement de composants électroniques (la migration des particules ionisées génère un flux qui expulse l'air chaud).
- Coloration des véhicules.

I.8.2.5 Avantage de la décharge couronne dans le réseau

Quand le champ superficiel dépasse le seuil critique, les charges créées par effet couronne éliminent par neutralisation une partie des charges du conducteur. Ceci provoque la diminution du champ superficiel et du potentiel du conducteur. On dit que l'effet couronne est un régulateur de tension [7].

Donc la décharge couronne amortit les surtensions sur les lignes surtout les surtensions dues à la foudre. Lorsque l'effet couronne se produit autour du conducteur dans l'air

environnant celui-ci acquiert une grande conductivité et le diamètre du conducteur tend à augmenter, ce qui paradoxalement réduit le champ électrique. Des calculs récents effectués sur des modèles simulés d'une ligne de 220 kV soumise à une onde de choc 1,2/50 μ s simulant une surtension atmosphérique, l'atténuation de la surtension atteint 60% quand on s'éloigne de 7 km du point d'impact de cette surtension.

I.9 Ligne de transport haute tension :

I.9.1 Définition :

Une ligne à haute tension est la composante principale des réseaux de transport d'électricité. Elle permet le transport de l'énergie électrique des centrales électriques vers les consommateurs. Les lignes à haute tension peuvent être aussi bien aériennes que souterraines ou sous-marines, quoique les professionnels réservent plutôt le terme aux liaisons aériennes. Elles servent au transport sur les longues distances de l'électricité produite par les diverses centrales électriques, ainsi qu'à l'interconnexion des réseaux électriques [8].

Les lignes à haute tension aériennes sont composées de fils conducteurs, généralement en alliage d'aluminium, suspendus à des supports, pylônes ou poteaux. Ces supports peuvent être faits de bois, d'acier et de béton.

I.9.2 cause d'utilisation les lignes à haute tension :

Le choix d'utiliser des lignes à haute tension s'impose, dès qu'il s'agit de transporter de l'énergie électrique sur des distances assez de longue. Le but est de réduire les chutes de tension en ligne, les pertes en ligne, et également d'améliorer la stabilité des réseaux.

Il est à noter que les pertes en ligne sont dues à l'effet Joule, qui ne dépend que de deux paramètres : la résistance et le courant ($P = R.I^2$). L'utilisation de la haute tension permet, à puissance transportée équivalente, de diminuer le courant, et donc les pertes. Par ailleurs, pour diminuer la résistance, il n'y a que deux facteurs, la résistivité des matériaux utilisés pour fabriquer les conducteurs et de la section de ces derniers [8].

I.9.3 Classification de tensions et fonctionnement :

On peut classer les lignes électriques en fonction de leur tension du fonctionnement :

Appellation normalisée	Ancienne appellation (toujours d'usage courant)	Niveau de tension usuel	Domaine d'utilisation
	Ultra Haute Tension	supérieure à 800 kV	
HTB	Très Haut Tension(THT)	230 kV - 800 kV	utilisée pour de longues distances, de très grandes quantités d'énergie électrique.
	Haut Tension(HT)	33 kV -230 kV	utilisée pour le transport de grandes quantités d'énergie électrique.
HTA	Moyen Tension(MT)	1 Kv- 33 kV	utilisée pour la distribution dans les zones urbaines et rurales.
BT	Basse Tension(BT)	moins de 1 kv	pour la connexion vers un immeuble d'habitation ou de petits clients commerciaux et de l'utilitaire

Tableau (I.1): classification et normalisation Européen de réseau électrique

I.8.5 Composants principales des lignes aériennes haut tension [8] :

I.8.5.1 Pylônes :

Pour les lignes aériennes, les opérateurs de transport d'électricité, utilisent des pylônes, en général réalisés en treillis d'acier. Leur fonction est de supporter et de maintenir les conducteurs à une distance suffisante du sol et des obstacles : ceci permet de garantir la sécurité et l'isolement par rapport à la terre, les conducteurs étant nus (non isolés) pour en limiter le poids et le coût.

I.8.5.2 Conducteurs :

Le courant électrique est transporté dans des conducteurs. L'énergie électrique étant transportée sous forme triphasée, on trouvera au moins trois conducteurs par ligne. Pour une phase, on peut aussi trouver un faisceau de conducteurs, à la place d'un simple conducteur afin de limiter les pertes et d'augmenter la puissance pouvant transiter.

Les conducteurs en cuivre sont de moins en moins utilisés. On utilise en général des conducteurs en alliage d'aluminium, ou en combinaison aluminium-acier pour les câbles plus anciens ; ce sont des conducteurs composés d'une âme centrale en acier sur laquelle sont tressés des brins d'aluminium.

Les conducteurs à haute tension sont aériens ou souterrains (et parfois sous-marins). Les conducteurs aériens sont soumis à l'action des facteurs atmosphériques : température, vent

pluie, verglas etc. Ces facteurs interviennent de façon importante dans le choix des paramètres d'une ligne haute-tension: type de conducteur électrique (matériaux et géométrie), hauteur et distance des pylônes, tension mécanique maximum 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 transmission, ainsi que sur sa fiabilité et sur sa longévité.

Les emplacements des conducteurs, qui relier avec les pylônes sont variés d'un réseau à l'autre, on peut distinguer les formes des situations suivantes :

- la ligne de circuit simple (mono-terre) :

qui contient un conducteur dans la ligne, on peut trouver les dispositions suivantes :

- delta.
- triangle.
- nappe horizontale.
- Drapeau.

La représentation de cette disposition et leur type des pylônes :

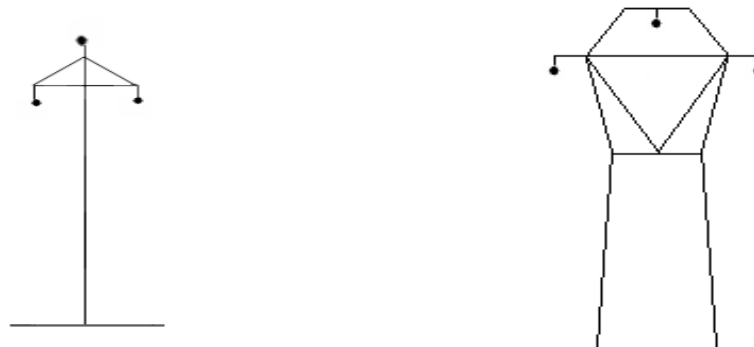


Figure (I.7) : Ligne de circuit simple avec disposition DELTA.

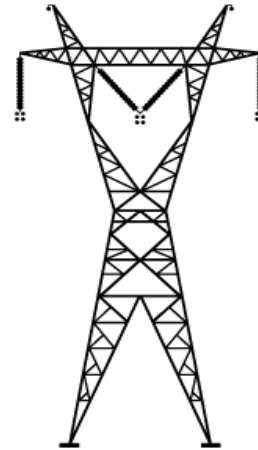
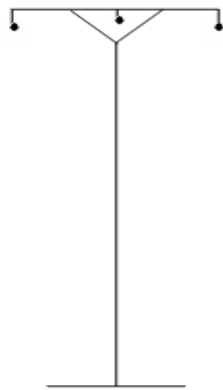


Figure (I.8) : Ligne de circuit simple avec disposition NAPPE.

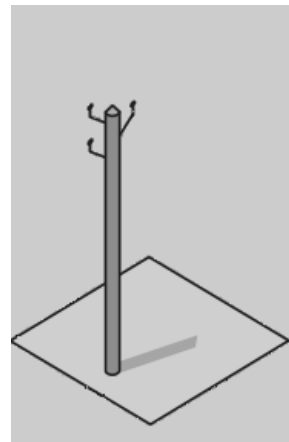
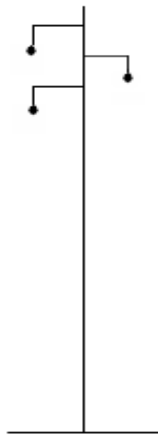


Figure (I.9) : Ligne de circuit simple avec disposition TRIANGLE.

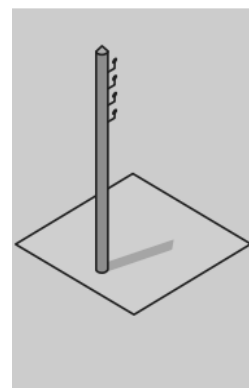
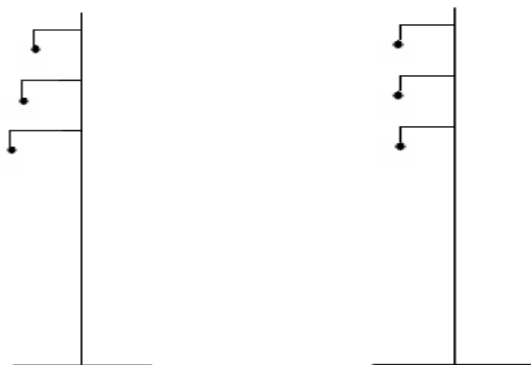


Figure (I.10) : Ligne de circuit simple avec disposition DRAPEAU.

- la ligne de circuit double :

Qui contient deux lignes en parallèle, on peut trouver les dispositions suivantes :

- Double drapeau.
- Danube.

La représentation dès cette disposition et leur type des pylônes :

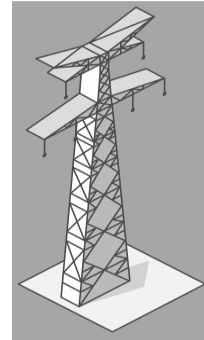
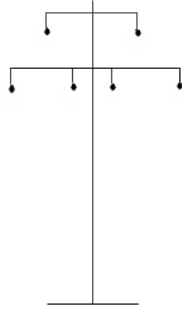


Figure (I.11) : la ligne de circuit double avec disposition DANUBE.

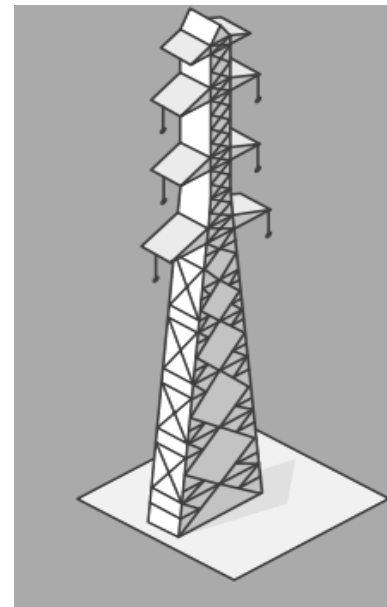
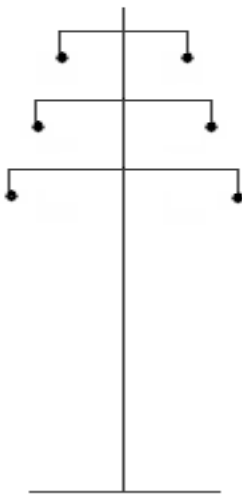


Figure (I.12) : la ligne de circuit double avec disposition DOUBLE DRAPEAU.

I.8.5.3 entretoise :

Dans les lignes équipées des conducteurs en faisceaux, il est essentielle de maintenir d'une même phase, les distances respectives entre les conducteurs élémentaires, les

conducteurs élémentaire suspendus au même niveau tendue à la même flèche sont maintenus à distances constantes par des pièces métalliques appelées les entretoises ; En général la longueur de l'entretoises est de 40 cm et la distance entre l'entretoises en la même portée d'environ 70 m [8].

I.9.4.4 Isolateurs :

L'isolation entre les conducteurs sous tension et les pylônes mise à terre est assurée par des isolateurs. Ceux-ci sont réalisés en verre, en céramique, ou en matériau synthétique. Les isolateurs en verre ou céramique ont en général la forme d'une assiette. On les associe entre eux pour former des chaînes d'isolateurs. Plus la tension de la ligne est élevée, plus le nombre d'isolateurs dans la chaîne est important. Sur une ligne 400 kV, les chaînes d'isolateurs comportent 19 assiettes et plus suivant les régions (selon l'effet de pollution) [8].

