

الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية
LA RÉPUBLIQUE POPULAIRE DÉMOCRATIQUE D'ALGÉRIE
وزارة التعليم العالي و البحث العلمي
LE MINISTÈRE DE L'ENSEIGNEMENT SUPÉRIEUR ET DE LA RECHERCHE
SCIENTIFIQUE
جامعة عمّار تليجي بالأغواط
UNIVERSITÉ AMAR TELIDJI DE LAGHOUAT
كلية التكنولوجيا
FACULTÉ DE TECHNOLOGIE
DÉPARTEMENT D'ÉLECTROTECHNIQUE



Mémoire de maîtrise

Domaine : Science et technologie
Filière : Électrotechnique
Option : ELTI

Présenté par :

**Sahnoune Mohamed Ayoub
Allaoui Radouane**

THEME

Interférences électrostatiques entre une ligne aérienne à Haute Tension et un corps humain

Soutenu publiquement devant un jury composé de:

<i>Mr. Mkhanaat Mohamed</i>	<i>M.C.A</i>	<i>Président</i>
<i>Mr. Hadjadj Abdechafik</i>	<i>M.C.A</i>	<i>Examineur</i>
<i>Mr. Djekidel Rabah</i>	<i>M.C.A</i>	<i>Promoteur</i>
<i>Mr. Bessedik Sid Ahmed</i>	<i>M.C.A</i>	<i>Co-promoteur</i>

Année académique 2019/2020

ملخص:

تنقل شبكة الطاقة الكهربائية الكهرباء التي تنتجها محطات توليد الكهرباء على مدى مسافات طويلة باستخدام خطوط الجهد العالي. علاوة على ذلك اهتماما كبيرا أعطي لشبكات نقل الطاقة الكهربائية بسبب القيم العالية للمقادير الكهربائية. أصبحت الحاجة إلى تحديد مستوى المجال الكهربائي المشع في محيط شبكات الجهد العالي والتحكم فيه أمراً ضرورياً. كان هناك قلق متزايد بين عامة الناس على مدى العقدين الماضيين بشأن الآثار الضارة المحتملة للتعرض لمجالات كهربائية ومغناطيسية منخفضة التردد. تم تخصيص هذه الرسالة لتحليل قيم المجال الكهربائي عند تردد الطاقة الكهربائية بالقرب من خطوط الهوائية عند الجهد العالي جداً والمقادير المختلفة التي تؤثر على هذا المجال الكهربائي، ثم صياغة تحليلية لتقدير كثافة التيار المستحث على سطح جسم الإنسان. أخيراً، تتم مقارنة النتائج التي تم الحصول عليها مع حدود السلامة لعامة الناس الموصى بها بواسطة المعايير الدولية.

كلمات مفتاحية: المجال الكهربائي، جسم الإنسان، كثافة التيار المستحث، خطوط نقل الطاقة الهوائية، الجهد العالي.

RESUME:

Le réseau de transport de l'énergie électrique achemine l'électricité produite les centrales électriques sur de longues distances grâce à des lignes à Très Haute Tension. Un intérêt particulier est donné aux réseaux de transport d'énergie électrique en raison des valeurs très importantes des grandeurs électriques. La nécessité de quantifier et maîtriser le niveau du champ électrique rayonné au voisinage des réseaux de haute tension est devenu indispensable. Les grands publics se préoccupent de plus en plus, depuis une vingtaine d'années, des effets nocifs potentiels de l'exposition aux champs électriques et magnétiques de fréquences extrêmement basse. Ce travail de mémoire est consacré à l'analyse du champ électrique à la fréquence industrielle au voisinage des lignes aériennes à très haute tension et les différents paramètres affectant ce champ, puis une formulation analytique pour l'estimation de la densité du courant induit sur la surface du corps humain. Enfin, les résultats obtenus sont comparés avec les limites de sécurité du grand publique recommandées par les normes internationales.

Mots-clés : Champ électrique, Corps humain, Densité du courant induit, Ligne de transport aérienne, Très haute tension.

ABSTRACT

The electrical energy transmission network carries the electricity produced by power plants over long distances using Very High Voltage lines. Particular interest is given to the electrical energy transport networks because of the very high values of electrical quantities. The need to quantify and control the level of the electric field radiated in the vicinity of high voltage networks has become essential. There has been growing concern among the general public over the past two decades about the potential harmful effects of exposure to extremely low frequency electric and magnetic fields. This memory is devoted to the analysis of the electric field at power frequency in the vicinity of overhead lines at very high voltage and the various parameters affecting this electric field, then an analytical formulation for estimating the density of the induced current on the human body surface. Finally, the obtained results are compared with the safety limits for the general public recommended by international standards.

Keywords: Electric field, Human body, Induced current density, Overhead transmission line, Very high voltage.

Remerciements

Avant tout, nous remercions notre Dieu le tout puissant de nous avoir donné la force d'atteindre notre but et d'accomplir notre travail.

Que nos remerciements les plus sincères s'adressent tout particulièrement à notre encadreur Monsieur Djekidel Rabah , qui nous a encadré durant tout le long de ce travail, pour leur disponibilité, leurs conseils, pour leur patience, leur soutien permanent et leurs encouragements qui nous ont permis de mener à bien ce mémoire.

Enfin on adresse tous nos remerciements les plus sincères à tous ceux qui ont contribué de près ou de loin à la concrétisation de ce travail.

Nos remerciements vont également à tous les personnes qu'on n'a pas citées et qui ont de près ou de loin participé à la réalisation de ce travail.

Sahnoune Mohamed Ayoub

Allaoui radouane

Dédicaces :

Je dédie ce modeste mémoire de master à :

Ma mère et mon père pour leur soutien

Mes sœurs et mes frères

À tout mon proche de la famille

Et à toute ma chère amie et mon collègue de l'université

Et à tous ce qui ont enseigné au long de ma vie scolaire

Sahnoune Mohamed Ayoub

Dédicaces :

Je dédie modestement ce travail à:

Mes parents qui méritent tous mon respect.

Mon frère et mes sœurs.

Mes Oncles, mes Tantes, Cousines, Cousins

la promotion de 2ème Année Master ELTI .

Tous mes amis.

Tous les gens qui m'ont encouragé.

Allaoui radouane

Sommaire

Introduction générale	1
Chapitre I : Étude bibliographique	
I.1 Introduction	3
I.2 formulation de Maxwell pour l'électromagnétisme	3
I.2.1. Équations de Poisson et de Laplace	5
I.3. Champ électromagnétique.....	5
I.3.1. Champ électrique	6
I.3.2. Champ magnétique.....	7
I.3.3. ondes électromagnétiques	7
I.4. problèmes de Compatibilité Electromagnétique (CEM).....	9
I.4.1. Définition de la Compatibilité Electromagnétique	9
I.4.2. perturbations électromagnétiques.....	9
I.4.3. Décomposition d'un problème de Compatibilité Electromagnétique	10
I.4.4. Émission et susceptibilité.....	11
I.4.4.1. Emission.....	11
I.4.4.2. Susceptibilité.....	11
I.5. modes de couplage	12
I.5.1. couplage par diaphonie capacitive	13
I.5.2. couplage par diaphonie inductive.....	14
I.5.3. couplage par impédance commune	15
I.5.4. couplage par champ électrique.....	16
I.5.5. couplage par champ magnétique	17
I.6. Directives et Normes de la CE.....	18
I.7 Effets des champs électromagnétiques sur la santé.....	18
I.7.1 Effets à court terme	18
I.7.2 Effets à long terme	19
I.8 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. Méthode des éléments finis de frontière (M.E.F.F).....	21
II.2.1.1. Principe	21
II.2.2.2. Formulation indirecte de la M.E.F.F.....	22
II.2.2.3. Formulation directe de la M.E.F.F.....	22
II.2.2. Méthode des Différences Finies (M.D.F)	22
II.2.2.1. Principe	22
II.2.2.2. Maillage de la géométrie.....	22
II.2.2.3. Transformation de l'équation différentielle	23
II.2.3. méthode des charges fictives	25
II.2.4. Méthode des images.....	28
II.3. Calcul du champ électrique d'une ligne aérienne par la méthode des images	30
II-4 Champ électrique d'une ligne aérienne à haute tension	35
II-5 Interaction entre une ligne aérienne à haute tension et le corps humain	38
II.6. Conclusion	39

Chapitre III : Résultats et interprétations

III.1. Introduction	40
III.2. champ électrique sous une ligne électrique triphasée aérienne	40
III.3. différents paramètres affectant le champ électrique	43
III.4. Calcul du champ électrique perturbé en présence du corps humain	53
III.5. Calcul de la densité de courant induit dans le corps humain.....	56
III.6. Conclusion	57
Conclusion générale	58
Références	60

Liste du figures

Figure I-1 : Champ électromagnétique.....	6
Figure I-2 : Effet d'un champ électrique E sur un fil	7
Figure I-3 : Effet d'un champ magnétique H sur une boucle	5
Figure I-4 : Propagation de l'onde électromagnétique	8
Figure I-5 : Systèmes « coupables » et « victimes »	11
Figure I-6 : Classement des différents niveaux de perturbations électromagnétiques	12
Figure I-7 : Principe du couplage par diaphonie capacitive	14
Figure I-8 : Principe du couplage par diaphonie inductive	15
Figure I-9 : Principe du couplage par impédance commune.....	16
Figure I-10 : Principe du couplage par champ électrique.....	17
Figure I-11 : Principe du couplage par champ magnétique.....	17
Figure II-1 : Maillage carré	23
Figure II-2 : Point central et ses voisins	23
Figure II-3 : Organigramme du calcul du champ électrique utilisant	27
Figure II-4 : Distribution de Charges équivalentes pour la région en dehors de la surface sphère de rayon a.	28
Figure II-5 : (a) charge au dessus d'un sol parfaitement conducteur, et (b) charges induites sur le sol remplacée par une charge équivalente.....	29
Figure II-6 : Faisceau de conducteurs	33
Figure II-7 : Conducteurs i et j avec les images i' et j' utilisées pour le calcul des coefficients de potentiel	33
Figure II-8 : Représentation du champ électrique généré par les conducteurs d'une ligne triphasee et ses images	34
Figure II-9 : Représentation des profils de l'intensité du champ électrique à proximité du sol pour différentes lignes typiques à un terme	36
Figure II-10 : Champ électrique (à gauche) et magnétique (à droite) produit par une ligne électrique.....	37
Figure II-11 : Corps humain expose a un champ électrique basse fréquence	38

Figure II-12 : Représentation des trois phases d'une ligne en nappe au-dessus du corps humain.....	39
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 275 kV	42
Figure III-3 : Cartographie du champ électrique généré par la ligne électrique à simple circuit unique de 275 kV	43
Figure III-4 : Profil du champ électrique à 1m du sol pour une ligne en nappe horizontale en fonction de plusieurs niveaux de tension	44
Figure III-5 : Profil du champ électrique à 1m du sol pour une ligne en nappe horizontale en fonction de la distance de séparation entre les conducteurs	45
Figure III-6 : 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	46
Figure III-7 : Profil du champ électrique d'une ligne en nappe horizontale en fonction de la hauteur du point d'observation	47
Figure III-8 : Profil du champ électrique en fonction des conducteurs du faisceau	48
Figure III-9 : Représentation géométrique des différentes configurations d'une ligne électrique.....	48
Figure III-10 : Profil du champ électrique à 1m du sol pour des différentes configurations à simple circuit d'une ligne électrique	49
Figure III-11 : Représentation géométrique des différentes configurations d'une ligne électrique à double circuit.....	50
Figure III-12 : Profil du champ électrique à 1m du sol pour des différentes configurations à double circuit d'une ligne électrique.....	51
Figure III-13 : Comparaison du champ électrique dans la disposition de différentes phases pour une ligne verticale à double circuit 275 kV	52
Figure III-14 : Modèle en 2D du corps humain.....	53
Figure III-15 : Profil latéral du champ électrique à 1 mètre au-dessus du sol avec la présence d'un être humain	54
Figure III-16 : L'effet de la position corps humain sur la distribution du champ électrique.....	55

Figure III-17 : Densité de courant produite dans un corps humain exposé à un champ électrique de fréquence industrielle56

Liste des tableaux

Tableau I-1 : Le seuil de perception du champ magnétique.....	19
Tableau II-1 : Limites d'exposition en champ 50 Hz.....	37
Tableau III-1 : Valeurs maximales des champs électriques obtenus pour les différentes configurations à simple circuit.....	50
Tableau III-2 : Valeurs maximales des champs électriques obtenus pour les différentes configurations à double circuit.....	51

Introduction Générale

Introduction générale

Un réseau électrique est un ensemble d'infrastructures permettant d'acheminer l'énergie électrique des centrales de production vers les consommateurs d'électricité. Il est constitué principalement de lignes électriques.

Les champs électriques créés par les lignes de transport à haute tension à la fréquence industrielle (50 et 60 Hz) à la fréquence industrielle (50 et 60 Hz) avec des niveaux plus élevée des tensions peuvent avoir des effets néfastes sur l'environnement et les êtres vivants (la santé humaine). 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 et il est souvent nécessaire de diminuer les valeurs de ces champs per les techniques de blindage passif et actif.

De nos jours, l'homme est exposé à une pollution électromagnétique qui résulte de l'utilisation toujours croissante de l'énergie électrique en basse fréquence, cette exposition devient de plus en plus importante à mesure que la technologie progresse et que les nouvelles applications se multiplient

En effet, s'il n'est pas question de remettre en cause les avantages énormes apportés par l'électricité dans la vie de tous les jours et notamment dans le domaine de la santé, les grands publics se préoccupent de plus en plus, depuis une vingtaine d'années, des effets nocifs potentiels de l'exposition aux champs électriques et magnétiques de fréquences extrêmement basse. Cette exposition résulte principalement du transport et de l'utilisation de l'énergie électrique aux fréquences de 50 et 60 Hz. L'organisation mondiale de la santé (OMS) étudie les problèmes de santé associés à l'exposition aux champs électromagnétiques dans le cadre du projet international.

L'objet de ce présent travail est d'analyser la distribution du champ électrique sous et au voisinage d'une ligne aérienne à haute tension et de déterminer la densité de courant induit sur la surface du corps humain.

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 électromagnétiques, également l'effet du champ électromagnétique sur la santé humaine.