I.9.4.5 Câbles de garde :

Les câbles de garde ne transportent pas le courant. Ils sont situés au-dessus des conducteurs. Ils jouent un rôle de paratonnerre au-dessus de la ligne, en attirant les coups de foudre, et en évitant le foudroiement des conducteurs. Ils sont en général réalisés en almelec-acier. Au centre du câble de garde on place parfois un câble en fibre optique qui sert à la communication de l'exploitant [8].

I.10 Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons rappelés le modèle de Maxwell, les différentes formulations et les équations qui en résultent. L'utilisation de l'électricité génère un champ électrique et un champ magnétique. Ces deux types de champs composent le champ électromagnétique. Ensuite, nous avons rappelé brièvement la notion de base de la compatibilité électromagnétique entre un système perturbateur constitué par des sources de perturbation électromagnétiques et un autre système victime et les modes de couplage. Finalement, nous avons cité les éléments constitutifs d'un réseau d'énergie électrique.

Chapitre II

Méthode de calcul du champ électrique

II.1. Introduction

L'augmentation de la demande de l'énergie électrique a engendré l'augmentation de la tension de fonctionnement pour les lignes de transport (HT et THT). Ces lignes aériennes de transport créent des champs électriques et magnétiques et par conséquent a soulevé des questions sérieuses concernant la santé potentielle et les effets sur l'environnement liés aux niveaux plus élevés résultants de l'intensité des champs électriques et magnétiques autour de ces lignes.

L'évaluation avec précision des champs électriques produits par les lignes aériennes de transport (HT et THT) est très important dans plusieurs secteurs de recherches, nécessaire dans de nombreuses applications dans la conception, la maintenance et le fonctionnement des équipements électriques et électroniques.

Plusieurs méthodes numériques permettent de résoudre les équations différentielles, nous présenterons, en particulier, la méthode des différences finies (M.D.F), la méthode des éléments finis (M.E.F), la méthode des charges fictives et la méthode des images.

Le présent chapitre porte d'une analyse numérique utilisée pour l'évaluation du champ électrique autour des lignes aériennes à haute tension dans un état stable, les champs électriques ont été calculés à l'aide de la méthode des images le long des corridors des lignes en utilisant les techniques habituelles de superposition des champs vectoriels provenant de plusieurs conducteurs de la ligne de transport, également ce chapitre discute la technique de réduction pour les champs électriques par la présence des conducteurs écrans, ainsi . Les effets indésirables présentés par cette technique de blindage.

II.2. Différentes méthodes de calcul du champ électrique

II.2.1. Méthode des éléments finis de frontière (M.E.F.F)

II.2.1.1. Principe

Le principe de cette méthode permet d'exprimer la solution d'une équation aux dérivées partielles sous la forme d'une intégrale prise sur la frontière du domaine d'étude. Avec l'application de la technique des éléments finis sur le contour du domaine. Cette méthode fait l'objet de nombreux développements et est très utilisée pour la résolution des problèmes tridimensionnels [2,9].

En générale, dans les problèmes de calcul de potentiel et de champ électrique, nous trouvons deux formulations différentes pour la M.E.F.F, la formulation indirecte et la formulation

directe. Pour la formulation directe, on évalue directement le potentiel et le champ électrique normal alors que pour la formulation indirecte, la distribution de charges est évaluée dans un premier temps et on en déduit ensuite le potentiel et le champ électrique, Ces deux méthodes utilisent les fonctions de Green [2,9].

II.2.2.2. Formulation indirecte de la M.E.F.F

Une expression par formulation indirecte peut être obtenue si les conditions aux frontières peuvent s'exprimer sous forme de potentiel de simple couche en tout point. Pour la formulation indirecte, on part de l'équation suivante pour un point P appartenant à l'électrode de potentiel connu V_s est :

$$V_s(p) = \int_s \frac{\rho_s(M)}{\epsilon_0} G dS \quad (\text{II.1})$$

Où: ρ_s est la distribution de charges surfaciques en un point M d'une interface, et G la fonction de Green [2,9].

II.2.2.3. Formulation directe de la M.E.F.F

Résoudre l'équation (I.13) revient à inverser l'opérateur Laplace. Cette inversion se fait en utilisant la méthode de l'identité de Green. On transforme l'équation de Laplace en équation intégrale qui lie la valeur du potentiel $V(P)$ en un point P à l'intérieur du domaine Ω à la valeur du potentiel V et sa dérivée normale $\frac{\partial V}{\partial n}$ sur l'ensemble des points de sa frontière $\partial\Omega$

II.2.2. Méthode des Différences Finies (M.D.F)

II.2.2.1. Principe

La méthode des différences finies a été historiquement la première méthode connue pour calculer sur ordinateur, la solution d'une équation différentielle. Elle consiste à remplacer, dans les équations aux dérivées partielles et dans les conditions aux limites, les dérivées par un système d'équations algébriques des différences finies calculées sur les nœuds d'un maillage. Dans le calcul du potentiel et du champ électrique, ces équations sont linéaires et la solution de chaque valeur sur le nœud est obtenue par itération où inversion de matrice [2,9].

II.2.2.2. Maillage de la géométrie

Le maillage consiste à décomposer le domaine d'étude en une grille rectangulaire uniforme dont chaque nœud est à équidistance de son voisin suivant les axes x et y .

L'utilisation d'un maillage régulier permet d'avoir, en tout point, la même forme pour les équations. Le plus simple de ces maillages réguliers est le maillage carré, (voir Figure (II.1)). Il existe d'autres maillages réguliers comme le maillage en triangles, équilatéraux et en hexagones équin-angulaires [2,9].

Une illustration de cette présentation est donnée en prenant l'équation de Laplace (I.9) en 2 dimensions définie dans le domaine donné.

II.2.2.3. Transformation de l'équation différentielle

Dans le cas du maillage carré, on peut extraire un point centrale ses quatre voisins numérotés de 1 à 4 (voir Figure (II.2)), chacune des branches de l'étoile a une longueur égale à $\Delta x = \Delta y = h$.

En un point quelconque du segment $[P_1 - P_3]$, le potentiel V peut être exprimé en fonction du potentiel au point central et de ses dérivées successives. On utilise pour cela le développement en série de Taylor au voisinage du point central ($x = x_0$)

$$V = V_0 + \sum_{n=1}^{\infty} \left(\frac{(x - x_0)^n}{n!} \frac{\partial^n V}{\partial x^n} \Big|_{x_0} \right) \quad (\text{II.2})$$

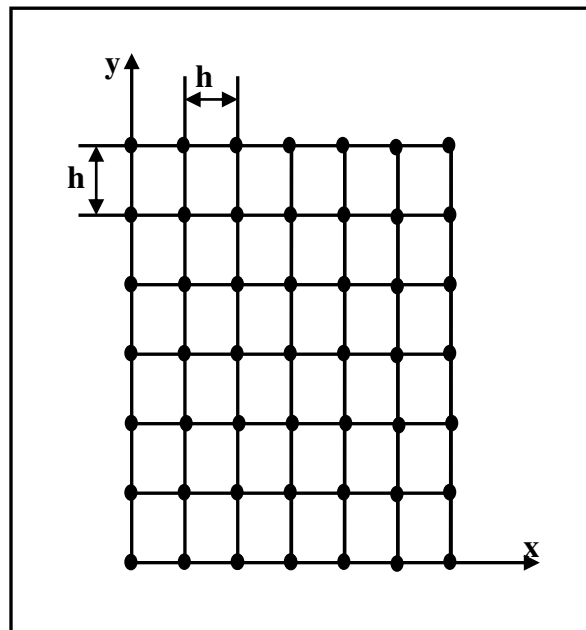


Figure II-1: Maillage carré

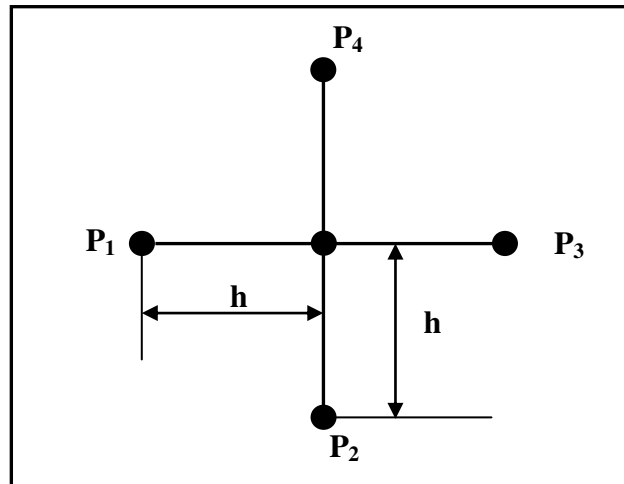


Figure II-2 : Point central et ses voisins

Pour le point P_1 on a : $x = x_0 - h$ et :

$$V_1 = V_0 + \sum_{n=1}^{\infty} \left((-1)^n \frac{h^n}{n!} \frac{\partial^n V}{\partial x^n} \Big|_{x_0} \right) \quad (\text{II.3})$$

Pour le point P_3 on a : $x = x_0 + h$ et :

$$V_3 = V_0 + \sum_{n=1}^{\infty} \left(\frac{h^n}{n!} \frac{\partial^n V}{\partial x^n} \Big|_{x_0} \right) \quad (\text{II.4})$$

En prenant h suffisamment petit (Δx tend vers 0), on peut négliger les termes d'ordre supérieur à deux soit [2, 9].

:

$$\left. \begin{aligned} V_1 &= V_0 - h \frac{\partial V}{\partial x} + \frac{h^2}{2} \frac{\partial^2 V}{\partial x^2} \\ V_3 &= V_0 + h \frac{\partial V}{\partial x} + \frac{h^2}{2} \frac{\partial^2 V}{\partial x^2} \end{aligned} \right\} \quad (\text{II.5})$$

En faisant la somme membre à membre de ces deux équations on aura :

$$\frac{h^2}{2} \frac{\partial^2 V}{\partial x^2} = V_1 + V_3 - 2V_0 \quad (\text{II.6})$$

Le même raisonnement, sur le segment $[P_2 - P_4]$, conduit à :

$$\frac{h^2}{2} \frac{\partial^2 V}{\partial y^2} = V_2 + V_4 - 2V_0 \quad (\text{II.7})$$

Si on cherche à résoudre l'équation de Laplace qui s'exprime en coordonnées cartésiennes par :

$$\frac{\partial^2 V}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 V}{\partial y^2} = 0 \quad (\text{II.8})$$

Alors, on remplace les différentes dérivées en utilisant les expressions (II.19) et (II.20)

Ce qui conduit à:

$$V_1 + V_2 + V_3 + V_4 - 4V_0 = 0 \quad (\text{II.9})$$

On obtient ainsi un système d'équations algébrique qui peut s'écrire sous forme matricielle :

$$[A]\{X\} = \{B\} \quad (\text{II.10})$$

Où $\{X\}$ est le vecteur formé par les inconnues en potentiel de tous les points intérieurs au domaine et $\{B\}$ le vecteur des conditions aux limites. La résolution du système (II.22) permet ainsi d'évaluer le potentiel en chacun des nœuds [2, 9].

II.2.3. méthode des charges fictives

Les champs électriques sont calculés en utilisant la méthode de simulation des charges. Elle est basée sur les notions des charges discrètes, son principe de base consiste à remplacer la distribution des charges électriques surfaciques des conducteurs par des charges fictives discrètes placées à l'intérieur des conducteurs. L'emplacement et la grandeur de ces charges fictives seront déterminés de manière à ce que leur effet intégré satisfasse aux conditions aux limites du potentiel de type Dirichlet connu sur la surface des conducteurs [9, 10].

La procédure d'application de la méthode des charges fictives pour le calcul du champ électrique est la suivante :

Etape 1 : Dans le but de déterminer la grandeur de ces charges, il faut choisir le nombre (n) et la position des charges contours sur la surface du conducteur et les et les charges fictives.

Etape 2 : on applique le principe de superposition, tel que la matrice du coefficient de potentiel de Maxwell de la ligne est calculée par la formule suivante.

$$P_{ij} = \frac{1}{2\pi\epsilon_0} \ln \left(\frac{\sqrt{(x_i - x_j)^2 + (y_i + y_j)^2}}{\sqrt{(x_i - x_j)^2 + (y_i - y_j)^2}} \right) \quad (\text{II.11})$$

Le potentiel V est calculé par la superposition des grandeurs de différents coefficients de potentiel et des charges fictives.

$$[V] = [P_{ij}] \cdot [q_j] \quad (\text{II.12})$$

P_{ij} : Le coefficient de potentiel dépendant des types de charges et de la distance entre les points i et j, c'est un paramètre réel de la ligne qui vérifie l'équation (II.11) écrite pour les complexes des potentiels et des charges électriques:

Etape 3 : La détermination des Équations de Maxwell pour les coefficients capacitifs (la matrice des valeurs des charges fictives), posées sous forme matricielle par la relation :

$$[q_j] = [c_{ij}] \cdot [V] = [P_{ij}]^{-1} \cdot [V] \quad (\text{II.13})$$

Les valeurs du potentiel sont des valeurs connues aux points i situés sur les contours des conducteurs, il s'agit d'une quantité complexe.

Avec :

V représente la valeur efficace de la tension électrique de phase (phase par rapport à la terre). la tension simple, En conséquence, la charge est également une quantité complexe:

$$\bar{q}_j = q_{jr} + j \cdot q_{ji} \quad (\text{II.14})$$

Etape 4 : Après avoir déterminer les valeurs des charges fictives on choisit n points de vérification situés aux frontières des conducteurs, et on calcule les nouveaux coefficients potentiels [9].

$$P_{vij} = \frac{1}{2 \cdot \pi \cdot \epsilon_0} \ln \left(\frac{\sqrt{(x_{iv} - x_j)^2 + (y_{iv} + y_j)^2}}{\sqrt{(x_{iv} - x_j)^2 + (y_{iv} - y_j)^2}} \right) \quad (\text{II.15})$$

Etape 5 : Les nouveaux potentiels qui correspondent aux nouveaux points contours sont calculés à l'aide de la formule suivante :

$$[V_{vi}] = [P_{vij}] \cdot [q_j] \quad (\text{II.16})$$

Etape 6 : L'écart entre le potentiel calculé V_{vi} et le potentiel réel V auquel sont soumis les conducteurs représentera la précision du calcul [9 ,10].

$$\epsilon = \left| \frac{V - V_{vi}}{V} \right| \cdot 100 \quad (\text{II.17})$$

Étape 7 : Si cette valeur est inférieure à la précision du calcul souhaitée alors on peut accéder au calcul du champ électrique. Sinon il faudra redistribuer les charges et refaire tous les calculs.

II.2.4. Méthode des images électrostatiques

La méthode des images, souvent utilisée, est un cas particulier d'un théorème, en électromagnétisme, connu sous le nom du théorème de l'équivalence.

Le concept fondamental derrière ce théorème est le suivant :

Il existe un nombre infini de sources qui peuvent être placées à l'intérieur d'une région de l'espace, tel qu'il se produit les mêmes champs en dehors de cette région. Par exemple, le champ extérieur d'un nuage de charge, de symétrie sphérique, de rayon a , et de charge totale Q est le même que celui due à une charge ponctuelle Q en son centre, ou à une surface uniforme de charge Q surtout la surface d'une sphère de rayon inférieur ou égal à (a) . Ces trois sources sont décrites dans la Figure. (II.3), elles sont équivalentes à l'égard de la région qui nous intéresse, dans ce cas, l'extérieur de la sphère. Il est possible de trouver des sources qui sont beaucoup plus simples que celle-ci. La méthode des images décharges au-dessus d'un plan conducteur est un exemple d'une grande utilité pratique [11 ,12].

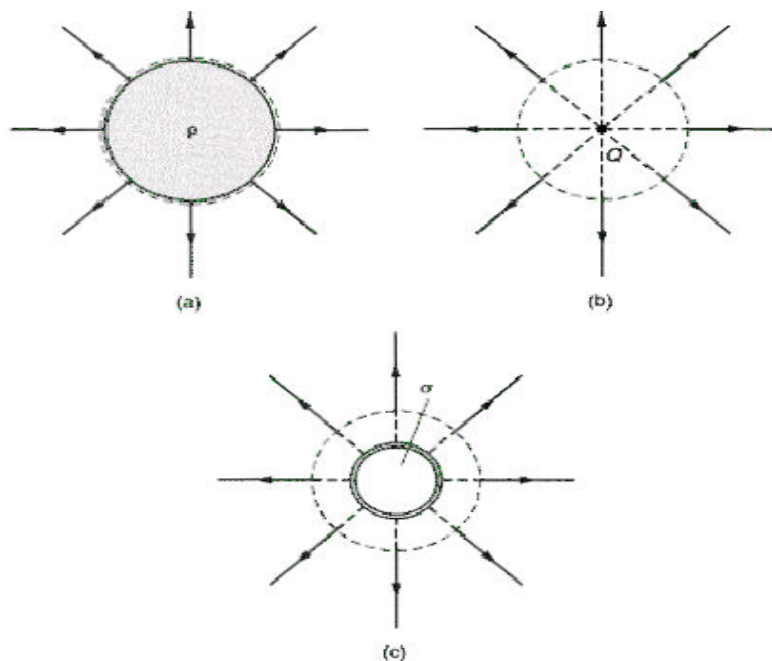


Figure II-3 : Distribution de Charges équivalentes pour la région en dehors de la surface sphère de rayon a : (a) sphère chargée en volume de rayon a , (b) charge ponctuelle, et (c) charge surfacique de la sphère de rayon $r < a$.

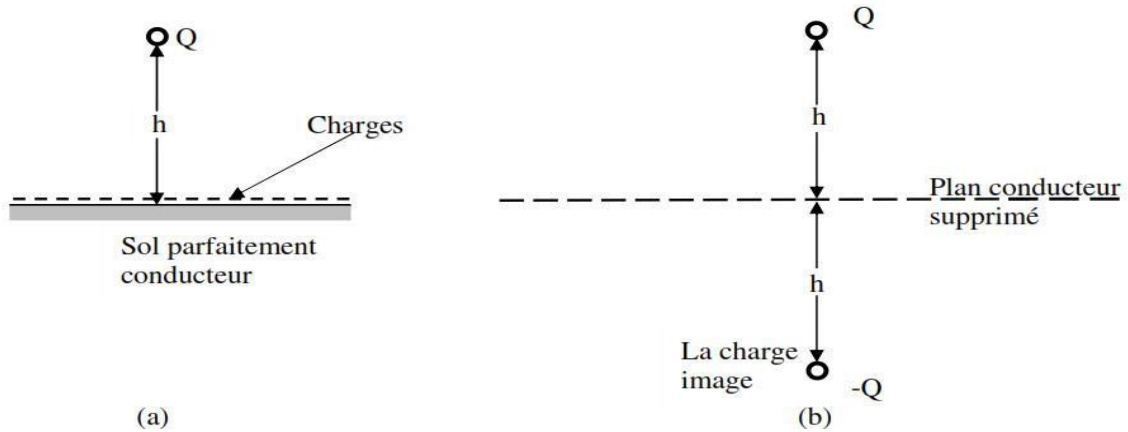


Figure II-4 : (a) Charge au-dessus d'un sol parfaitement conducteur, et (b) Charges induites sur le sol remplacé par une charge équivalente.

Soit une charge ponctuelle Q au-dessus d'un plan parfaitement conducteur constitué par une feuille conductrice "mise à la terre". La feuille est un équipotentiel. (Par exemple, ce peut être la surface de la terre, habituellement considérée en tant que potentiel de référence). Selon la loi de Gauss, une charge $-Q$ est induite sur la surface supérieure de la feuille (voir Figure. II-4 (a)).

Nous savons que la charge induite est distribuée de manière à annuler le champ électrique à l'intérieur de la feuille ainsi que le champ électrique tangentiel E sur la surface.

Nous ne savons pas, cependant, à quoi ressemble cette distribution, et donc, nous ne pouvons pas évaluer le champ qu'elle produit au-dessus de la feuille.

Bien qu'il soit possible de déterminer la distribution à partir d'une équation intégrale, il ait une façon beaucoup plus simple de le faire : Deux charges de même valeurs et de signe opposé génèrent un champ électrique tangentiel nul sur le plan de la symétrie de ces deux charges [11 ,12].

Ceci nous amène à la conclusion que la charge équivalente à toutes les charges inconnues induites, à l'égard de l'espace au-dessus du plan, est une seule charge ponctuelle $-Q$, placées de façon symétrique par rapport au plan. Ce système équivalent est décrit dans la Figure (II-4) (b). La source équivalente $-Q$, habituellement désignée par l'image de la charge Q dans le plan conducteur. Une fois le plan conducteur remplacé par l'image, le champ en dessous du plan de masse est différent de celui dans le système d'origine. Notons que, connaissant l'image, on peut également trouver la distribution des charges à la surface du plan conducteur [11 ,12].

Les images, de la distribution des charges au-dessus du plan conducteur, sont calculées de la même manière. Un exemple important est un fil à une hauteur h au-dessus du sol, ce peut être un conducteur d'une ligne électrique ou un câble de téléphone, avec une charge Q par unité de longueur. La source équivalente aux charges induites sur le sol est tout simplement un fil avec une charge $-Q$ par unité de longueur situé à une profondeur au-dessous du plan conducteur [11 ,12].

II.5. Calcul du champ électrique d'une ligne aérienne par la méthode des images

L'intensité du champ électrique est déterminée en régime électrostatique en utilisant le principe superposition des deux composants (réelle et imaginaire) des tensions électriques de la ligne. Une ligne électrique de transport présente un système de conducteurs soumis à un système triphasé symétrique de tensions électriques sinusoïdales de basse fréquence (50 Hz) [11 ,12].

Les champs électriques provenant des conducteurs et leurs images sont superposés en considérant leur amplitude et leur phase propres pour reproduire le champ électrique total résultant à une localisation déterminée,

Les conducteurs phases et les fils de garde de la ligne de transport sont considérés comme des charges linéiques infinies

La procédure d'application de la méthode des images pour le calcul du champ électrique est la suivante [11 ,12]:

- a- calcul des charges équivalentes par unité de longueur du conducteur.
- b- calcul du champ électrique produit par les charges ; en supposant les conducteurs infiniment longs, parallèles au sol.

La relation générale que l'on utilise pour calculer les charges portées par les conducteurs d'une ligne multifilaire est l'équation matricielle suivante:

$$[q] = [P]^{-1} \cdot [V] \quad (\text{II.18})$$

Avec:

[q]: la matrice des charges des conducteurs.

[V]: la matrice des potentiels (le sol est considéré au potentiel nul)

[P]: la matrice carrée des coefficients de capacités propres et mutuelles des conducteurs.

On considère le potentiel de référence nul ($V_0=0$ V) au niveau de la terre. Le système triphasé de tensions électriques sinusoïdales de séquence positive est donné par :

$$\begin{pmatrix} \overline{V_1} \\ \overline{V_2} \\ \overline{V_3} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 1 \\ a^2 \\ a \end{pmatrix} \cdot V = \begin{pmatrix} 1 + j0 \\ \frac{1}{2} + j\frac{\sqrt{3}}{2} \\ \frac{1}{2} - j\frac{\sqrt{3}}{2} \end{pmatrix} \cdot V \quad (\text{II.19})$$

-Pour calculer des coefficients de potentiels, en utilisant la méthode des images (figure II.6), on peut calculer les coefficients de potentiels avec les formules suivantes :

Les coefficients mutuels de potentiel des conducteurs.

$$P_{ij} = \frac{1}{2\pi \cdot \epsilon_0} \cdot \log_e \frac{D'_{ij}}{D_{ij}} \quad (\text{II.20})$$

Les coefficients propres de potentiel des conducteurs

$$P_{ij} = \frac{1}{2\pi \cdot \epsilon_0} \cdot \log_e \frac{2 \cdot h_i}{r_i} \quad (\text{II.21})$$

Avec:

$$D_{ij} = \sqrt{(x_i - x_j)^2 + (y_i - y_j)^2} \quad (\text{II.22})$$

$$D_{ij} = \sqrt{(x_i - x_j)^2 + (y_i + y_j)^2} \quad (\text{II.23})$$

Où :

r_i : rayon équivalent du conducteur

x_i : Abscisse du conducteur (i).

x_j : Abscisse du conducteur (j).

y_i : la hauteur du conducteur (i) à partir du sol.

Y_j : la hauteur du conducteur (j) à partir du sol.

$h_{i \text{ moy}}$: La hauteur moyenne du conducteur (i) à partir du sol.

ϵ_0 : permittivité de l'air.