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, aussi, la formulation qui permettra de déterminer la densité de courant induit sur la surface du corps humain.

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:

Étude bibliographique

I.1 Introduction

La haute tension est un terme qui caractérise, selon des normes européennes, les valeurs de la tension électrique supérieures à 1 000 volts en courant alternatif et 1 500 volts en courant continu.

La haute tension est un domaine très important dans les pays industriels, actuellement la haute tension est utilisée pour une large variété d'applications couvrant les systèmes d'alimentation, les lignes et les postes aériens de transport d'énergie électrique à de hauts niveaux de tension, dans l'industrie, la médecine et des laboratoires de recherche. Ces applications sont devenues indispensables à la civilisation moderne.

S'il n'est pas question de remettre en cause les avantages énormes apportés par l'électricité dans la vie quotidienne, le grand public se préoccupe de plus en plus, depuis une vingtaine d'années, des effets nocifs potentiels de l'exposition aux champs électriques et magnétiques de fréquences extrêmement basse. Cette exposition résulte principalement du transport et de l'utilisation de l'énergie électrique à haute tension aux fréquences de 50 et 60 Hz [1]. Ce chapitre vise à donner une vision générale des équations de Maxwell qui décrivent le comportement des champs électromagnétiques, une notion sur la compatibilité électromagnétique, La Compatibilité Électromagnétique (CEM) est la discipline qui étudie ces perturbations électromagnétiques (sources, causes, moyens de propagation, effets sur l'environnement, protection, etc...). Enfin, on représente les risques liés au champ électromagnétique à haute tension sur la santé humaine sur les lieux de travail. L'organisation mondiale de la santé (OMS) étudie les problèmes de santé associés à l'exposition aux champs électromagnétiques dans le cadre du projet international.

I.2 Formulation de Maxwell pour l'électromagnétisme

Dans l'électromagnétisme, les équations qui gouvernent la répartition du potentiel et des champs électrique et magnétique dans un milieu donné dérivent des équations de James Clerk Maxwell (1831-1879) dans le 19^{ème} siècle, c'est un physicien et mathématicien écossais (1873). Celles-ci sont formées par quatre équations aux dérivées partielles qui lient les phénomènes magnétiques caractérisés par le champ magnétique H (A/m) et l'induction magnétique B (Wb/m²) aux phénomènes électriques caractérisés par le champ électrique E (V/m) et l'induction électrique D (C/m²), tous ces champs sont des grandeurs vectorielles.

Ces quatre équations vectorielles aux dérivées partielles deux de couplage (I .1) et (I .2) et deux de conservation (I .3) et (I .4) sous intégrale ou locale (différentielle) sont [2,3] :

	Forme locale	Forme intégrale
Équation de Maxwell-Faraday	$\overrightarrow{rot} \cdot \overrightarrow{E} = -\frac{\partial \overrightarrow{B}}{\partial t}$	$e = -\frac{\partial \phi}{\partial t}$ (I .1)
Équation de Maxwell-Ampère	$\overrightarrow{rot} \overrightarrow{H} = \overrightarrow{J}_c + \frac{\partial \overrightarrow{D}}{\partial t}$	$\oint_C \overrightarrow{H} d\overrightarrow{l} = \sum_{i=1}^n I_i$ (I .2)
Équation de Maxwell-Gauss	$\overrightarrow{div} \overrightarrow{D} = \rho_v$	$\oiint_S \overrightarrow{D} d\overrightarrow{S} = Q_{int}$ (I .3)
Équation de Maxwell-Thomson	$\overrightarrow{div} \overrightarrow{B} = 0$	$\oiint_S \overrightarrow{B} d\overrightarrow{S} = 0$ (I .4)

Avec:

$$\phi = \iint_S \overrightarrow{B} d\overrightarrow{S} ; \quad e = \text{fem induite}$$

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

ρ_v : La densité volumique de charges (C/m^3).

On peut écrire ces équations sous forme différentielle. On passe de la forme différentielle à la forme intégrale en utilisant les théorèmes de Stokes et d'Ostrogradski.

On remarque dans la deuxième équation de Maxwell l'existence de deux sortes de courants \overrightarrow{J}_c et $\frac{\partial \overrightarrow{D}}{\partial t}$ Ceux-ci représentent respectivement les courants de conduction $\overrightarrow{J}_c = \sigma \overrightarrow{E}$ et le courant de déplacement ($\overrightarrow{J}_d = \frac{\partial \overrightarrow{D}}{\partial t} = \varepsilon \frac{\partial \overrightarrow{E}}{\partial t}$), la somme des deux courants $\overrightarrow{J}_c + \overrightarrow{J}_d$ constitue le courant total \overrightarrow{J}_t .

dans le cas statique, l'électrostatique est la branche de la physique qui étudie les phénomènes créés par des charges électriques statiques (charges au repos), et des forces qu'elles exercent entre elles, c'est-à-dire de leurs interactions électrostatiques (la loi de Coulomb), 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 [2,3].

I.2.1. Équations de Poisson et de Laplace

La divergence div est un opérateur différentiel qui transforme un champ vectoriel en champ scalaire. En remplaçant le champ électrostatique dans la forme locale du théorème de Gauss par le gradient du potentiel électrostatique, nous obtenons [2,3]:

$$\text{div } \vec{E} = \frac{\rho}{\varepsilon} = \text{div} \left(-\overrightarrow{\text{grad}} V \right) = \frac{\rho}{\varepsilon} \Rightarrow \Delta V + \frac{\rho}{\varepsilon} = 0 \quad (\text{I. 5})$$

Où:

$$\Delta V = \frac{\partial^2 V}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 V}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 V}{\partial z^2} = -\frac{\rho}{\varepsilon}$$

Le nouvel opérateur $\Delta \equiv \text{div } \overrightarrow{\text{grad}}$ est un opérateur différentiel qui transforme un champ scalaire en champ 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 :

$$\Delta V = 0 \quad (\text{I. 6})$$

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 [4].

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 [4].

I.3. Champ électromagnétique

Un champ est un phénomène physique d'échange d'énergie et de forces qui s'exercent à distance provoquant des effets induits sur des objets. Il se caractérise par son intensité et sa direction. Communément, il désigne la zone dans laquelle s'exerce le phénomène.

Dans l'électromagnétisme, les champs électrique et magnétique sont présents partout dans notre environnement. Toute utilisation de l'électricité génère un champ électrique et un champ magnétique.

Ces deux types de champs composent le champ électromagnétique. A proximité d'un réseau électrique à haute tension, la tension des conducteurs des lignes de transport produit un champ électrique dans l'espace entre les conducteurs et le sol. Le courant circulant dans les conducteurs d'une ligne de transport génère un champ magnétique dans l'air et le sol entourant la ligne de transport. L'intensité du champ électrique (ou magnétique) dépend en premier lieu de la tension (ou du courant), de la disposition et la distance de séparation des conducteurs, ainsi que de la hauteur des conducteurs par rapport au sol [5].

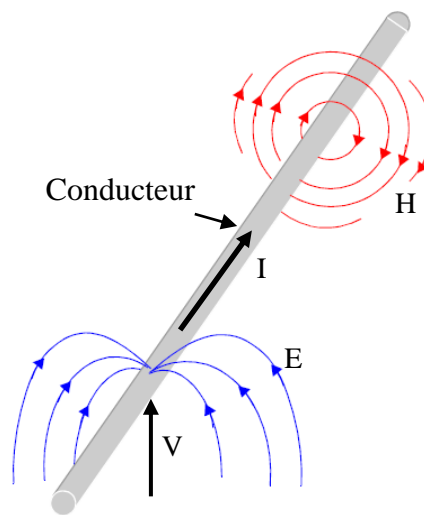


Figure I-1 : Champ électromagnétique

I.3.1. Champ électrique

Un champ électrique est produit par une différence de potentiel (ddp) entre deux points : plus la différence de potentiel est élevée, plus le champ qui en résulte est intense. Ce champ électrique survient même s'il n'y a pas de circulation de courant. Tout fil électrique sous tension produit un champ électrique dans son voisinage [5].

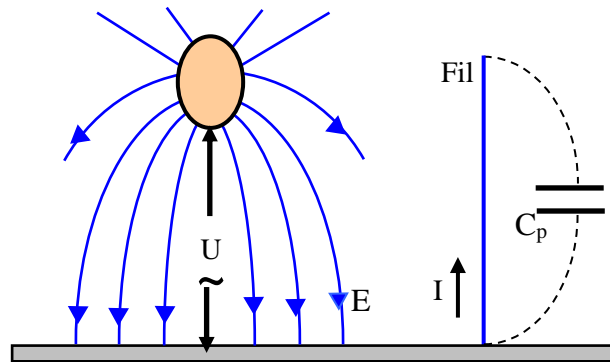


Figure I-2 : Effet d'un champ électrique E sur un fil

I.3.2. Champ magnétique

Le champ magnétique est provoqué par le déplacement de charges électriques. Il n'apparaît que lors du passage d'un courant électrique dans un conducteur. Plus l'intensité du courant est élevée, plus le champ magnétique est important [5].

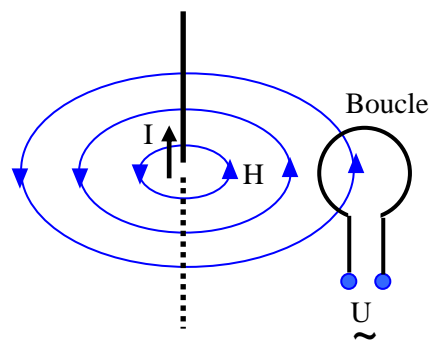


Figure I-3 : Effet d'un champ magnétique H sur une boucle

I.3.3. Ondes électromagnétiques

Une onde électromagnétique comporte à la fois un champ électrique et un champ magnétique oscillant à la même fréquence. Ces deux champs, perpendiculaires l'un par rapport à l'autre se propagent dans un milieu selon une direction orthogonale (figure ci-dessous).

La propagation de ces ondes s'effectue à une vitesse qui dépend du milieu considéré. Dans le vide, la vitesse de propagation est égale à 3.10^8 m.s^{-1} [6].

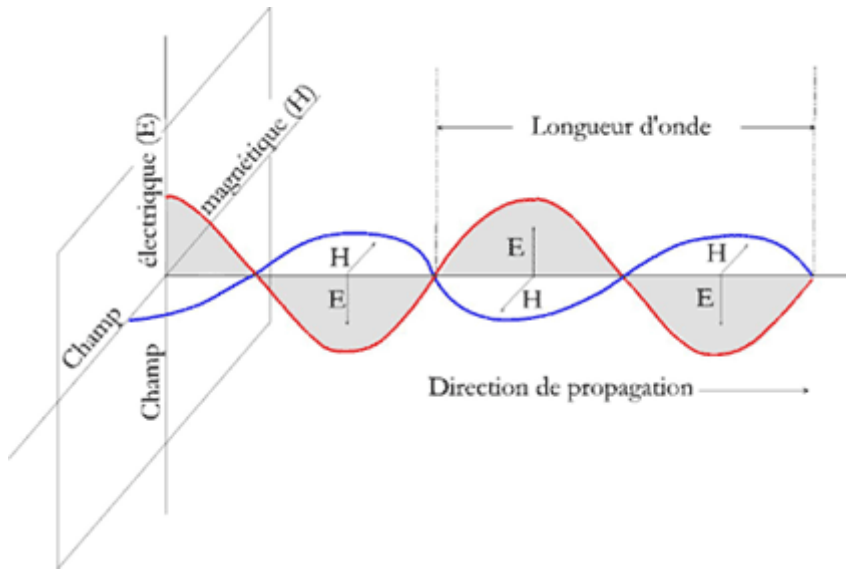


Figure I-4: Propagation de l'onde électromagnétique

Une onde électromagnétique est caractérisée par plusieurs grandeurs physiques :

- **La longueur d'onde (λ)** : elle exprime le caractère oscillatoire périodique de l'onde dans l'espace.
C'est la longueur d'un cycle d'une onde, la distance séparant deux crêtes successives. Elle est mesurée en mètre ou en l'un de ses sous-multiples, les ondes électromagnétiques utilisées en télédétection spatiale ayant des longueurs d'onde relativement courtes :
- **La période (T)** : elle représente le temps nécessaire pour que l'onde effectue un cycle. L'unité est la seconde
- **La fréquence (f)** : inverse de la période, elle traduit le nombre de cycles par unité de temps.
Elle s'exprime en Hertz (Hz) - un Hz équivaut à une oscillation par seconde - ou en multiples du Hertz, les ondes électromagnétiques utilisées en télédétection spatiale ayant des fréquences très élevées

Longueur d'onde et fréquence sont inversement proportionnelles et unies par la relation suivante :

$$\lambda = cT = \frac{c}{f \cdot \sqrt{\epsilon_r}} \quad (\text{I.7})$$

Où :

C : est la célérité de la lumière;

f : la fréquence d'oscillation de l'onde

ϵ_r : est la permittivité diélectrique relative du milieu, elle est égale à $\epsilon_r = \epsilon/\epsilon_0$

ϵ_0 : étant la permittivité du vide

L'effet du champ électromagnétique sur un récepteur dépend de la longueur d'onde émise par le champ électromagnétique et de la distance à la source. Cet effet peut être caractérisé par l'impédance du champ, définie par le rapport de l'amplitude de son champ électrique à celle de son champ magnétique. Elle est exprimée en Ohms.

$$Z = \frac{\vec{E}}{\vec{H}} \quad (\text{I.8})$$

I.4. Problèmes de Compatibilité Electromagnétique (CEM)

I.4.1. Définition de la Compatibilité Electromagnétique

CEM (compatibilité électromagnétique) recouvre tous les aspects de la pollution électromagnétique dans son environnement, la sécurité des biens et des personnes, en d'autres termes elle désigne toutes les perturbations d'ordre électrique qui peuvent être dommageables.

La Compatibilité Electromagnétique d'un dispositif électrique ou électronique quelconque est définie par son aptitude à fonctionner dans un environnement électromagnétique de façon acceptable et satisfaisante sans pour autant perturber, au-delà de certaines limites, ce qui se trouve autour de lui dans ce même environnement [5,6,7].

I.4.2. Perturbations électromagnétiques

On appelle « perturbation électromagnétique » tout phénomène électromagnétique susceptible de dégrader les performances d'un dispositif, d'un équipement ou d'un système. Ces perturbations peuvent être un bruit électromagnétique, un signal non désiré ou une modification du milieu de propagation

Une perturbation électromagnétique met en œuvre 3 éléments [5,6,7] :

- une source : elle génère la perturbation
- une victime : elle reçoit la perturbation
- un mode de couplage : le vecteur de propagation, qui transmet la perturbation de la source à la victime

Il existe de nombreuses sources éventuelles de perturbations. On peut les classer ainsi :

- Sources naturelles (foudre, rayonnements solaires, ...)
- Sources électrostatiques : elles apparaissent lors de la friction de matériaux entre eux (une personne, un ballon de baudruche, ...)
- Sources liées à l'activité humaine
 - Sources volontaires (émetteurs radio ou de télévision, antennes relais, radars, ...)
 - Sources involontaires (lignes haute tension, moteurs, ...)

I.4.3. Décomposition d'un problème de Compatibilité Electromagnétique

Lors de l'analyse d'un problème de perturbation électromagnétique, on constate que celui-ci englobe trois éléments comme l'illustre la figure I-5. Il exprime le fait qu'une perturbation est considérée si elle est nuisible pour une victime et s'il existe un chemin de couplage par lequel cette perturbation peut passer de la source à la victime.

1. une source de perturbation qui émet de l'énergie électromagnétique est appelée "source coupable".
2. un canal de couplage au travers duquel l'énergie de ces perturbations se propage.
3. un récepteur qui capte cette énergie est appelé "victime", vulnérable à ce signal parasite.

Si un de ces trois éléments est manquant, on considère qu'il n'existe aucun problème de compatibilité électromagnétique.

Les conséquences de ce phénomène peuvent aller du dysfonctionnement de la victime jusqu'à sa destruction [5,6,7].

Il y a trois moyens de réduire les perturbations à un niveau acceptable :

1. Supprimer ou diminuer l'émission à la source.
2. Rendre le couplage le plus inefficace possible.
3. Rendre le récepteur moins susceptible aux émissions.

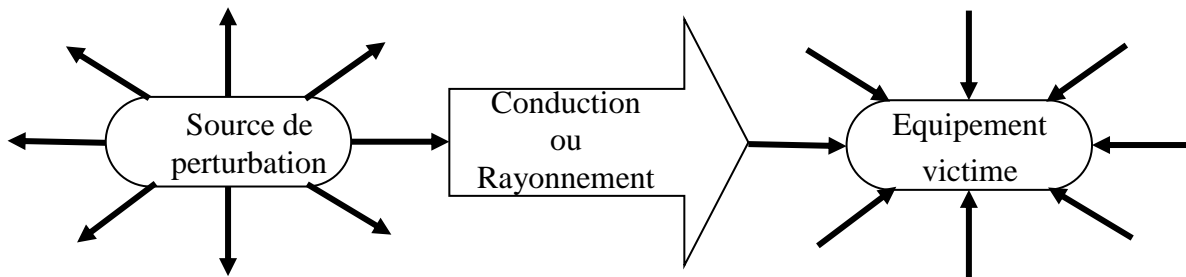


Figure I-5 : Systèmes « coupables » et « victimes »

I.4.4. Émission et susceptibilité

La compatibilité devant être assurée dans les deux sens, on est conduit à définir deux types de phénomènes [5,6,7]:

I.4.4.1. Emission

Les émissions (terme choisi par les normes aérospatiales ou similaires) ou perturbations (équivalent dans les normes industrielles) désignent les signaux (volontaires ou non) dont la propagation est de nature à nuire au bon fonctionnement des objets ou à la santé des êtres vivants situés au voisinage.

I.4.4.2. Susceptibilité

La susceptibilité désigne un comportement d'un appareil, en réponse à une contrainte externe (volontaire ou non, naturelle ou artificielle), jugé incompatible avec une utilisation normale. La susceptibilité est aussi appelée l'immunité.

Pour assurer une bonne compatibilité entre les équipements, différents niveaux et différentes marges ont été définis [5,6,7]:

- Le niveau d'émission : C'est le niveau maximal de perturbation que doit émettre un matériel.
- Le niveau d'immunité : Il s'agit du niveau à partir duquel il y a dysfonctionnement d'un matériel ou d'un système.
- Le niveau de compatibilité : C'est le niveau maximal de perturbation auquel on peut s'attendre dans un environnement donné.

La figure I-6 illustre la définition des marges de sécurité en compatibilité électromagnétique. Le niveau d'émission de la source doit être inférieur au niveau de compatibilité. L'écart entre le niveau d'émission et le niveau de compatibilité définit la marge d'émission. Pour assurer une bonne compatibilité, le niveau d'immunité de la victime doit être supérieur au niveau de compatibilité. La différence entre le niveau d'immunité et le niveau de compatibilité donne la marge d'immunité [8,9,10].

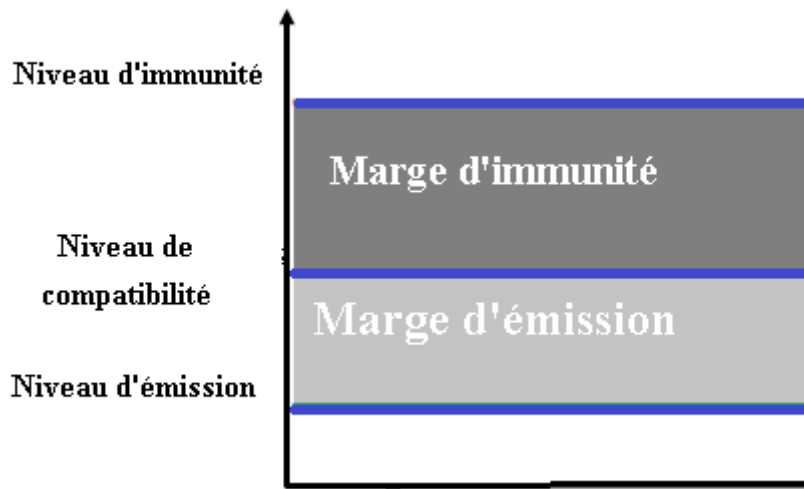


Figure I-6 : Classement des différents niveaux de perturbations électromagnétiques

I.5. Modes de couplage

Le couplage est un phénomène physique permettant la propagation d'une perturbation de la source à la victime [8,9].

On distingue plusieurs modes de couplage :

- Conductif : la perturbation se propage sur les câbles de liaison (pour l'alimentation ou l'échange d'information)
- Rayonné : la perturbation utilise les champs magnétiques, électriques ou électromagnétiques
- Electrostatique : la perturbation se propage au travers d'une décharge électrostatique

Une perturbation issue d'un appareil 1, considéré comme source de perturbation arrive à un appareil 2, considéré comme la victime de la perturbation en utilisant un mode conduit ou un mode rayonné.

Les couplages en mode conduit, lorsque la perturbation se superpose sur un conducteur de type câble, plan de masse ou carcasse métallique, et les couplages par rayonnement lorsque la perturbation se propage dans l'air ou dans le milieu sous la forme d'un champ électrique E, magnétique H ou électromagnétique. Ces types de couplages dépendent fortement de la fréquence de la source. Par définition, les basses fréquences (BF) induiront des perturbations en mode conduit tandis que les hautes fréquences (HF) induiront des perturbations dites « rayonnées », la frontière entre ces deux mondes reste difficile à fixer [8,9].

Les principaux modes de couplage d'une perturbation électromagnétique sont :

- Couplage par diaphonie capacitive,
- Couplage par diaphonie inductive,
- Couplage par impédance commune,
- Couplage par champ électrique,
- Couplage par champ magnétique.
- couplage par champ électromagnétique.

I.5.1. Couplage par diaphonie capacitive

Dans ce cas, il existe sur un circuit perturbateur une tension susceptible de produire des perturbations. Il existe aussi une capacité entre ce circuit perturbateur et un autre circuit, qui sera la victime. Par cette capacité, de l'énergie électrique perturbatrice atteint le circuit victime.

Le couplage est d'autant plus élevé que l'impédance du circuit victime est grande, du fait du pont diviseur de tension constitué de la capacité et de l'impédance de la victime (Figure I-7) [8,9].

Un conducteur appartenant au circuit perturbateur se trouve dans le même câble qu'un conducteur appartenant au circuit victime. Ces deux conducteurs étant proches, il existe une capacité entre eux, responsable du couplage. Le couplage sera d'autant plus élevé que l'impédance du circuit victime est grande, du fait du pont diviseur de tension constitué de la capacité et de l'impédance de la victime.

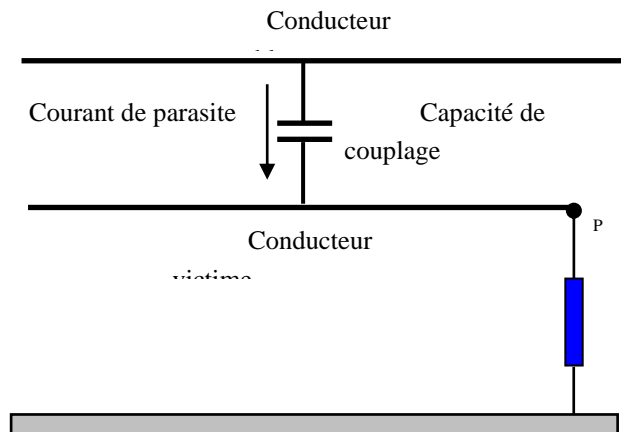


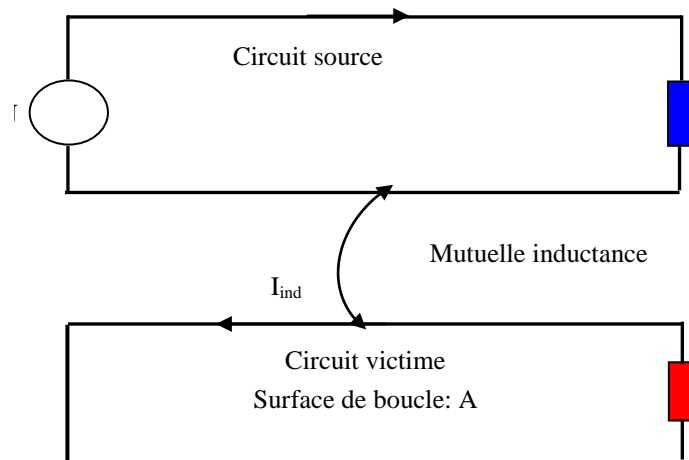
Figure I-7 : Principe du couplage par diaphonie capacitive

I.5.2. Couplage par diaphonie inductive

C'est un couplage de type conduit. Dans ce couplage, il existe dans le circuit perturbateur un courant susceptible de produire des perturbations. À proximité de ce circuit se trouve un circuit victime. Le courant du conducteur du circuit perturbateur produit autour de lui un champ magnétique. La variation du champ magnétique induit un courant parasite dans le circuit victime. A son tour ce courant induit dans ce dernier une tension parasite par la loi de Faraday (équation I-24)(Figure I-8).

$$fém = \oint_A \vec{E} \cdot d\vec{l} = -\frac{d\phi_B}{dt} \quad (I.9)$$

Où A est la boucle fermée, fém est la force électromotrice induite exprimée en V, E est le champ électrique en [V/m], et Φ_B est le flux magnétique à travers la surface enfermée dans la boucle. La tension induite est proportionnelle aux courants qui circulent dans les conducteurs et aux longueurs de parallélisme entre les boucles. Plus l'impédance du circuit victime est faible, plus cette tension induit une énergie perturbatrice importante [8,9].



FigureI-8 : Principe du couplage par diaphonie inductive

I.5.3. Couplage par impédance commune

Deux ou plusieurs équipements sont interconnectés par leur réseau d'alimentation et les câbles de communication (FigureI-9). Lorsque des courants d'origines externes (foudre, courants de défaut, courants perturbateurs) circulent à travers ces impédances communes, une tension indésirable est développée entre les points A et B, censés être équipotentiels. Cette tension parasite peut être gênante pour des circuits électroniques bas niveaux ou rapides.

L'ensemble des câbles, y compris les conducteurs de protection, présente une impédance, en particulier aux fréquences élevées [8,9].

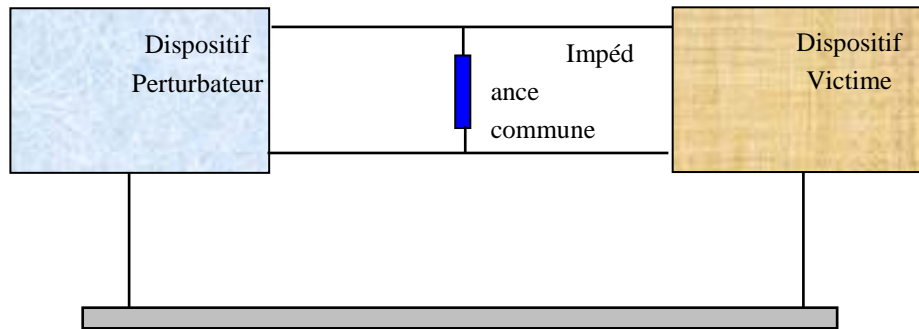


Figure I-9 : Principe du couplage par impédance commune

Les masses des équipements 1 et 2 sont reliées à une terre commune par des connexions d'impédances Z_1 et Z_2 . La surtension parasite s'écoule vers la terre, à travers Z_1 . Le potentiel de l'équipement 1 est porté à $Z_1 I_1$.

La différence de potentiel avec l'équipement 2 (initialement au potentiel 0) se traduit par l'apparition du courant I_2 .

I.5.4. Couplage par champ électrique

Ce couplage est aussi appelé couplage champ à fil, c'est un couplage de type rayonné en champ proche. C'est un champ électrique incident qui va produire une perturbation sur un circuit victime. Remarquons tout de suite que le couplage capacitif cité plus haut est de même nature, puisque la capacité de couplage amène des lignes de champ sur la victime. La différence ici, c'est que le perturbateur est plus éloigné: Au lieu d'identifier le perturbateur lui-même, on identifie le champ électrique qui en est issu. (Figure I-10) [8,9].