A partir des formules (II.20) et (II.21), on forme la matrice des coefficients de potentiels soit :

[P i j].

Afin d'augmenter la capacité de transport des lignes haute tension, on utilise généralement un certain nombre de conducteurs par phase (Conducteurs en faisceaux).

Dans le cas où le conducteur phase est constituée d'un faisceau de 2 ou de plusieurs conducteurs de rayon r situés sur une circonférence de rayon R est équivalent à un conducteur fictif de rayon [11 ,12].

$$R_{\text{équivalent}} = d \cdot \sqrt[n]{\frac{n \cdot r}{d}} \quad (\text{II.24})$$

Où :

n : nombre de sous conducteurs du faisceau ;

r : rayon moyen du conducteur élémentaire du faisceau ;

d : rayon géométrique du faisceau

δ : la distance entre deux sous conducteurs consécutives.

Le rayon équivalent du faisceau est le rayon d'un conducteur cylindrique unique, fictif, qui aurait les mêmes capacités que le faisceau réel par rapport à tous les autres conducteurs avoisinants.

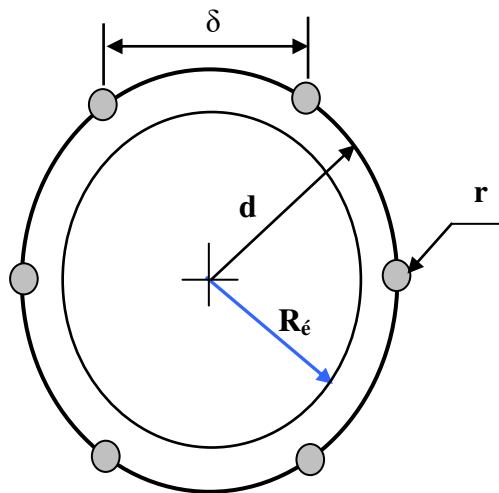


Figure II-5 : Faisceau de conducteurs

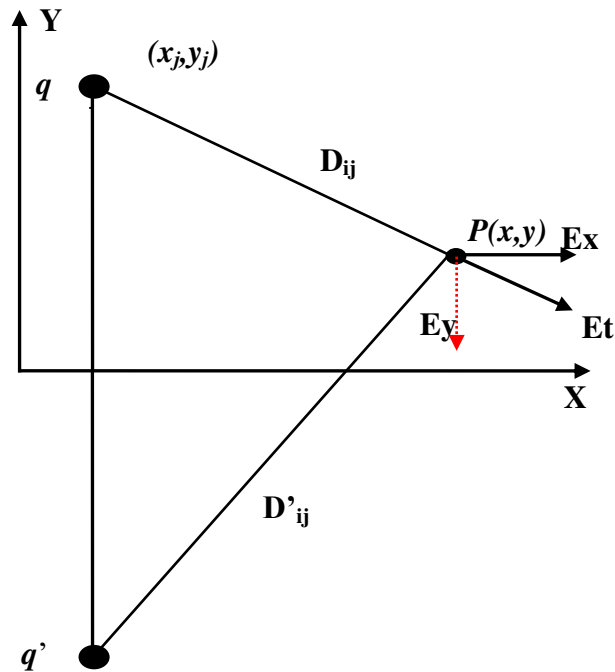


Figure II-6 : Conducteurs i et j avec les images i' et j' utilisées pour le calcul des coefficients de potentiel

Le champ électrique résultant à proximité d'une ligne de transmission peut être calculé en représentant l'effet de la terre par l'image des charges situées au-dessous des conducteurs à une profondeur égale à la hauteur du conducteur.

Les coordonnées du conducteur sont (x_j, y_j) , les coordonnées de son image sont $(x_j, -y_j)$.

Connaissant les charges linéiques portées par les conducteurs (ou les faisceaux), qui sont disposées perpendiculairement au plan xy , il est très aisé d'obtenir l'intensité du champ électrique total issu des trois champs électriques partiels générés par les conducteurs en un point via le théorème de Gauss.

Les composantes E_x et E_y de l'intensité du champ électrique en tout point (x,y) suivant le principe de superposition s'expriment par les relations suivantes (voir figure II-7) [11, 12]:

$$E_x = \frac{q}{2\pi \cdot \epsilon_0} \left\{ \frac{x - x_i}{(x - x_i)^2 + (y - y_i)^2} - \frac{x - x_i}{(x - x_i)^2 + (y + y_i)^2} \right\} \quad (\text{II.25})$$

$$E_y = \frac{q}{2\pi \cdot \epsilon_0} \left\{ \frac{y - y_i}{(x - x_i)^2 + (y - y_i)^2} - \frac{y + y_i}{(x - x_i)^2 + (y + y_i)^2} \right\} \quad (\text{II.26})$$

La résultante des composantes E_x et E_y de l'intensité du champ électrique en (x, y) est donnée par la relation suivante.

:

$$E_T = \sqrt{E_x^2 + E_y^2} \quad (\text{II.27})$$

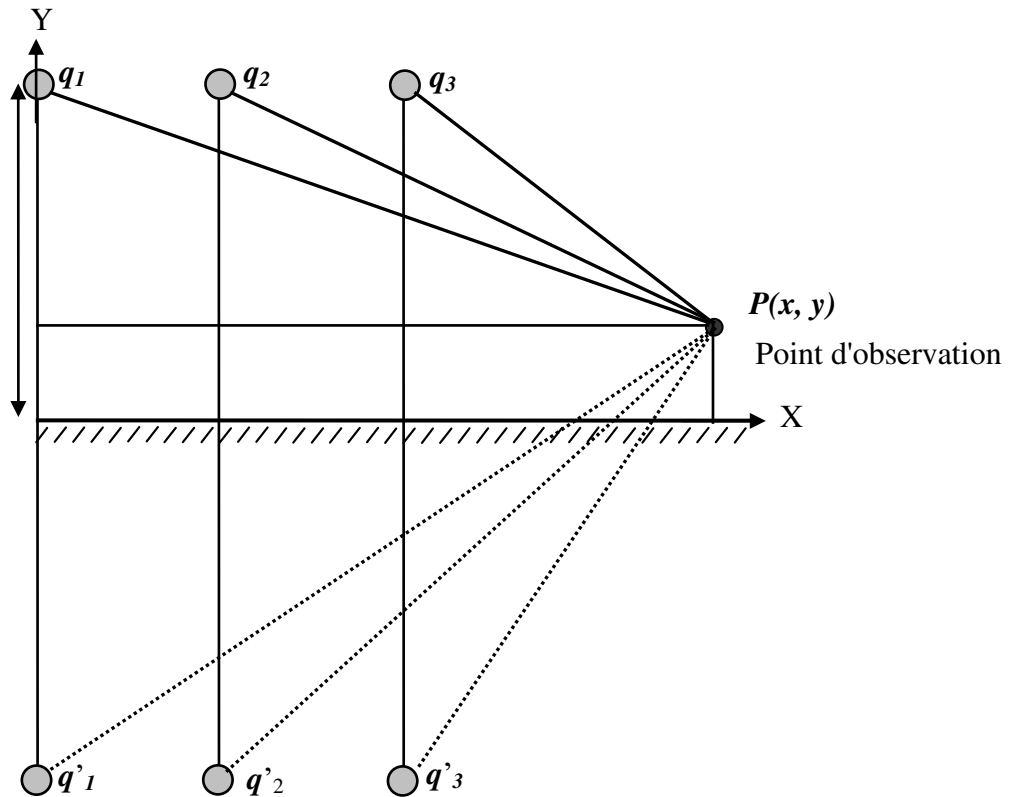


Figure II-7 : Représentation du champ électrique généré par
Les conducteurs d'une ligne triphasée et ses images.

II.6. Réduction du champ électrique généré par une ligne aérienne (Effet d'écrans)

Il existe en général deux moyens pour réduire l'intensité du champ électrique sous les lignes:

Le premier est un choix convenable de la hauteur des pylônes, déterminant la hauteur des conducteurs de phase au-dessus du sol, associé à la disposition la plus favorable des indices horaires des tensions ; le second est l'utilisation de conducteurs jouant le rôle d'écrans, placés entre les conducteurs de phase et le sol [13].

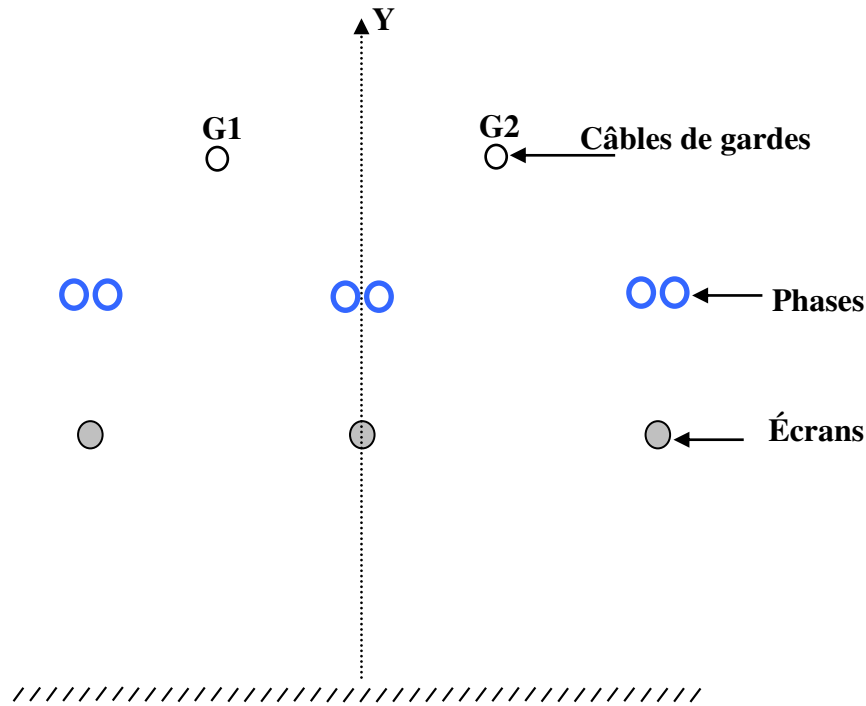


Figure II-8. Disposition géométrique des conducteurs phases et écrans d'une ligne triphasée HT

Pour calculer la réduction du champ électrique obtenu par la mise en place des conducteurs-écrans, on utilise la méthode des images, on incorpore les caractéristiques de position des conducteurs dans la matrice des coefficients de potentiel.

On calcule les charges portées par tous les conducteurs en prenant soin d'affecter aux conducteurs écrans le potentiel $V=0$, puis on calcule le profil du champ électrique résultant. On peut aussi utiliser comme écrans les conducteurs d'une ligne de plus faible tension placée sous la ligne à très haute tension. Il faut évidemment leur affecter leur potentiel réel.