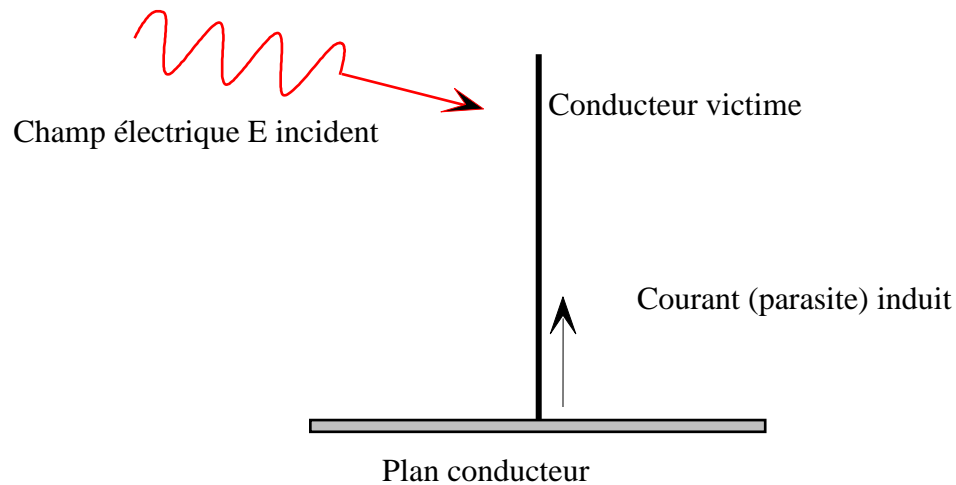


Figure I-10: Principe du couplage par champ électrique

I.5.5. Couplage par champ magnétique

C'est un couplage de type rayonné en champ proche. Il est aussi appelé couplage champ à boucle. Un champ magnétique variable traversant une boucle conductrice y induit une différence de potentiel parasite. Ce couplage est de même nature que le par diaphonie inductive susmentionné ci-dessus. Au lieu d'identifier le perturbateur lui-même, on identifie le champ magnétique qu'il a généré comme étant la perturbation (Figure I-11) [8,9].

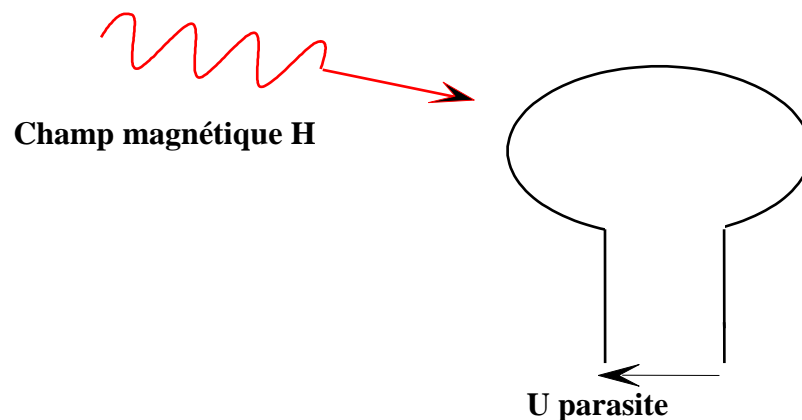


Figure I-11: Principe du couplage par champ magnétique

I.6. Directives et Normes de la CE

Au niveau de la Communauté Economique Européenne (CEE), la réglementation est élaborée par les différents Comités Techniques (TC) du Comité Européen de Normalisation en Electrotechnique (CENELEC).

La Directive européenne n°89/336/CEE stipule que dans tous les états membres de la CEE, les appareils susceptibles de générer des perturbations électromagnétiques ou dont le fonctionnement peut être affecté par ces perturbations ne peuvent être commercialisés dans les pays de la CEE que s'ils sont conformes aux spécifications en matière de CEM.

Cette directive est rentrée en application le 28 octobre 1992. Toutefois, une période de transition de quatre ans a été prévue pour permettre aux fabricants de s'adapter et au CENELEC d'élaborer tous les documents. Nous donnons ci-dessous un échantillon des normes Européennes.

Au plan international, la Commission Electrotechnique Internationale (CEI) a créé un comité spécial, le Comité International Spécial des Perturbations Radioélectriques (CISPR) en vue de formuler les normes CEM.

Les publications du CISPR sont généralement utilisées par les différents pays comme document de base pour l'établissement de leurs propres normes [10].

I.7 Effets des champs électromagnétiques sur la santé

I.7.1 Effets à court terme

Pour les champs électromagnétiques à la fréquence industrielle 50 ou 60 Hz. Lorsque le corps humain est exposé aux champs électriques, les champs électriques externes induisent à la surface du corps exposé une charge superficielle. Ce phénomène se traduit à l'intérieur du corps par l'apparition de courants, nécessaires pour déplacer les charges électriques à la surface du corps. Lorsque le corps humain est exposé aux champs magnétiques alternatifs, l'interaction physique champs magnétiques 50 Hz et corps humain crée des champs électriques induits, et provoque un courant induit à l'intérieur du corps humain. [11].

L'exposition à un champ électrique peut amener les sujets exposés à percevoir ce champ, du fait de la vibration des poils provoqués par la charge électrique alternative induite à la surface du corps. La plupart des gens sont capables de percevoir des champs électriques de 50/60 Hz d'intensité supérieure à 20 kV.m^{-1} et seule une infime minorité peut percevoir des champs d'intensité inférieure à 5 kV.m^{-1} . Les courants induits par des champs magnétiques alternatifs

sont de faible intensité et ne sont pas perceptibles. Par contre, l'exposition à des champs magnétiques intenses peut provoquer des perceptions immédiates. Les seuils de perception en fonction de la densité de courant induit, et en fonction de champs magnétiques retenus par l'OMS se trouvent. L'exposition à des champs électriques et magnétiques combinés de 60 Hz (9 kV.m⁻¹, 20 μT) provoque une légère modification de la fonction cardiaque. Au repos, le rythme cardiaque était légèrement mais significativement réduit (de 3 à 5 battements par minute) pendant ou immédiatement après l'exposition. Mais cette réaction n'était pas observée lors de l'exposition à des champs plus forts (12 kV.m⁻¹, 30 μT) ou plus faible (6 kV.m⁻¹, 10 μT).

Champ magnétique (50/60HZ) (mT)	Densité de courant induit (mA/m ²)	Le seuil de perception
0.5 – 5	1 – 10	Effets biologiques mineurs
5 – 50	10 – 100	Effets bien établis sur le système nerveux et la vision.
50– 500	100 – 1000	Stimulation des tissus excitables et des dommages possibles sur la santé
> 500	> 1000	Fibrillation ventriculaire et des extrasystoles – Effets aigus

Tableau I.1 : Le seuil de perception du champ magnétique [11]

I.7.2 Effets à long terme

Environ 30 ans, les effets à long terme des champs électromagnétiques sur la santé font l'objet de nombreuses recherches. La question posée de manière récurrente est : Le champ électromagnétique est-il un agent cancérigène ? Les études menées jusqu'à présent peuvent se classer en deux catégories principales : études épidémiologiques chez l'homme, et études d'exposition de longue durée chez l'animal. [11].

Les études épidémiologiques chez l'homme sont effectuées sur des groupes de personnes qui, par leur travail ou par leur habitude de vie, sont exposés à des niveaux similaires de champ. Les taux de cancer de ces groupes sont comparés entre eux, ou avec un groupe de référence (le

témoin). L'intérêt de ces études est d'analyser des populations dans les conditions de vie réelles. En revanche, dans ce type d'étude, il est impossible de maîtriser l'exposition aux champs électromagnétiques sur une longue période. De plus, il est également impossible de séparer les effets reproductibles aux seuls champs, des effets de tout autre facteur auxquels la population est exposée dans la vie courante, comme des facteurs familiaux (hérédité génétique...), l'habitude de vie (régime alimentaire, tabagisme, ...) et d'autres facteurs liés à l'environnement (pollution, utilisation de produits chimiques ...). Les études de longue durée chez l'animal sont effectuées sur des animaux en laboratoire. Dans ce cas, on peut contrôler parfaitement les niveaux d'exposition, et minimiser tout autre par le facteur de perturbation qui pourrait jouer un rôle dans le développement de cancers. Cependant, il est impossible de transposer directement à l'homme les résultats obtenus chez les animaux, mais ces études nous donnent des idées sur l'interaction entre la matière vivante et les champs électromagnétiques.

I.8 Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons rappelés les équations de Maxwell, les différentes formulations et les équations qui en résultent ainsi que l'ensemble des équations et des conditions qui gouvernent les répartitions du champ électrique en électrostatique. 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. Également ce chapitre a présenté les effets potentiels des champs électromagnétiques sur la santé humaine.

Chapitre II:

Méthodes de calcul du champ électrique

II.1. Introduction

Les lignes aériennes de transport créent des champs électriques et magnétiques et par conséquent à 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.

Les sources des champs électriques et magnétiques dans l'environnement des lignes électriques aériennes sont les courants électriques dus aux charges qui existent dans leurs conducteurs, ainsi que ceux qui sont induits dans la terre et dans les objets à proximité. Le point de départ pour le calcul de ces champs variables avec le temps sont les équations de Maxwell. En général, les champs électriques et magnétiques sont couplés, et il est nécessaire de résoudre des équations de Maxwell pour les déterminer.

Plusieurs méthodes numériques permettent de résoudre les équations différentielles, le présent chapitre porte sur les méthodes analytiques et numériques d'analyse du champ électrique autour des lignes aériennes à haute tension, aussi sur l'interaction entre une ligne aérienne à haute tension et le corps humain.

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 [12,13].

En général, 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 [12,13].

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 [12 ,13].

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

Résoudre l'équation (I.9) 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 [12 ,13].

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 [12 ,13].

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 ($x = x_0$)

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

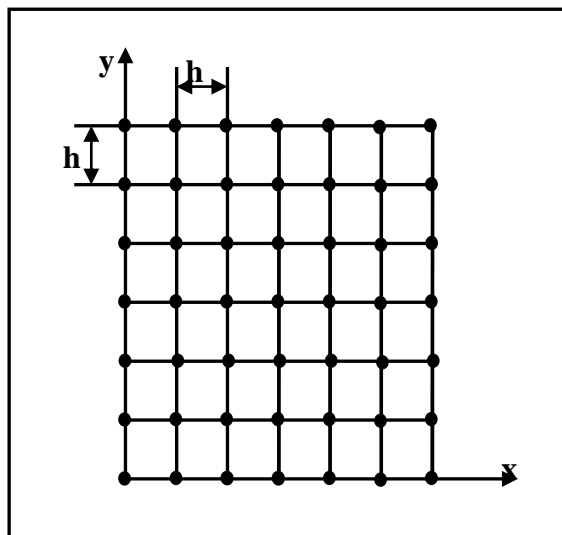


Figure II-1: Maillage carré

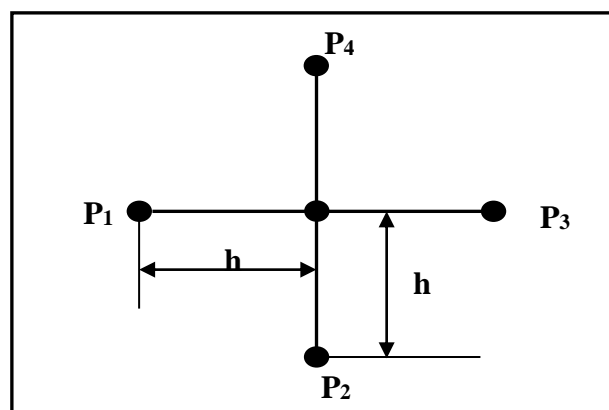


Figure II-2 : Point central et ses voisins

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 [12 ,13].

:

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

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.6) et (II.7)

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.9) permet ainsi d'évaluer le potentiel en chacun des nœuds [12 ,13].

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 [13,14].

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 :

$$P_{vij} = \frac{1}{2\pi \cdot \epsilon_0} \ln \left(\sqrt{(x_{iv} - x_j)^2 + (y_{iv} - y_j)^2} \right) \quad (\text{II.11})$$

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:

$$\overline{q_j} = q_{jr} + j \cdot q_{ji} \quad (\text{II.14})$$

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

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

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 [13,14].

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

Etape 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.

Les étapes de la méthode des charges fictives sont résumées dans l'organigramme suivant [13,14]:

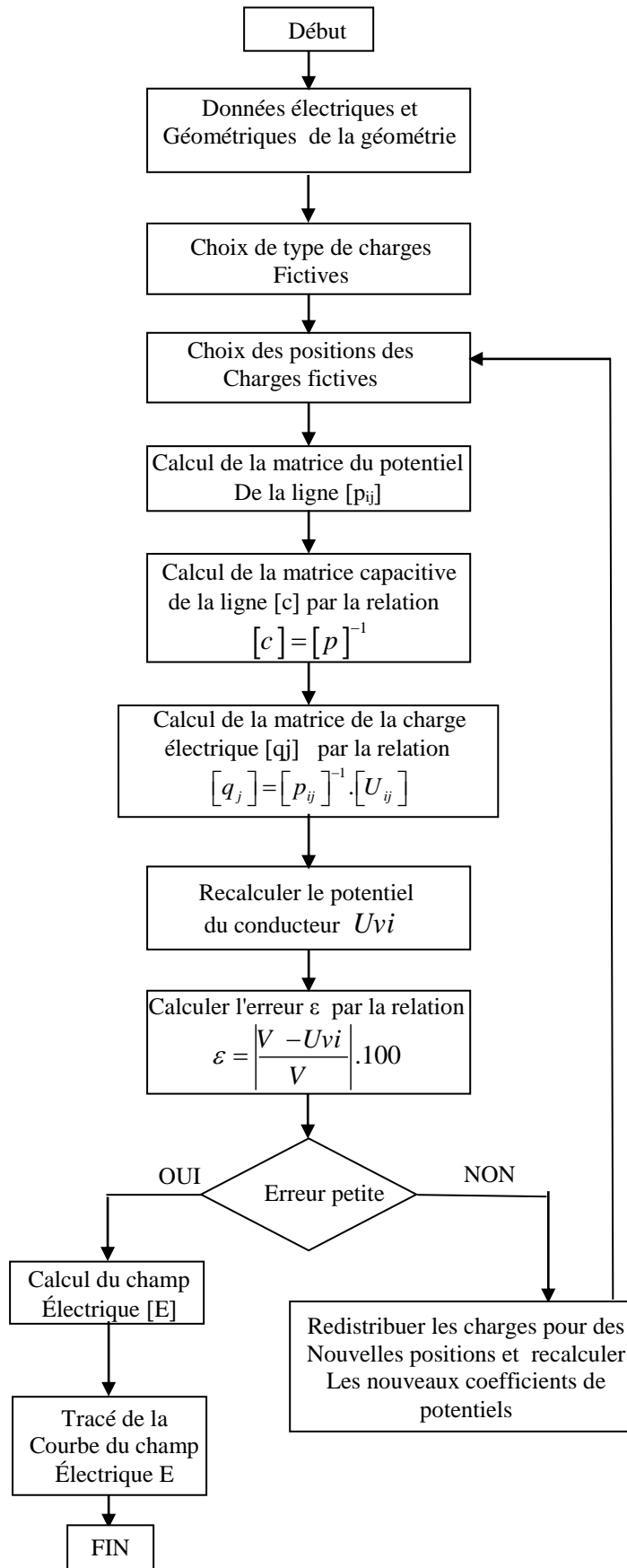


Figure II.3 : Organigramme du calcul du champ électrique utilisant La méthode des charges fictives [13]