II.7. Champ électrique superficiel des conducteurs

Pour calculer le champ électrique superficiel des conducteurs d'un faisceau, on détermine d'abord la charge totale Q de celui-ci, en introduisant son rayon équivalent $R_{\text{équivalent}}$ dans les expressions des coefficients du potentiel. Le gradient moyen d'un conducteur est alors donné par [14]:

$$E_{\text{moy}} = \frac{1}{n} \frac{Q}{2\pi\epsilon_0} \quad (\text{II.28})$$

Puisque la charge totale du faisceau se répartit également sur les n conducteurs du faisceau. Mais, par effet de blindage mutuel, le gradient réel est plus important vers l'extérieur, et plus faible vers l'intérieur du faisceau. On définit donc le champ maximal et le champ minimal des conducteurs, obtenus respectivement par les expressions [14] :

$$E_{max} = E_{moy} \left[1 + \frac{(n-1)r}{R} \right] \quad (\text{II.29})$$

$$E_{min} = E_{moy} \left[1 - \frac{(n-1)r}{R} \right] \quad (\text{II.30})$$

On admet généralement que le champ varie autour du conducteur de la façon suivante [14] :

$$E_{\theta} = E_{moy} \left[1 + \frac{(n-1)r}{R} \cos \theta \right] \quad (\text{II.31})$$

Avec :

- r (cm) : rayon des conducteurs élémentaires,
- n : nombre de conducteurs élémentaires,
- R (cm) : rayon géométrique (rayon du cercle passant par les centres de tous les conducteurs),

II.8. Pertes par effet de couronne

Si le gradient de potentiel de la surface d'un conducteur dépasse la tension de claquage diélectrique de l'air ambiant, la zone proche de la surface du conducteur sera ionisée. Cette ionisation partielle est connue sous le nom de couronne (Corona). D'après Peek, la tension de claquage diélectrique de l'air lors de beau temps et aux conditions de (25 ° C et 70 cm de Hg) est d'environ 30 kV / cm. Pour déterminer le champ critique (champ d'apparition de l'effet couronne) d'un conducteur en faisceaux, on emploie généralement la formule de Peek, qui est la plus connue [1]. Elle a pour l'expression [14] :

$$E_c = \sqrt{3} g_o \cdot m_d \cdot \delta_r \cdot m_t \left(\frac{r}{\beta} \right) \cdot \ln \left(\frac{GMD_0}{r} \right) \quad (\text{II.32})$$

Avec :

$$\beta = \frac{1 + (n-1) \frac{r}{R_H}}{n}, \quad R_H = \frac{d}{2 \cdot \sin\left(\frac{\pi}{n}\right)}$$

md: est le coefficient de rugosité du conducteur, facteur tenant compte l'état de surface des conducteurs, il varie entre 0,83 et 0,87.

mt: est le coefficient météorologique, facteur tenant compte les conditions climatiques : pluie, neige,...

mt=1 poule temps sec.

mt = 0,8 pour temps humide

r : est le rayon du sous-conducteur en cm

GMD : est la séparation moyenne entre les phases en cm

β : est le facteur qui recueille l'effet de la disposition des conducteurs

n : est le nombre de sous-conducteurs par phase

d :est la distance de séparation entre les sous-conducteurs.

g_0 : le champ d'ionisation de l'air ≈ 30 kV/cm où 21.2 kV/cm en valeur efficace

δ : est le facteur de densité de l'air, Dans des conditions standard (pour $p = 76$ cm Hg et $t = 25$ °C), la valeur de $\delta = 1$.

L'effet couronne est une fonction du diamètre de conducteur, de la configuration de ligne, de type de conducteur et l'état de sa surface. Les conditions atmosphériques telles que la densité de l'air, l'humidité et le vent influence sur génération de l'effet couronne. Les pertes de puissance due à l'effet de couronne dans les temps de pluie ou de neige, sont beaucoup plus élevées que les pertes dans le beau temps.

L'effet corona peut être réduit en augmentant la taille de conducteur et l'utilisation des faisceaux de conducteurs. Peek à étudié l'effet de divers paramètres sur la perte de couronne et il en déduit une relation empirique:

$$P = \frac{242.2}{\delta_t} \times (f + 25) \times \sqrt{\frac{r}{GMD}} \times (E_{\max} - E_c)^2 \times 10^{-5} \text{ kW/km} \quad (\text{II.33})$$

Où :

f est la fréquence du réseau (Hz), δ le facteur de correction de la densité de l'air, Us la tension de fonctionnement en kV, E_c la tension disruptive critique (kV), r est le rayon des conducteurs (m) et GMD est la distance équivalente entre les conducteurs (m).

II.9. Conclusion

Nous avons exposé brièvement dans ce chapitre les principales méthodes numériques de résolution du champ électrique. La méthode des images a été appliquée pour calculer la distribution du champ électrique d'une ligne électrique de transport d'énergie, l'état d'équilibre des lignes électriques a été considéré lors du calcul du champ électrique. on minimise les valeurs du champ électromagnétique au voisinage des lignes HT par l'implantation des écrans électrostatiques. L'effet couronne désigne l'ensemble des phénomènes liés à l'apparition d'une conductivité d'un gaz dans l'environnement d'un conducteur porté à une haute tension par le phénomène d'ionisation, cette décharge peut entraîner des pertes d'énergie considérables.

Chapitre III

Résultant et interprétations

III.1. Introduction

Dans le chapitre précédent, nous avons présenté les bases qui ont permis de développer sous l'environnement MATLAB, la méthode de simulation du champ électrique d'une ligne aérienne de transport à THT.

Dans ce chapitre, nous exposons les résultats de simulation électromagnétique, en utilisant un programme développé pour le calcul du champ électrique produit sous et au voisinage d'une ligne aérienne de transport d'énergie électrique à haute tension pour simple et double circuit, avec des configurations différentes des phases dans des conditions normales d'exploitation. Ainsi nous pourrions voir l'évaluation de solutions d'atténuation du champ électrique, en installant des écrans électrostatiques pour réduire le champ électrique.

III.2. Champ électrique sous une ligne électrique triphasée aérienne

Utilisation de la méthode de calcul développée dans le chapitre 2, à travers le programme conçu, pour calculer et tracer l'allure du champ électrique à n'importe quelle distance transversale sous différentes configurations des conducteurs.

Considérons une ligne électrique aérienne triphasée à haute tension de 400 kV arrangée en nappe horizontale, chaque phase est constituée d'un faisceau horizontal de deux conducteurs séparés de 40 cm, la section utilisée est un câble en AMS à 61 brins de rayon extérieur de 14.31 mm, la section totale d'un sous conducteur est de $593,5 \text{ mm}^2$, le câble de garde est d'une section de 298 mm^2 , de rayon extérieur 11,2 mm.

L'arrangement et les coordonnées géométriques des conducteurs de chaque configuration, par rapport à eux-mêmes, au centre du pylône et au sol sont montrés dans la figure (III -1). Comme mentionné dans le chapitre II, dans le calcul du champ électrique, les conducteurs de la ligne électrique sont supposés horizontaux, droites et parallèles à un sol plat et passent par les centres de gravité de la parabole formée entre les deux pylônes de suspension, en utilisant la hauteur moyenne.

Le calcul du champ électrique dans notre étude est effectué à une hauteur à partir du sol de 1 m à partir du sol.

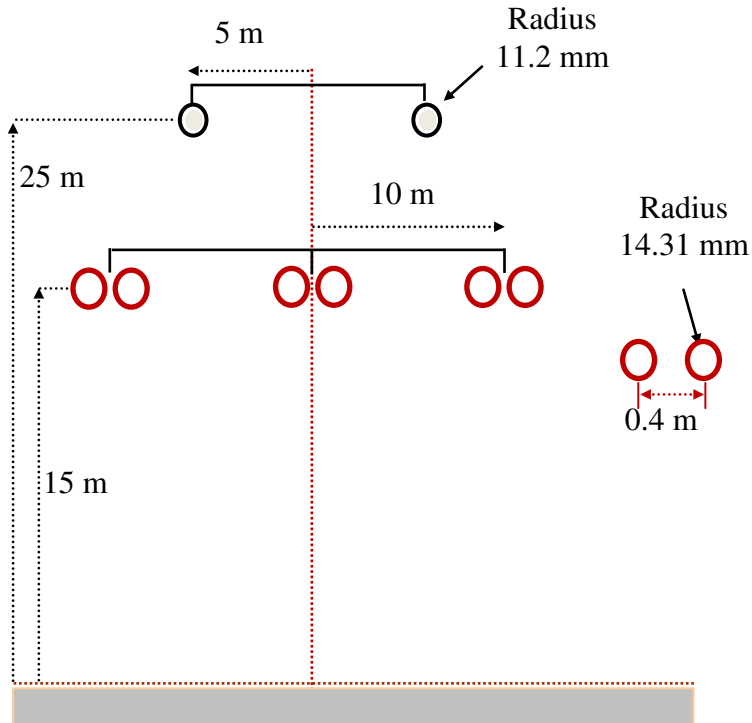


Figure III-1 : Géométrie d'une ligne électrique triphasée disposée en nappe horizontale

Dans le résultat montré dans la figure (III -2), pour cette ligne de 400 kV, on remarque que le champ électrique à 1 m du sol, à une valeur maximale $E= 3,88$ kV/m située à une distance trouvée sous et au voisinage du conducteur latéral. Cette figure également illustre que le champ électrique possède une valeur moins intense au point centrale des trois phases ($x =0$), à partir de ce point il augmente où il atteint un maximum pour une distance latérale de $x = \pm 13$ m, quand il s'éloigne de ce point positivement et négativement, l'intensité du champ électrique décroît exponentiellement en fonction du carré de la distance latérale pour atteindre une valeur négligée loin du centre de la ligne. Les deux composantes du champ électrique horizontal et vertical sont aussi illustrées par cette figure, comme la hauteur de calcul du champ électrique est proche du sol ($y=1$ m), la composante horizontale est négligée par rapport à la composante verticale.

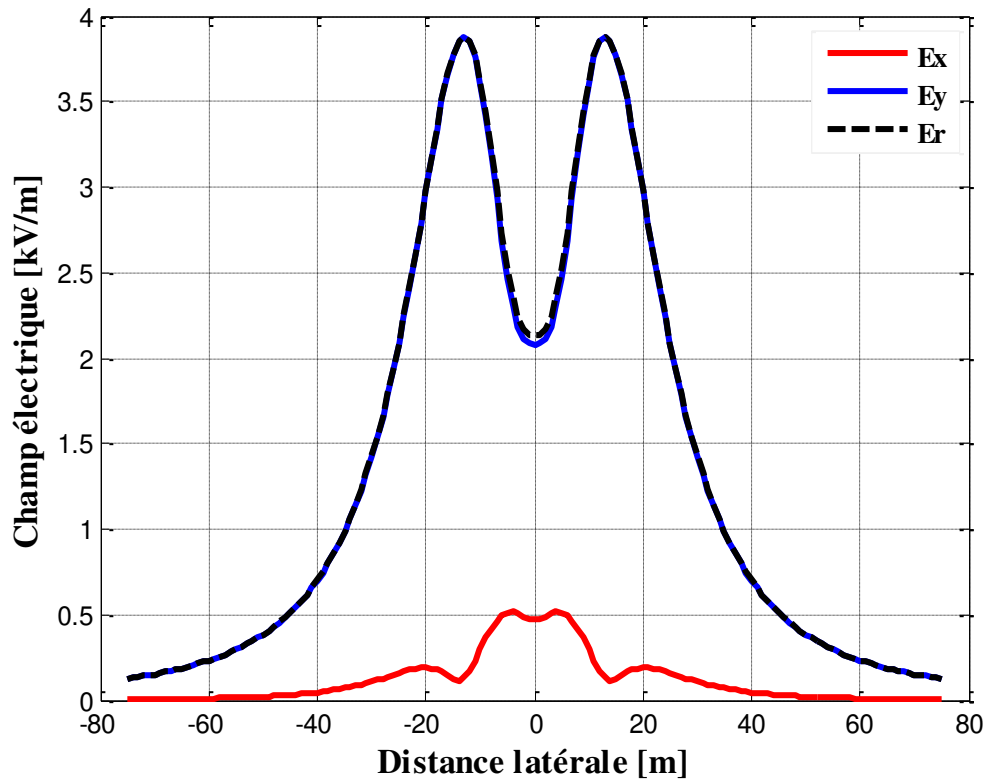


Figure III -2 : Profil du champ électrique à 1m du sol pour une ligne en nappe horizontale de 400 kV

La figure (III -3) montre la distribution latérale du champ électrique à 1m de hauteur au-dessus du sol pour les quatre niveaux de tension. Les valeurs maximales du champ électrique pour ces niveaux de tension sont respectivement, 2.69, 3.63, 3.88 et 4.85 kV. Il ressort clairement de cette figure que le champ électrique dépend directement du niveau de tension, plus la tension électrique de la ligne est grande, plus le champ électrique est intense.