II.2.4. Méthode des images

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

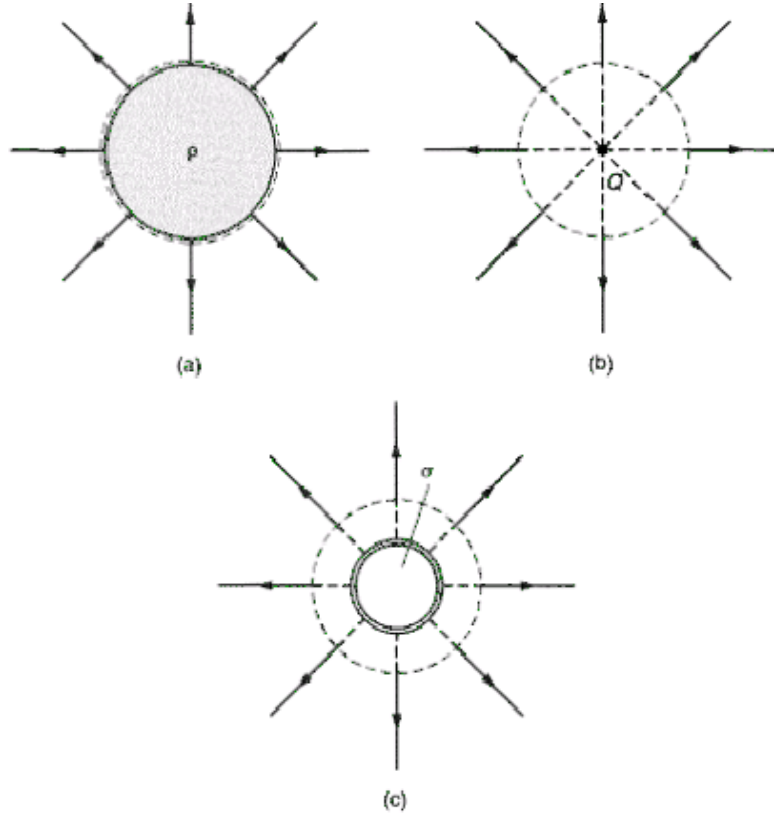


Figure. II-4: Distribution de Charges équivalentes pour la région en dehors de la surface sphère de rayon a : (a) sphère chargée en volume de rayon a , (b) charge ponctuelle, et (c) charge surfacique de la sphère de rayon $r < a$.

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 sur toute 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 [15 ,16].

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 (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 ai 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.

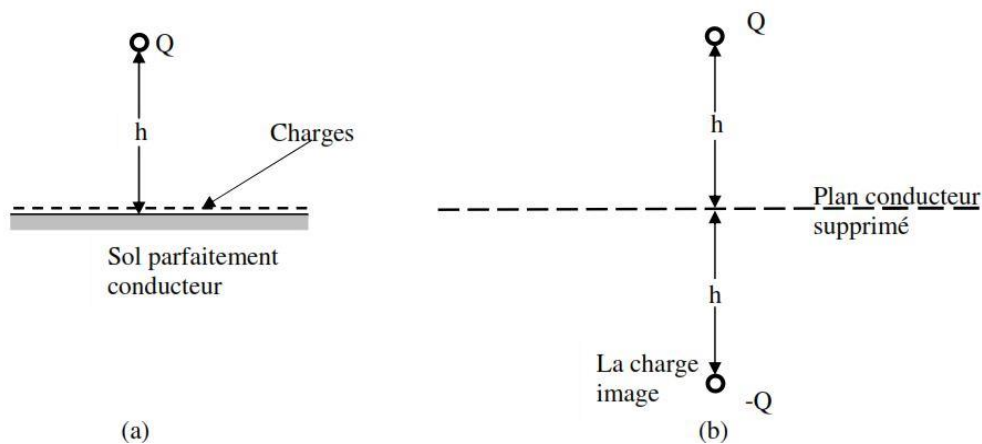


Figure. II-5: (a) charge au dessus d'un sol parfaitement conducteur, et (b) charges induites sur le sol remplacée par une charge équivalente

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.

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 [15 ,16].

II.3. 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 représente un système de conducteurs soumis à un system triphasé symétrique de tensions électriques sinusoïdales de fréquence basse (50 Hz).

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 :

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 [15 ,16, 17].

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

$$[q] = [P]^{-1} \cdot [V] \tag{II.18}$$

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 :

$$\begin{bmatrix} \overline{V}_1 \\ \overline{V}_2 \\ \overline{V}_3 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 \\ a^2 \\ a \end{bmatrix} \cdot V = \begin{bmatrix} 1 + j0 \\ \frac{1}{2} + j \frac{\sqrt{3}}{2} \\ \frac{1}{2} - j \frac{\sqrt{3}}{2} \end{bmatrix} \cdot V \tag{II.19}$$

-Pour calculer des coefficients de potentiels, en utilisant la méthode des images (figure II.7), on peut calculer les coefficients de potentiels avec les formules suivantes :

les coefficients mutuelles de potentiel des conducteurs [15 ,16,17].

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

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].

Dans le cas où le conducteur phase est constitué 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 (voir figure II-6) [16 ,17].

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

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.

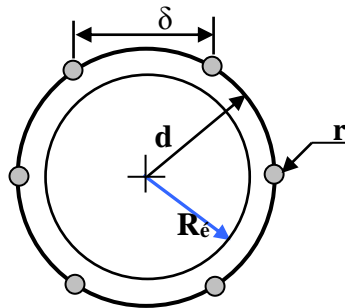


Figure II-6 : Faisceau de conducteurs

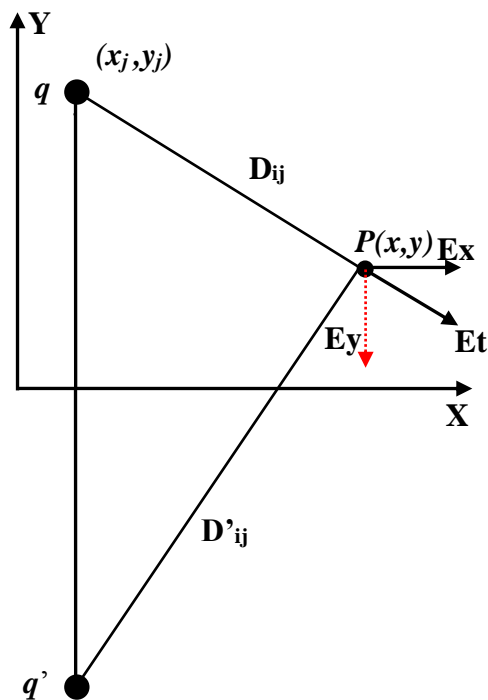


Figure. II-7 Conducteurs i et j avec les images i' et j' utilisées pour le calcul des coefficients de potentiel

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 champ 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-8) :

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

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

La résultante des composantes E_x et E_y de l'intensité du champ électrique en (x,y) est donnée par la relation suivante [15,16,17].

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

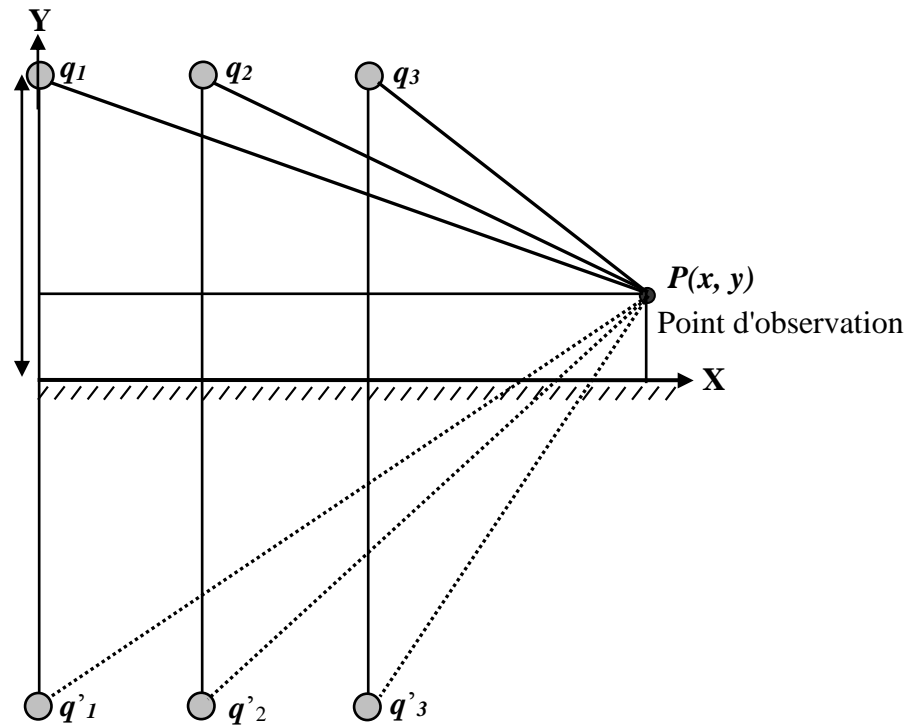


Figure II-8 : Représentation du champ électrique généré par les conducteurs d'une ligne triphasée et ses images.

II-4 Champ électrique d'une ligne aérienne à haute tension

L'intensité du champ électrique au niveau du sol, à proximité d'une ligne aérienne, dépend principalement de la tension de la ligne et de la distance par rapport à celle-ci. La distance phase terre et la disposition des conducteurs sont également des facteurs importants, qui ont un effet sur l'intensité du champ électrique. La dimension du conducteur de phase et la constitution de celle-ci (conducteur simple du faisceau) influencent également le champ électrique au niveau du sol. Finalement, dans le cas des réseaux à deux ou plusieurs ternes, la disposition relative des trois phases de chacun des ternes est importante, plus particulièrement en ce qui concerne l'intensité maximale du champ électrique [14].

La figure suivante donne les profils des champs électriques pour quatre configurations des conducteurs de phases.

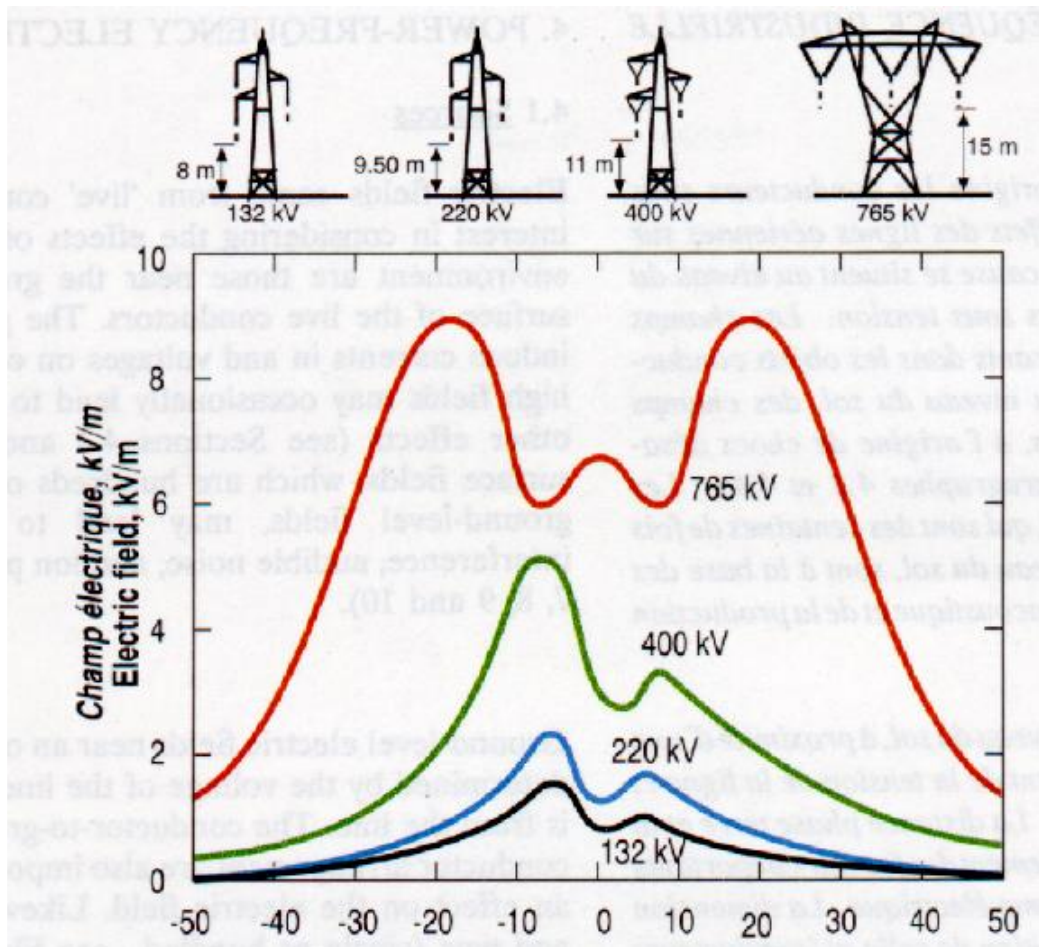


Figure II-9 : Représentation des profils de l'intensité du champ électrique à proximité du sol pour différentes lignes typiques à un terme [18]

Les champs électriques d'une ligne de transmission affectent les objets conducteurs qui se trouvent aux alentours de la ligne. Ils peuvent induire des courants électriques et des tensions dans le corps humain. A des niveaux de tension élevée, les effets des champs électriques deviennent plus importants.