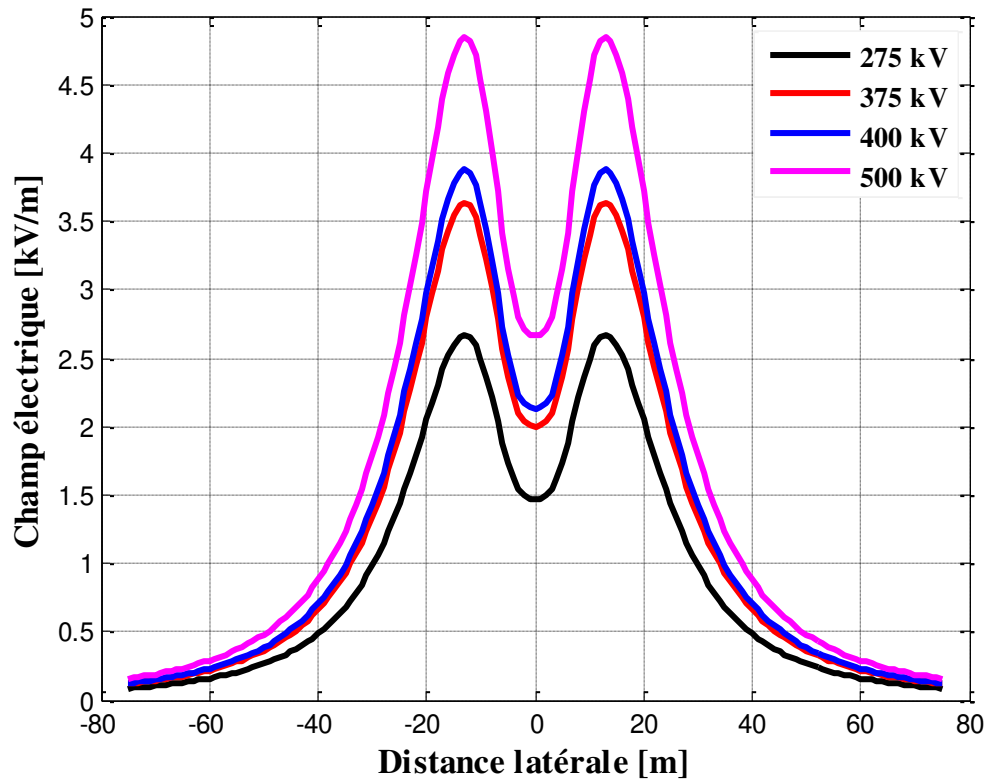


Figure III -3 : Profil du champ électrique à 1m du sol pour une ligne en nappe horizontale en fonction de plusieurs niveaux de tension

La figure (III -4) présente les résultats de simulation de la variation du champ électrique de la ligne à 1 m du sol en fonction de la distance de séparation entre les conducteurs. Comme montré dans cette figure, l'augmentation de la distance de séparation provoque une légère augmentation du champ électrique.

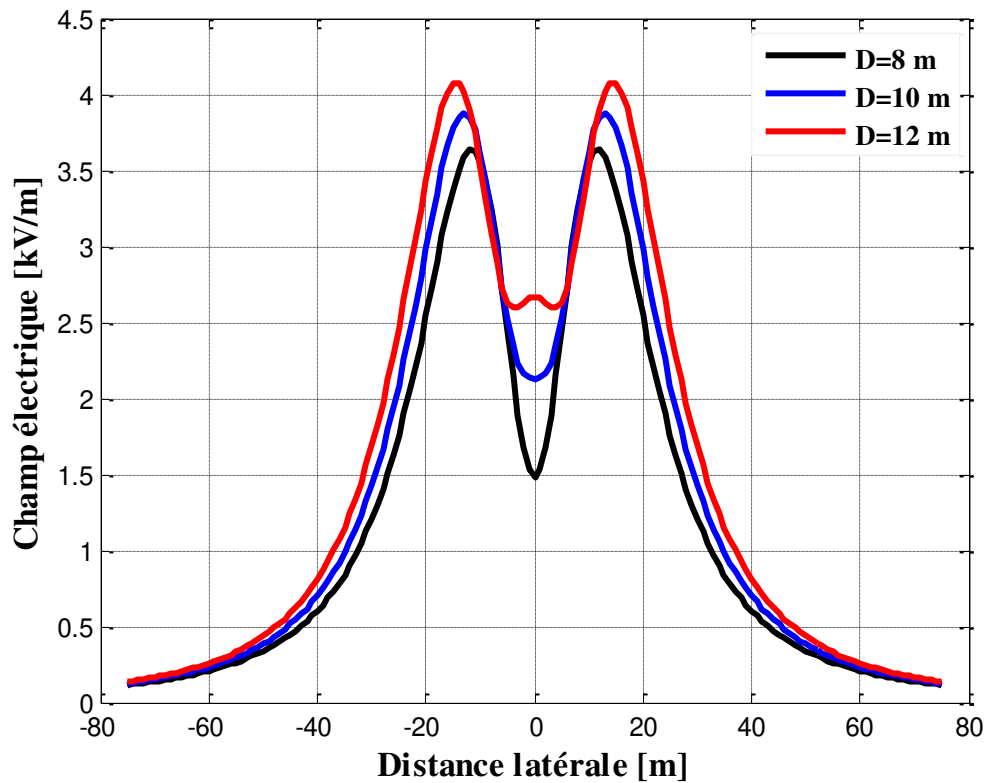


Figure III -4 : Profil du champ électrique à 1m du sol pour une ligne en nappe horizontale en fonction de la distance de séparation entre les conducteurs

La figure III-5 illustre les résultats de simulation de la variation du champ électrique de la ligne aérienne à 1 m au dessus du sol en fonction de de la hauteur des conducteurs au dessus du sol. Comme le montre le graphe de cette figure, la hauteur des conducteurs augmente, et par conséquent le champ électrique diminue significativement.

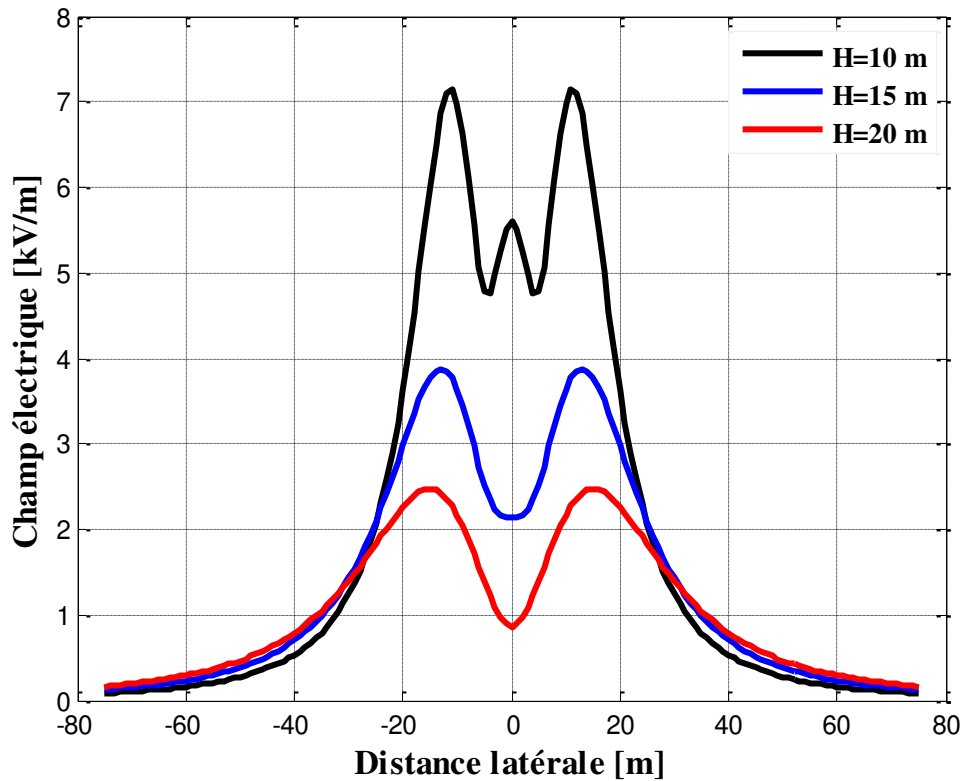


Figure III -5 : Profil du champ électrique à 1m du sol pour une ligne en nappe horizontale en fonction de la hauteur des conducteurs au dessus du sol

La figure III-6 décrit la variation du profil du champ électrique en fonction de la hauteur du point d'observation (le point où on veut calculer le champ électrique). On remarque que le champ électrique croît de manière continue avec l'augmentation de la hauteur du point de calcul du champ électrique.

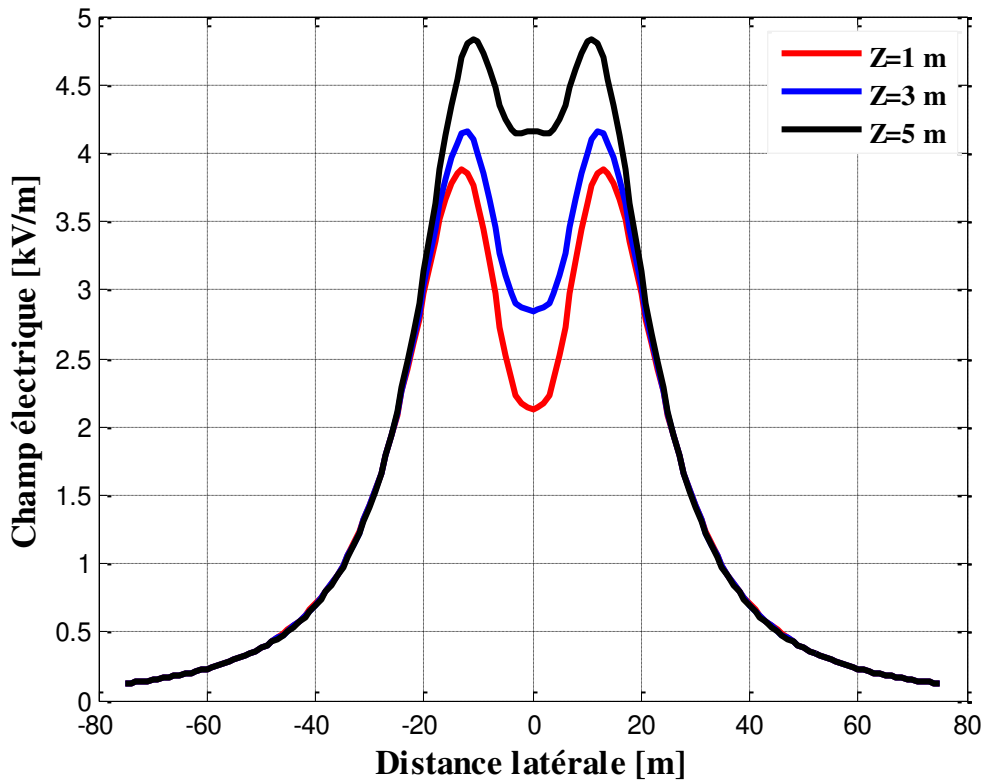


Figure III-6 : Profil du champ électrique d’une ligne en nappe horizontale en fonction de la hauteur du point d’observation

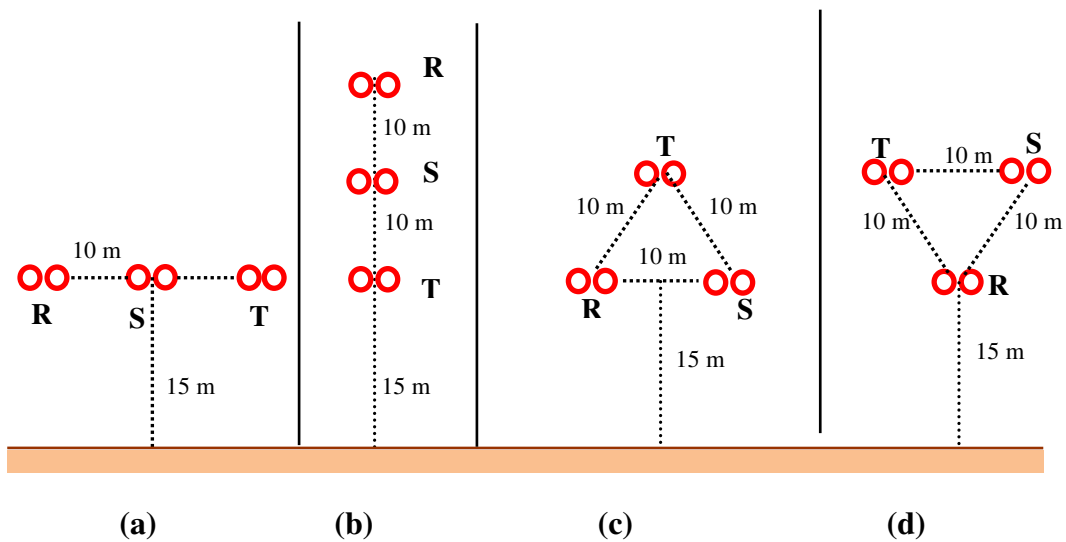


Figure III-7 : Représentation géométrique des différentes configurations d’une ligne électrique.
 (a) nappe horizontale, (b) nappe verticale, (c) triangle, (d) triangle inverse

Le changement dans la géométrie de la ligne peut affecter la valeur du champ électrique de la ligne électrique, nous allons maintenant examiner des différentes configurations de la figure III-7, nappe horizontale et verticale, triangle et triangle inverse.