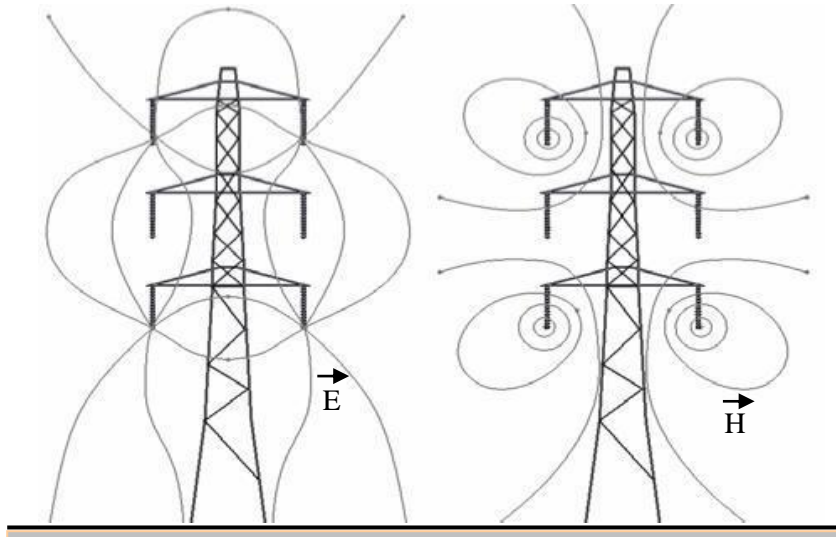


Figure II-10 : Champ électrique (à gauche) et magnétique (à droite) produit par une ligne électrique

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. La commission internationale de protection contre les rayonnements non ionisants (ICNIRP) a publié des directives sur les limites d'exposition à tous les champs électromagnétiques, ces directives offrent une protection suffisante contre les effets connus sur la santé et contre ceux qui peuvent se produire lorsque l'on touche un objet chargé dans un champ électrique externe. Les limites d'exposition aux champs électromagnétiques recommandées dans de nombreux pays sont dans l'ensemble très proches de celle de l'ICNIRP [19].

Population	Champ électrique	Champ magnétique	Densité de courant
Public	5 kV/m	200 μ T	10 mA/m ²
Travailleurs	10 kV/m	1mT	

Tableau II-1 Limites d'exposition en champ 50 Hz [19]

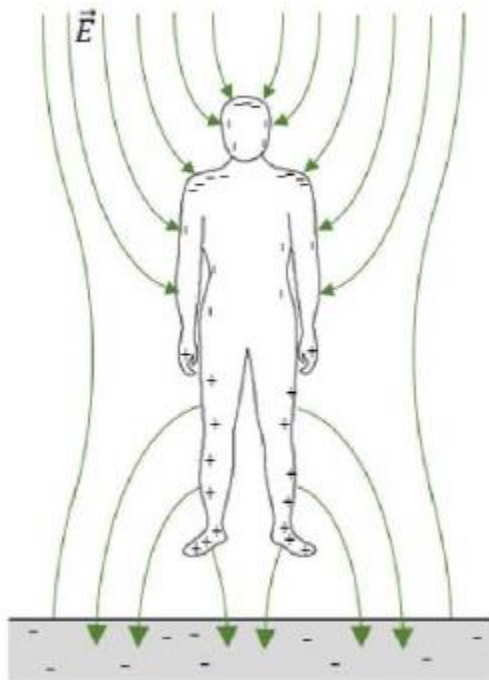


Figure II-11 : Corps humain exposé à un champ électrique basse fréquence

II-5 Interaction entre une ligne aérienne à haute tension et le corps humain

Soit un individu debout, en contact avec le sol, et plongé dans un champ électrique vertical d'intensité uniforme. Si le corps est bon conducteur, il est porté au potentiel zéro et l'intensité du champ électrique à la surface se modifie en fonction de la géométrie. Cette modification résulte du déplacement de charges électriques qui se déposent à la surface du corps. Le champ inducteur est alternatif et on observe un mouvement de va-et-vient des charges qui se traduit par une intensité de courant au sein de l'individu [20].

Le champ électrique au niveau du sol sous une ligne de transmission à haute tension est approximativement uniforme et les lignes de champ sont verticales au niveau du sol, mais en présence d'un corps humain, le champ électrique au niveau du sol est fortement perturbé, en raison des charges extérieures accumulées sur le corps humain [20].

La densité de courant induite locale J par le champ électrique normale

$$J = \omega \cdot \epsilon_0 \cdot E_n \quad (\text{II .28})$$

Le courant total sur toute la surface S du corps humain est exprimé par la formule :

$$i = 2 \cdot \pi \cdot f \cdot \epsilon_0 \cdot \int_S E_n \cdot dS \quad (\text{II .29})$$

Où : $\omega = 2 \cdot \pi \cdot f$ est la fréquence angulaire de la tension appliquée.

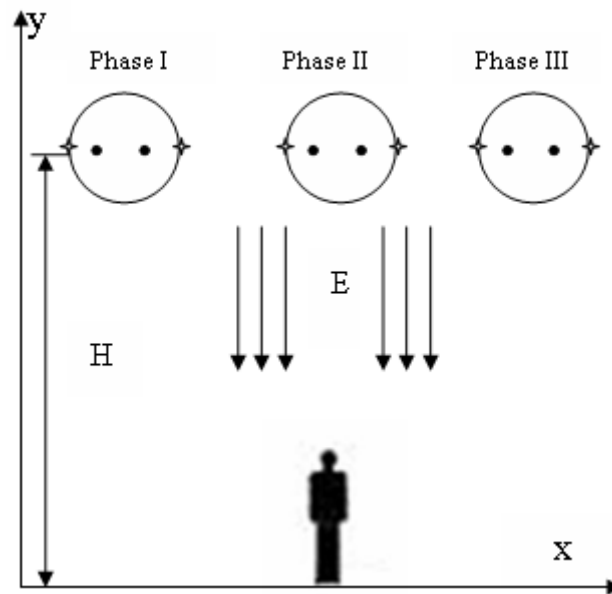


Figure II.12. Représentation des trois phases d'une ligne en nappe au-dessus du corps humain [14]

II.6. Conclusion

Nous avons exposé brièvement dans ce chapitre les principales méthodes numériques et analytiques de résolution du champ électrique engendré par une ligne électrique aérienne à haute tension. Pour un simple système physique, il est généralement possible de trouver une solution analytique, mais avec les systèmes complexes, il faut faire appel aux méthodes numériques, qui sont basées sur des formulations différentielles ou intégrales des problèmes aux limites d'intérêt, et comprennent la méthode des éléments finis (M.E.F). La méthode des différences finies (M.D.F), la méthode des charges fictives (M.C.F). Les lignes de transport à haute tension créent des champs électriques sur les systèmes biologiques, particulièrement sur les corps humains qui sont situés au sol, en induisant des charges extérieures sur les corps humains, qui aura par conséquent un écoulement d'un courant induit dans le corps humain.

Chapitre III:

Résultats et interprétations

III.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. Ces lignes aériennes de transport créent des champs électriques et magnétiques et par conséquent à 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.

En basse fréquence les composantes de champ électrique et magnétique se comportent de façon Indépendante, l'intensité du champ électrique produit par la ligne aérienne de transport (HT et THT) dépend principalement du niveau de tension portée par les conducteurs, tandis que le champ magnétique a une forte dépendance du courant qui circule dans les conducteurs de la ligne.

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 pourrons voir l'évaluation de l'effet du champ électrique sur le corps humain.

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

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 30 cm, la section utilisée est un câble en AMS à 61 brins de rayon extérieur de 10 mm, la section totale d'un sous conducteur est de 593,5 mm², le câble de garde est d'une section de 298 mm², de rayon extérieur 10 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.

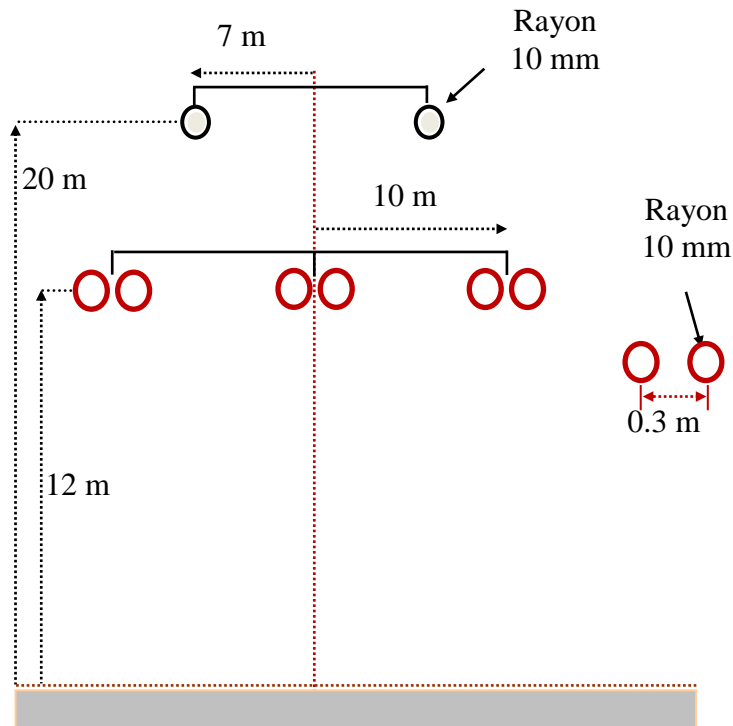


Figure III-1 : Géométrie d'une ligne électrique triphasée disposée en nappe horizontale

Dans le résultat montré dans la figure (III -2), pour cette ligne de 275 kV, on remarque que le champ électrique à 1 m du sol, à une valeur maximale $E= 3,1$ 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 $x = \pm 12$ 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. on constate que les limites d'exposition publique et professionnelle au champ électrique à fréquence de 50 Hz suivant les contextes normatif prescrites par les recommandations de la commission internationale de protection contre les rayonnements non ionisants (ICNIRP) sont bien respectées.

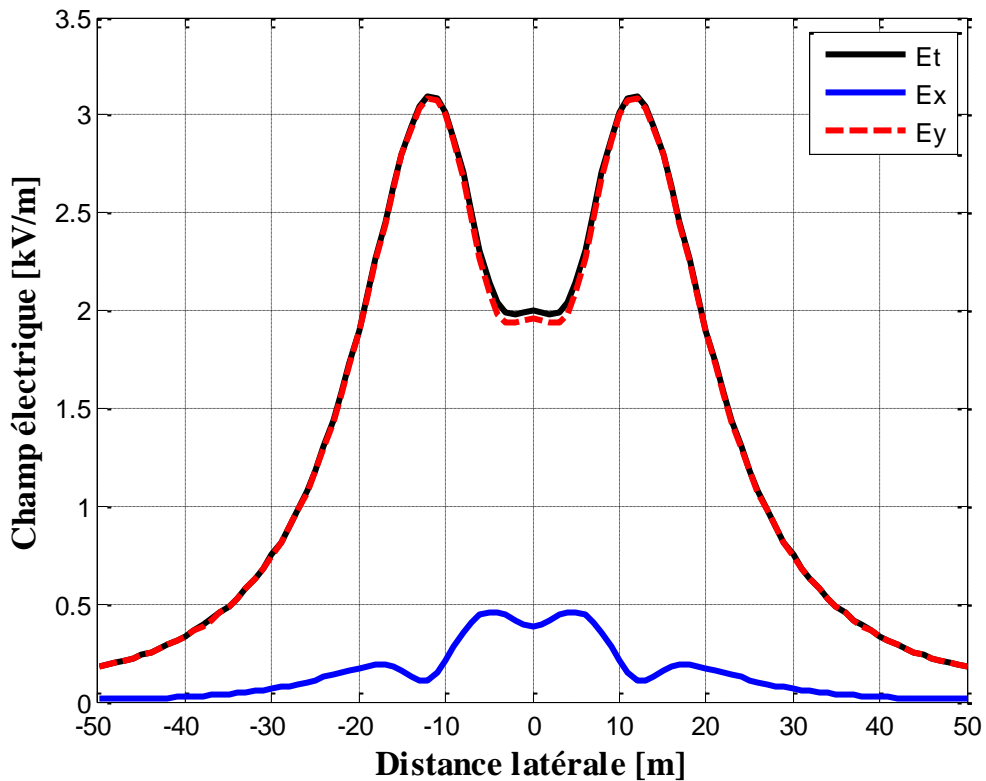


Figure III -2 : Profil du champ électrique à 1m du sol pour une ligne en nappe horizontale de 275 kV

La figure III-3 décrit la cartographie de l'intensité du champ électrique, dans une zone définie par la hauteur des conducteurs, et l'axe de la distance latérale le long du couloir de la ligne. Il peut être intéressant de noter que le niveau concentré du champ électrique se produit autour des surfaces des conducteurs de phase; le champ électrique diminue progressivement avec l'augmentation de la distance latérale du centre de la ligne électrique dans les deux sens du couloir de l'emprise de la ligne électrique.