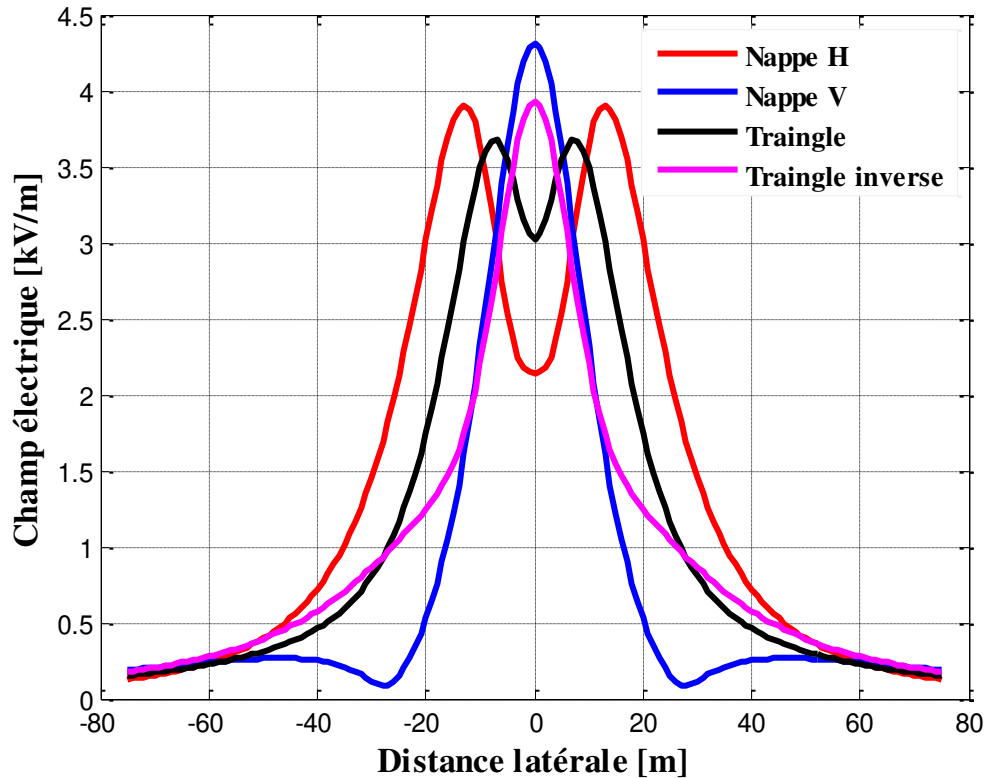


Figure III-8 : Profil du champ électrique à 1 m du sol pour des différentes configurations d'une ligne électrique

La figure III-8 représente la variation transversale du champ électrique, pour la configuration en nappe vertical et le triangle inversé, le point P correspond au point où la valeur du champ est maximale. La figure montre que la géométrie triangle possède le plus bas champ électrique maximal, par contre la valeur la plus élevée du champ maximal est sur la géométrie d'une ligne en nappe verticale.

Les valeurs maximales du champ électrique obtenues pour les différentes configurations à simple circuit sont indiquées dans le tableau III-1.

Champ électrique (kV/m)	nappe horizontale	nappe verticale	triangle	triangle inverse
E_{max}	3.91	4.31	3.67	3.93
P	13 m	0 m	7 m	0 m

Tableau III-1 : Valeurs maximales des champs électriques obtenus pour les différentes configurations à simple circuit

III.3. Réduction du champ électrique sous les lignes HT

Le blindage passif est fait par des conducteurs mis à la terre jouent le rôle des écrans électrostatiques, ces conducteurs sont installés au dessous des conducteurs phases avec le respect de la distance de sécurité, comme le montre la figure III.15.

Les câbles de garde et les conducteurs écrans étaient de même type, et de rayon extérieur 11,2 mm, La distance minimale entre conducteurs écrans et faisceaux de phases était de 5 m, les conducteurs écrans étant à 10 m au-dessus du sol.

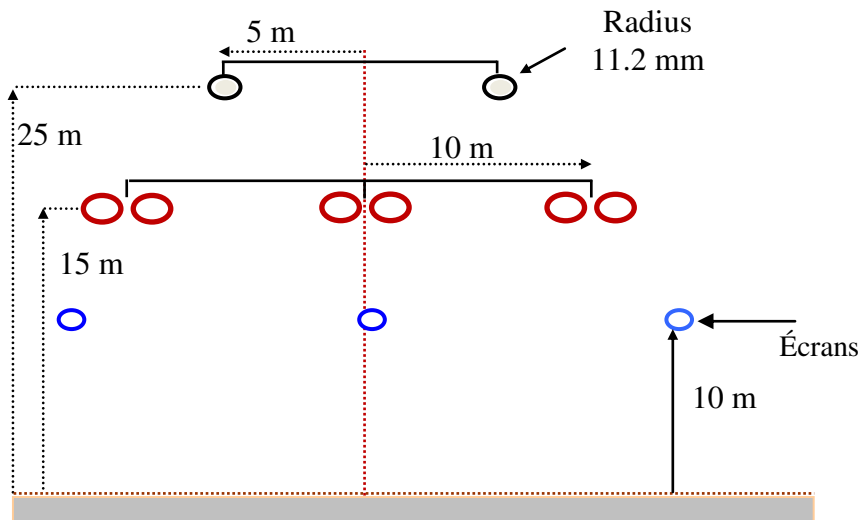


Figure III-9 Géométrie d'une ligne électrique triphasée disposée en nappe horizontale avec des écrans électrostatiques

L'efficacité de l'écran, exprimée par le rapport entre le champ électrique maximal original à 1 m au-dessus du sol et le champ électrique en présence d'écrans électrostatiques.

Pour voir l'efficacité du nombre de conducteurs écrans sur la réduction du champ électrique, on a appliqué le programme que nous avons réalisé, en utilisant le milieu Matlab, pour différents nombres de conducteurs écrans, ce qui a donné le tableau III-2.

Nombre des conducteurs écrans	0	3	5	9	11	21
Champ électrique (kV/m)	3.88	2.54	2.44	2.27	2.24	2.15
Efficacité des écrans	1	1.53	1.59	1.71	1.73	1.8

Tableau III-2 : Efficacité du nombre des conducteurs écrans sur la réduction du champ électrique

Dans ce tableau, on a pris la valeur maximale du champ électrique pour la première configuration de base à 400 kV, ce qui correspond à 3,88 kV et en augmentant à chaque fois le nombre de conducteurs écrans, on voit une réduction significative du champ électrique.

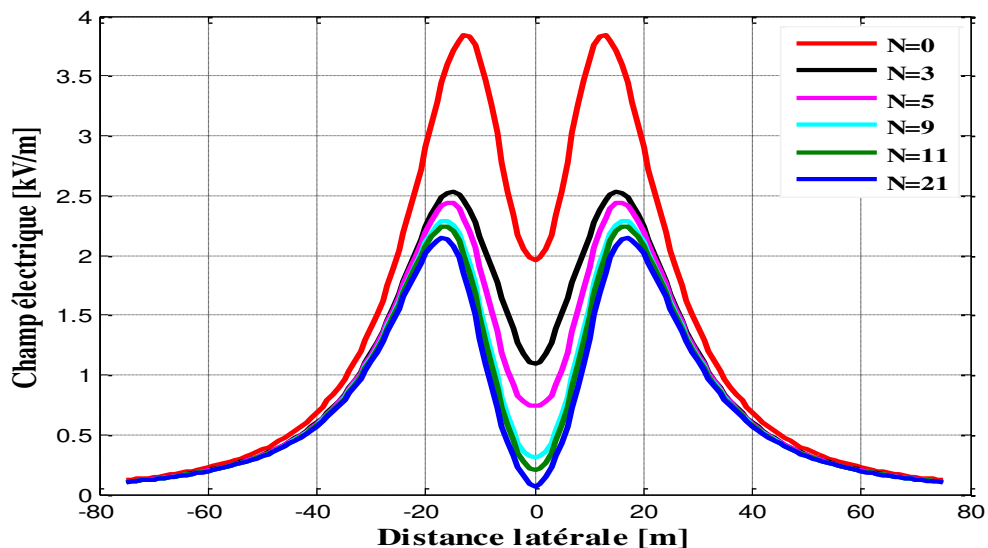


Figure III-10 : Champ électrique à 1 m du sol pour une ligne en nappe de 400 kV sans et avec les écrans électrostatiques

On constate d'après la figure (III.10) que l'augmentation du nombre des écrans permet une réduction appropriée du champ électrique au niveau de la distance latérale, mais cette réduction n'est pas proportionnelle avec le nombre des conducteurs écrans. Le blindage passif assure une meilleure réduction du champ électrique notamment avec l'augmentation du nombre des écrans conducteurs.

Malgré l'avantage présenté par les écrans électrostatiques, ces dernières peuvent avoir des inconvénients.

Il convient de noter que la présence des conducteurs-écrans a pour effet secondaire un accroissement du champ superficiel des conducteurs de phases, conformément au tableau (III-3)

Nombre des conducteurs écrans	0	3	5	9	11	21
Champ superficiel maximal (kV/cm)	17.6	18.29	18.47	18.81	19.10	19.31
Accroissement du champ superficiel (%)	1	3.9	4.9	6.9	8.5	9.7

Tableau III-3 : Influence des conducteurs écrans sur le champ électrique superficiel maximal

En conséquence, les conducteurs-écrans ont une influence sensible sur les pertes par effet de couronne, comme indiquée sur le tableau (III-4).

Nombre des conducteurs écrans	0	3	5	9	11	21
Pertes par effet de couronne (kW/phase/km)	0.0141	0.0145	0.0151	0.0158	0.0168	0.0180
Accroissement des pertes par effet de couronne (%)	0	2.83	7.1	12.06	19.15	27.66

Tableau III-4 : Influence des conducteurs écrans sur les pertes par effet de couronne

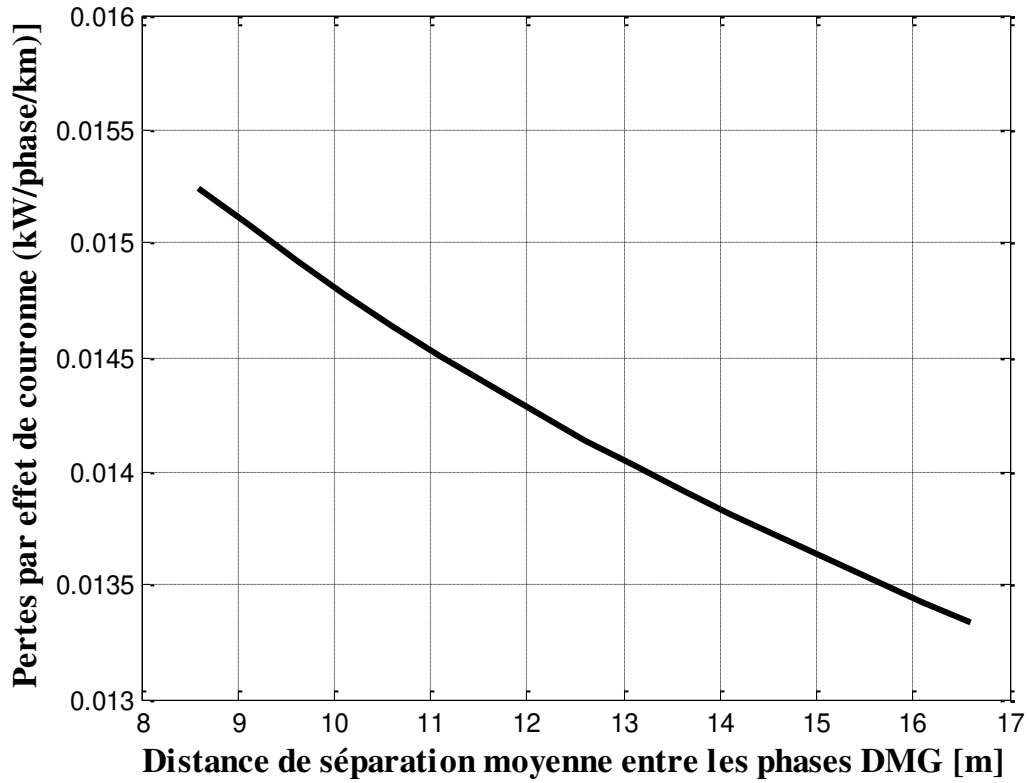


Figure III-16 : Pertes par effet de couronne en fonction de la distance de séparation moyenne entre les conducteurs

La figure (III-16) montre la variation de la perte par effet de couronne produite par la ligne électrique HT, en fonction de la distance de séparation moyenne entre les conducteurs de phase, comme est indiquée l'augmentation de la distance provoque la diminution des pertes par effet de couronne.