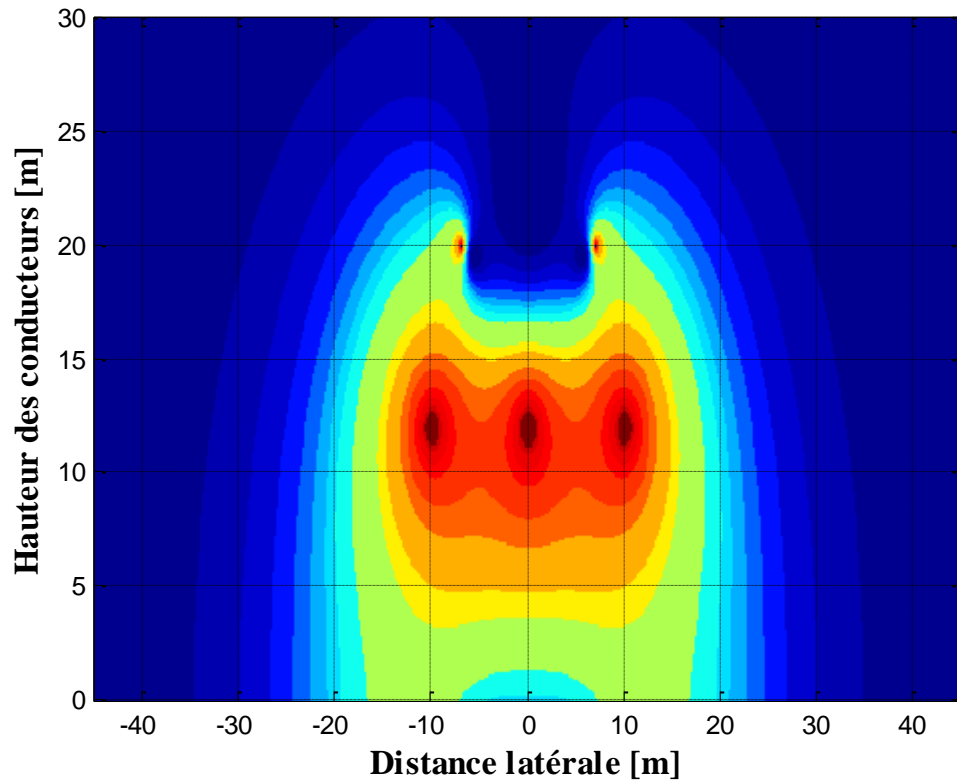


Figure III-3: Cartographie du champ électrique généré par la ligne électrique à simple circuit unique de 275 kV

III.3. différents paramètres affectant le champ électrique

La figure (III -4) 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, 3.1, 4.22, 4.5 et 5.62 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.

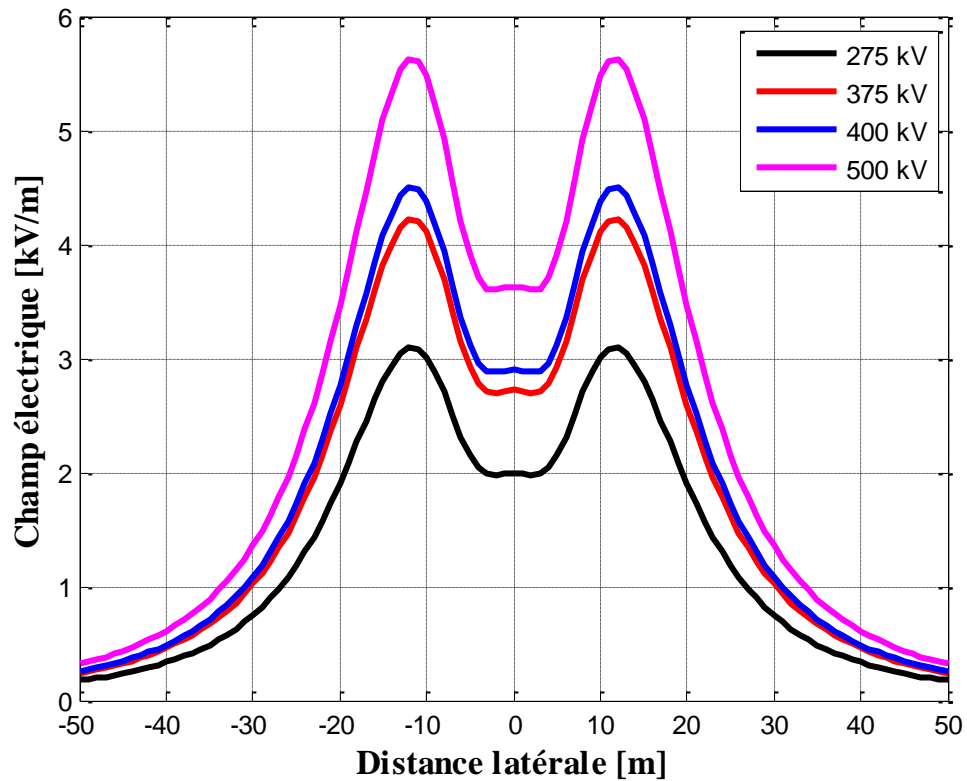


Figure III -4 : Profil du champ électrique à 1m du sol pour une ligne en nappe horizontale en fonction de plusieurs niveaux de tension

La figure (III -5) 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.

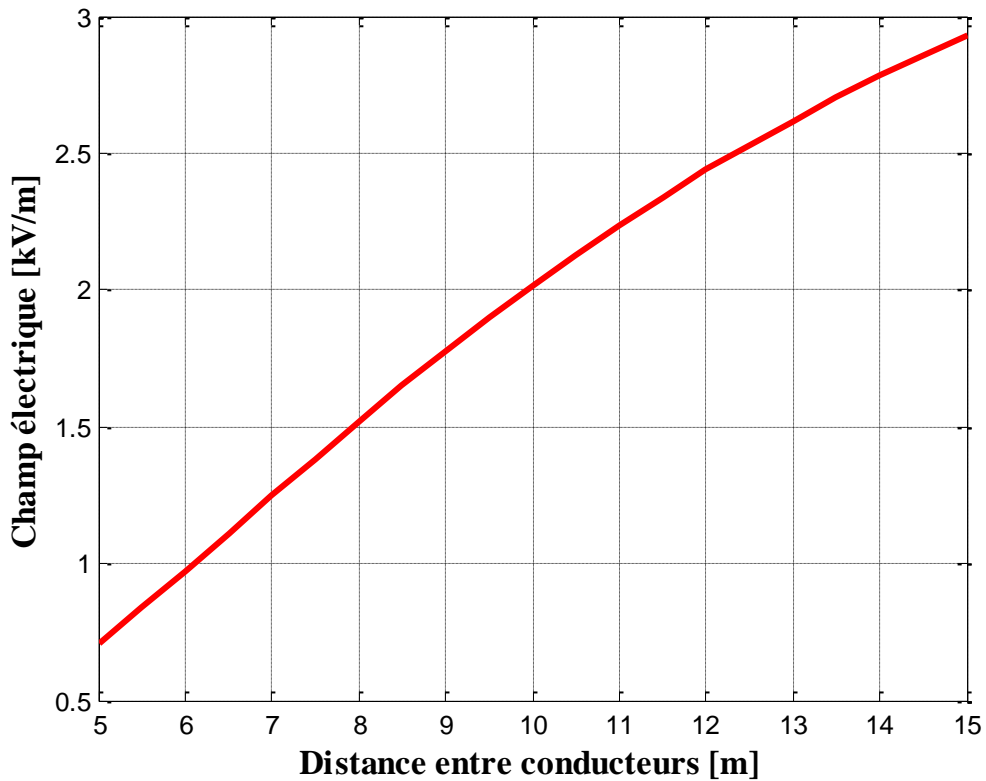


Figure III -5 : Profil du champ électrique à 1m du sol pour une ligne en nappe horizontale en fonction de la distance de séparation entre les conducteurs

La figure III-6 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.

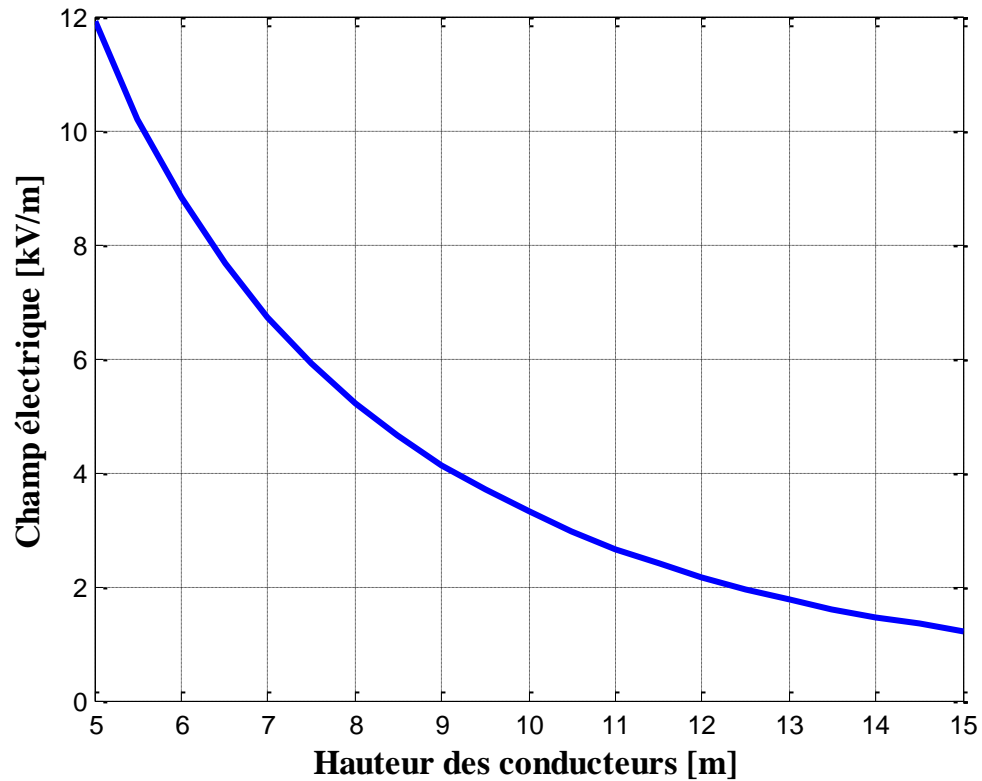


Figure III -6 : Profil du champ électrique à 1m du sol pour une ligne en nappe horizontale en fonction de la hauteur des conducteurs au dessus du sol

La figure III-7 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.

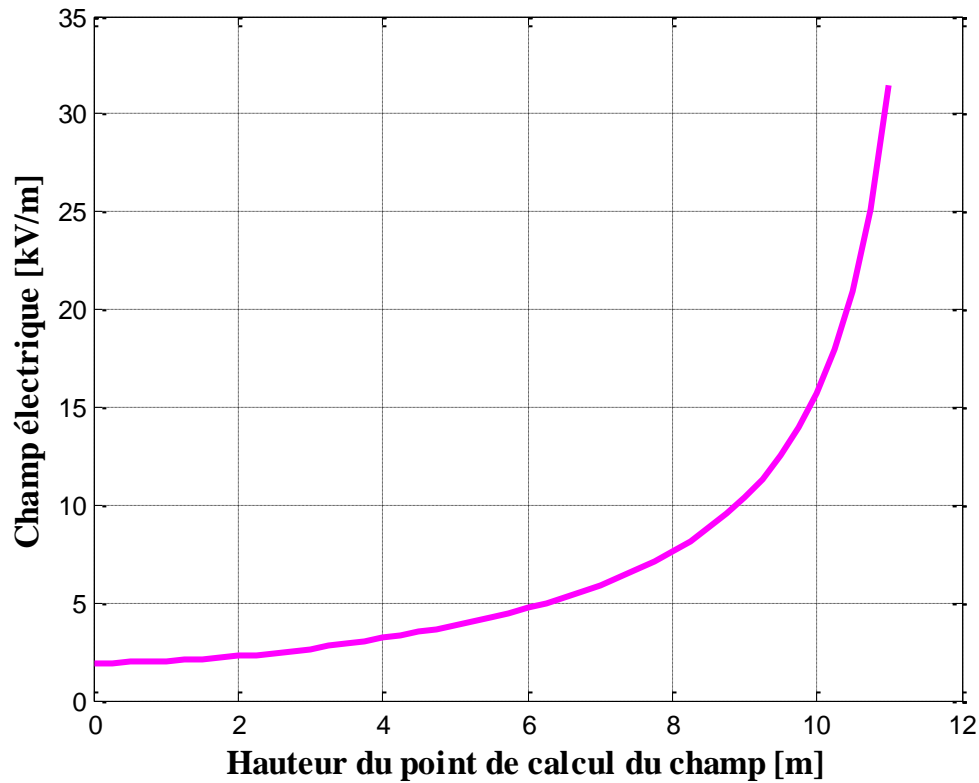


Figure III-7 : Profil du champ électrique d'une ligne en nappe horizontale en fonction de la hauteur du point d'observation

La figure III-8 montre l'effet des conducteurs de phase en faisceau sur la valeur du champ électrique, comme on le voit sur cette figure, l'intensité du champ électrique augmente lentement si le nombre de sous-conducteurs par phase est augmenté.

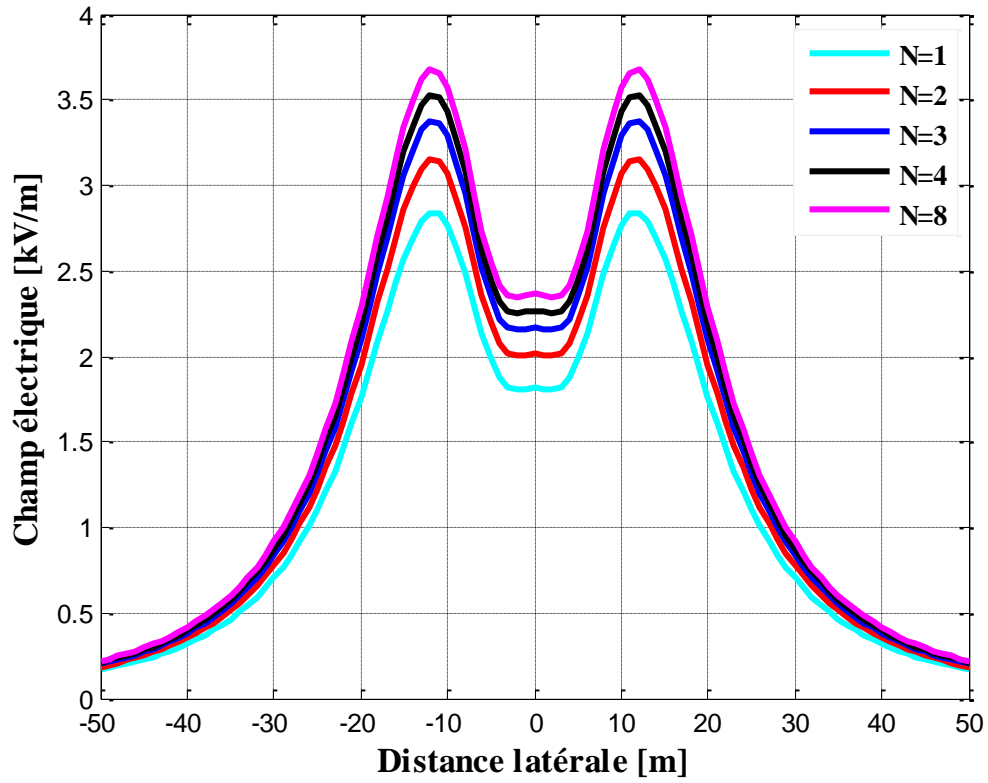


Figure III-8: Profil du champ électrique en fonction des conducteurs du faisceau

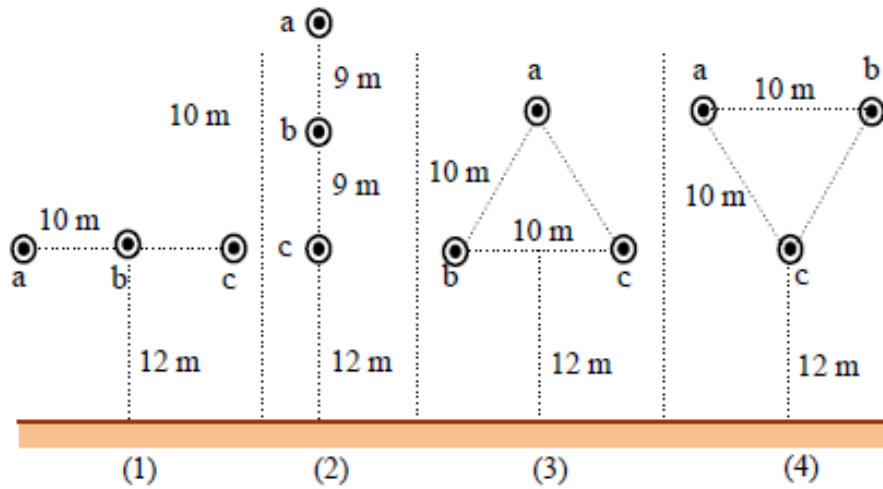


Figure III-9 : Représentation géométrique des différentes configurations d'une ligne électrique.