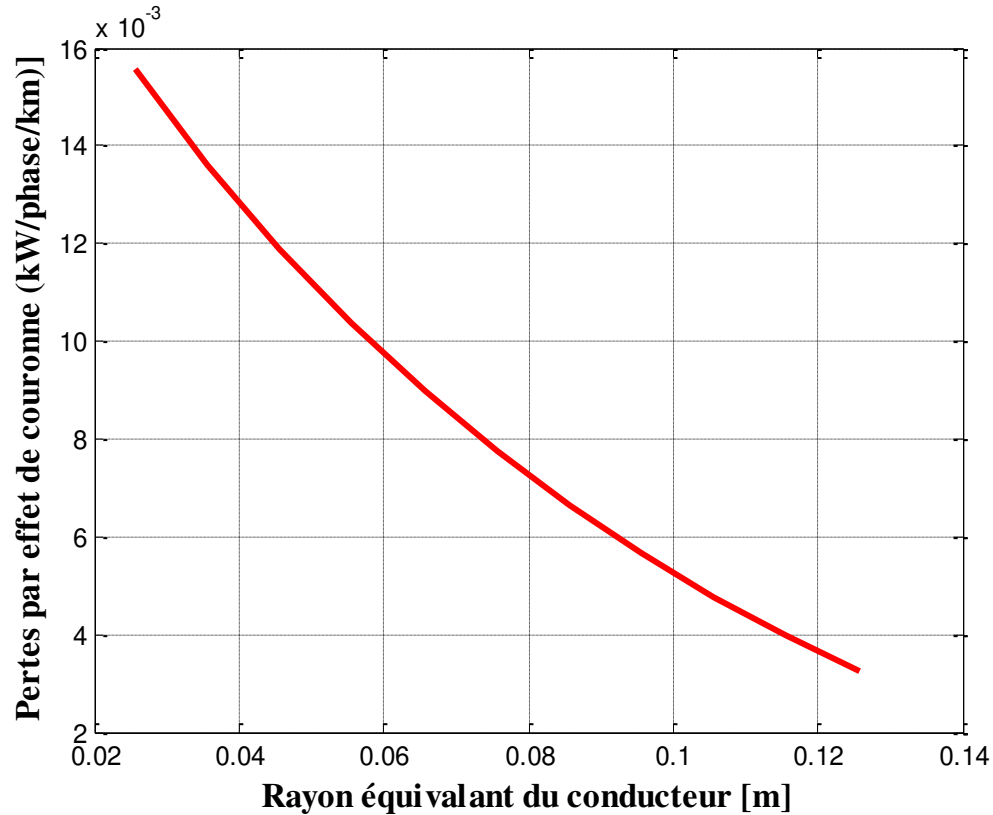


Figure III-17 : Pertes par effet de couronne en fonction du rayon équivalent du conducteur

Les résultats de simulation de la perte par effet de couronne en fonction du rayon équivalent du conducteur sont montrés par la figure (III- 17), on constate une diminution significative des pertes par effet de couronne avec l'augmentation du rayon du conducteur.

III.4. Conclusion

Ce chapitre a été consacré à la présentation des différents résultats obtenus par l'application de la méthode des images au calcul des champs électriques générées par les lignes électriques aériennes triphasées hautes tensions pour différentes configurations. Nous avons remarqué à travers les résultats obtenus que le champ électrique E varie en fonction de la distance latérale le long du droit de passage, le champ électrique possède une valeur moins inférieure sous la phase centrale, puis augmente pour atteindre une valeur maximale, à partir de ce point, il décroît avec l'augmentation de la distance latérale. Afin de réduire le champ électrique dans une zone

d'intérêt, la méthode la plus utilisée c'est d'implanter des conducteurs entre les phases et le sol agissent comme des écrans électrostatiques qui sont reliés directement au sol, le résultat montre que un nombre important des écrans diminuent suffisamment les valeurs du champ électrique. D'autre part, ces écrans électrostatiques augmentent le champ électrique superficiel des conducteurs de la ligne et les pertes par effet de couronne engendrées par la ligne électrique à haute tension.

Conclusion générale

La production, le transport et la distribution de l'énergie électrique forment la colonne vertébrale de l'économie d'un état industriel moderne, les lignes électriques considérées comme l'élément principale des réseaux de transport et de distribution d'électricité. L'évolution des pertes de distribution et de transport électricité avec l'évolution de la demande impose le passage à des niveaux de tension de plus en plus élevés, le dernier palier franchi est les 400 000 volts. Ces lignes de transport se comportent comme de gigantesques antennes émettrices pour des très intenses champs électromagnétiques qui peuvent affecter l'environnement les êtres vivant.

Notre travail consiste à déterminer précisément les valeurs du champ électrique générées par une ligne aérienne électrique à haute tension, afin de répondre aux préoccupations du public vis-à-vis les effets indésirables des champs électriques générés par ce réseau électrique. Afin de diminuer ou minimiser les effets négatifs du champ électrique au voisinage des zones urbaines massivement peuplées et près les points sensibles, une technique constructive de blindage passif permettre de réduire de manière significative ces émissions. On a remarqué que le champ électrique produit par la ligne électrique aérienne est plus intense dans une zone située sous cette ligne, il atteint son maximum sous et au voisinage de la phase latérale. Quand on s'éloigne de ce point, l'intensité du champ électrique décroît exponentiellement en fonction du carré de la distance latérale.

Il y a de nombreux facteurs qui affectent les valeurs des champs électriques produits par une ligne électrique aérienne à haute tension, il dépend principalement de la géométrie de la ligne électrique, c'est-à-dire la disposition des phases, le champ électrique dépend directement du niveau de tension, plus la tension électrique est grande, plus le champ électrique est intense, il dépend également de la distance mutuelle des conducteurs et avec la hauteur des conducteurs de phase à partir du sol.

Le blindage passif est caractérisé par son efficacité, il assure une meilleure réduction du champ électrique notamment avec l'augmentation du nombre des écrans conducteurs. D'une manière générale, le blindage peut provoquer des effets secondaires. Ces effets peuvent être distingués en deux catégories; l'augmentation du champ électrique superficiel des conducteurs, l'accroissement de l'intensité des pertes entraînées par l'effet couronne de conducteurs à très haute tension

Conclusion générale

En perspective, on suggère que cette étude pourrait être élargie à un calcul en trois dimensions pour simple et double circuit de lignes, également l'analyse de l'effet du blindage actif.

Annexe

Les normes d'exposition au champ électromagnétique d'une ligne aérienne à haute tension

Un intérêt particulier présente les effets négatifs des champs électriques et magnétiques de 50 ou 60 Hz engendrés par les lignes électriques de transport d'énergie électrique (HT et THT), Il a été un souci important dans les dernières années, comme l'augmentation continue de population humaine, et avec la tendance de se concentrer dans les grandes villes, a créé une demande sans précédent dans l'énergie électrique et accélérer la concentration des lignes de transport (HT et THT) près ou sur les zones très peuplées. L'exposition humaine aux champs électriques et magnétiques peut créer des effets potentiels négatifs sur la santé humaine et avec l'environnement. Les perturbations électromagnétiques associées sont limitées par les normes générales sur la compatibilité électromagnétique de la commission internationale de protection contre les rayonnements non ionisants (ICNIRP) et L'Association internationale de Radioprotection (IRPA) et par les directives 89/336, 92/31 et 93/68/CEE du Conseil de la Communauté Européenne. Généralement pour une fréquence de 50 HZ, Ces organisations recommandent une limite d'exposition (24 heures), pour le grand public, de 5 kV/m pour le champ électrique et de 100 μ T pour le champ magnétique. En ce qui concerne le milieu d'exposition professionnelle, ces recommandations sont respectivement de 10 kV/m et de 500 μ T. Les limites d'exposition aux champs électromagnétiques recommandées dans de nombreux pays sont dans l'ensemble très proches de celle de l'ICNIRP, qui est une organisation no gouvernementale (ONG) officiellement reconnus par l'OMS.

Population	Texte législatif et date d'application	Champ électrique (limites mesurables)	Champ magnétique (limites mesurables)
Public	Recommandation 1999/519/CE	5 kV/m	100 μ T
Travailleurs	Directive 2004/40/CE Applicable au 30 avril 2012	10 kV/m	500 μ T

Tableau I.3 Limites d'exposition en champ 50 Hz

- [1] A. Brahmia, A. Harid, Calcul et analyse de champ électromagnétique à proximité d'une ligne électrique haut tension, mémoire de Master, université 8 Mai 1945 Guelma, 2012.
- [2] Christophe Volât, Modélisation physique et numérique par la méthode des éléments finis des frontières de la distribution du potentiel et du champ électrique le long d'un isolateur standard de poste 735 KV recouvert de glace, Thèse de doctorat, l'université du Québec a Chicoutimi, juin 2002.
- [3] Touareb Wafa, Caractérisation de l'environnement électromagnétique au voisinage des lignes électriques haute tension, Thèse doctorat, Université de Annaba 2016.
- [4] P. Krempf : Précis Electromagnétisme, MP, Cours Méthodes Exercices résolus, Bréal 2004.
- [5] R.Meziant, S. Sahli, Calcul du champ électromagnétique généré par les réseaux électriques en vue de la compatibilité électromagnétique (CEM), Mémoire de Master, Université d'Abderrahmane Mira, Bejaia 2017.
- [6] Saad Djedjiga , Effet de la décharge couronne sur les surfaces isolantes et les surfaces métalliques, Mémoire de Magister, Université Mouloud Mammeri de Tizi Ouzou, Avril 2011.
- [7] KADI Hocine, Influence de l'effet couronne sur les surtensions dans les lignes et les transformateurs de haute tension, Mémoire Ingénieur d'Etat en Electrotechnique, Université Mouloud Mammeri Tizi-Ouzou 2012.
- [8] Nebair Hamza, Chabira Djamel Eddine, Calcul mécanique des lignes électriques ? Mémoire de Master, Université de Laghouat 2017.
- [9] Djekidel .Rabah. Application de la méthode des charges fictives sur l'équipement haute tension pour calcul de champ électrique, Thèse de Magister, Université des Sciences et de la technologie d'Oran Mohamed Boudiaf, 2010.
- [10] Amiri Rabie, Calcul et analyse du champ électrique au voisinage d'une ligne haute Tension, Thèse de Magister, Université des Sciences et de la technologie d'Oran Mohamed Boudiaf, 2006.
- [11] M. Brahami, A. Bendaoud, H. Sayah, Pr. P. Pirotte, Calcul du champ électromagnétique au voisinage des lignes THT par la méthode CIGRE, Laboratoire de Conversion d'Energie et Commande LACEC UDL de Sidi Bel Abbès Algérie, Service Transport et Distribution d'Energie Electrique, Institut Montéfiore

Université de Liège, Belgique.

[12] Mehdi Hicham, Étude des problèmes de compatibilité électromagnétique liés au passage en 400 kV des lignes de transport d'énergie électrique, Thèse de Magister, Université des Sciences et de la technologie d'Oran Mohamed Boudiaf, 2012.

[13] Cigré, Group de travail, 36.01, (Interférences et champs), Champs électriques et magnétiques engendrés par les réseaux de transport. Exemple de calcul des perturbations électromagnétiques par la méthode CIGRE, Travail 21-43, 1980, Paris.

[14] Claude GARY, Effet couronne sur les réseaux électriques aériens, Techniques de l'Ingénieur D4440, traité Génie électrique.

[15] Transmission line reference book 345kV and above , EPRI Report 2ème edition