(1) nappe horizontale, (2) nappe verticale, (3) triangle, (4) 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-9, nappe horizontale et verticale, triangle et triangle inverse.

Le profil du champ électrique pour différentes configurations de phase à circuit simple est illustré à la figure III-10. On peut voir que la configuration horizontale produit le champ électrique maximal plus élevé que toutes les autres configurations en raison du fait que tous les conducteurs sont proches du niveau du sol, et d'autre part, la configuration triangulaire produit le champ électrique maximal le plus bas en raison du meilleur effet d'atténuation des tensions de la ligne. le point P correspond au point où la valeur du champ est maximale.

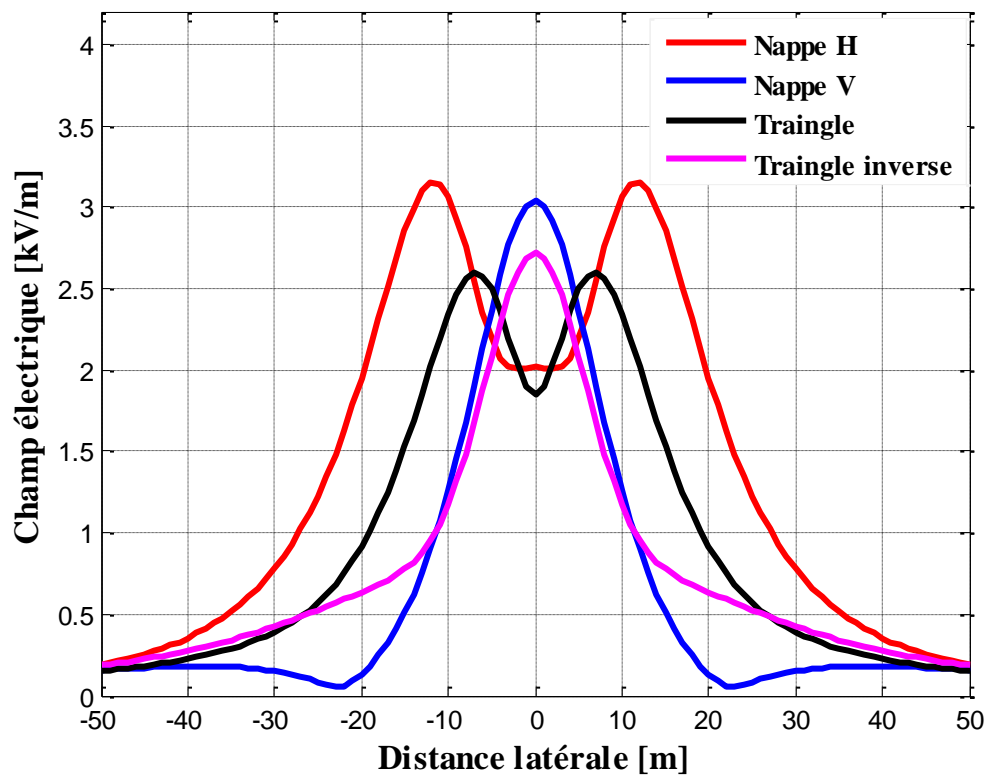


Figure III-10 : Profil du champ électrique à 1m du sol pour des différentes configurations à simple circuit d'une ligne électrique

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}	3.15	3.04	2.6	2.72
P	12 m	0 m	7 m	0 m

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

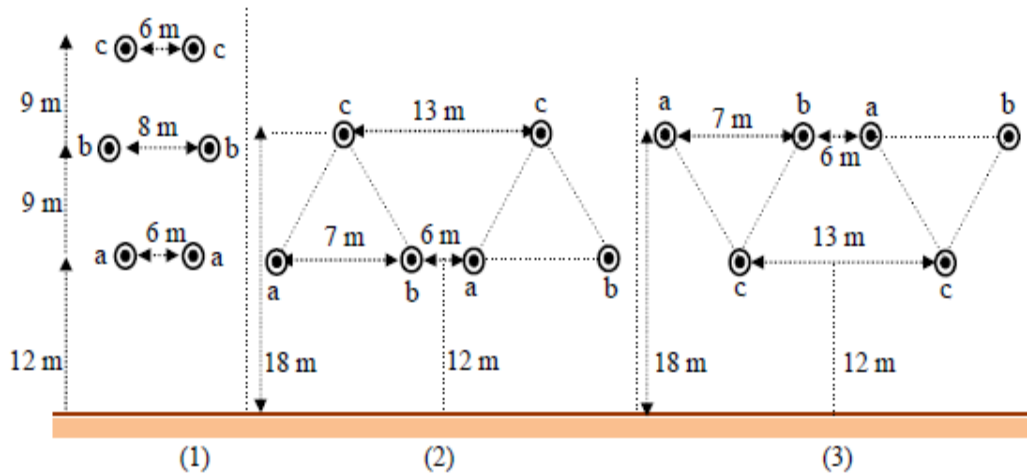


Figure III-11: Représentation géométrique des différentes configurations d'une ligne électrique à double circuit, (1) nappe verticale, (2) triangle, (3) triangle inversé

Pour différentes lignes de configurations à double circuit, pour le même phasage (abc-abc), la distribution latérale du champ électrique est illustrée par la Figure III-12. Typiquement, on peut observer que la configuration triangulaire donne un champ électrique maximal plus faible que les autres configurations au voisinage immédiat du centre de la ligne électrique dans un intervalle compris entre $[-7, +7]$ m, pour une distance comprise entre 7 et $30 \text{ m} \pm [7-30]$, la configuration verticale est la configuration préférée, dans cette plage les valeurs obtenues indiquent une réduction significative de l'intensité du champ électrique.

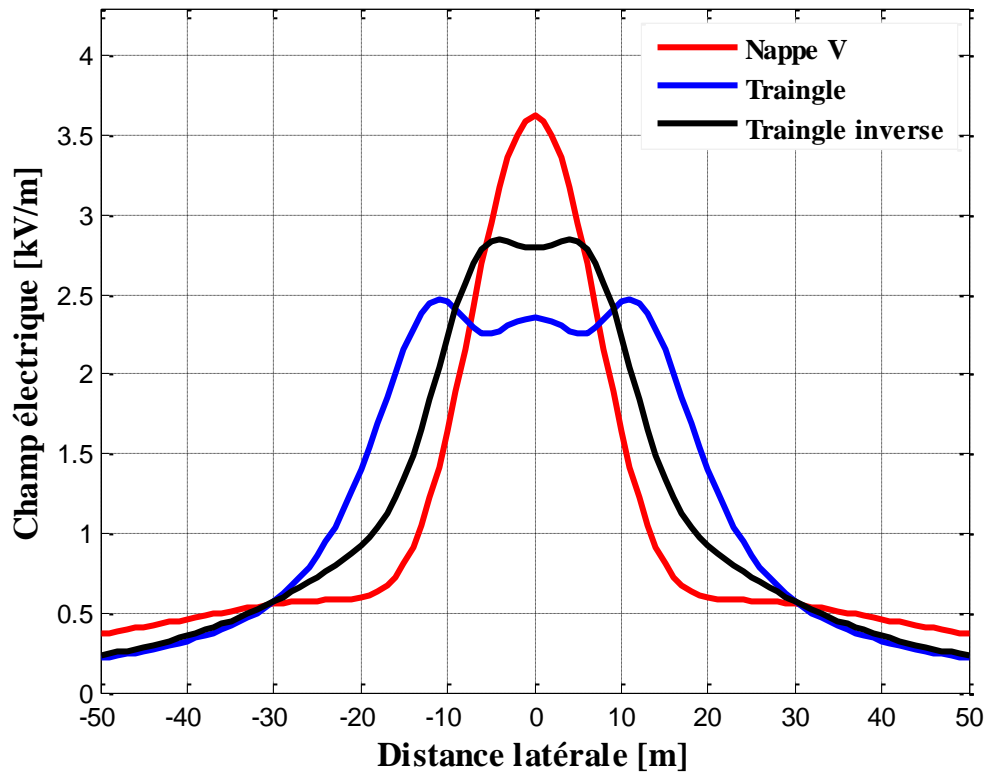


Figure III-12 : Profil du champ électrique à 1m du sol pour des différentes configurations à double circuit d'une ligne électrique

Les valeurs maximales du champ électrique obtenues pour les différentes configurations à simple circuit sont indiquées dans le tableau III-2.

Champ électrique (kV/m)	nappe verticale	triangle	triangle inverse
E_{max}	3.62	2.47	2.84
P	0 m	11 m	4 m

Tableau III-2: Valeurs maximales des champs électriques obtenus pour les différentes configurations à double circuit

Dans une ligne électrique aérienne à double circuit, la disposition de la séquence de phase a une influence significative sur l'intensité du champ électrique; il est hautement possible d'ajuster la position de l'ordre des phases pour réduire le champ électrique sous la ligne électrique à un niveau inférieur. A titre d'exemple, le champ électrique pour différentes dispositions de phase dans une ligne verticale à double circuit avec les mêmes paramètres est illustré sur la figure III-13. Comme on peut le voir sur cette figure, la disposition de phase inverse (abc-cba) ou la mise en phase à faible réactance donne la valeur la plus basse du champ électrique pour les différents points le long du couloir de la ligne électrique, en raison de la meilleure atténuation du champ électrique causée par le déphasage entre les phases, tandis que la disposition des phases (abc-acb) produit un champ électrique plus élevé que tous les autres dispositions des conducteurs de phase.

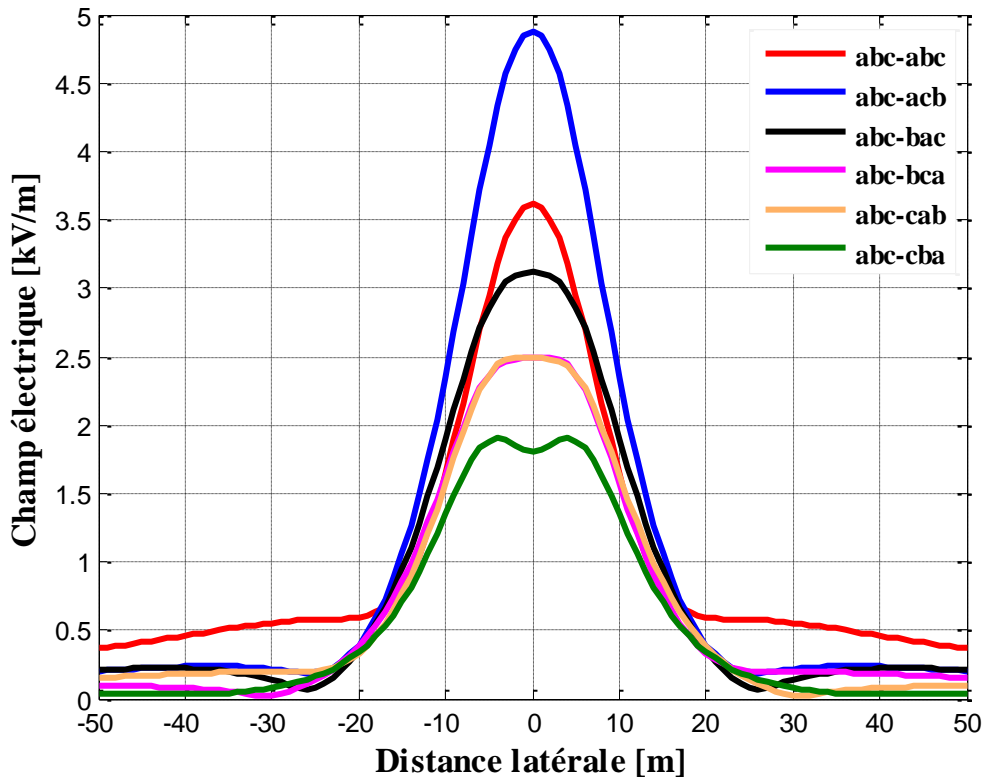


Figure III-13: Comparaison du champ électrique dans la disposition de différentes phases pour une ligne verticale à double circuit 275 kV

III.4. Calcul du champ électrique perturbé en présence du corps humain

L'augmentation de la demande de l'énergie électrique a engendré l'augmentation de la tension de fonctionnement pour les lignes à haute tension 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 de champ électrique autour de ces lignes. Les lignes de transport à haute tension créent des champs électriques sur les systèmes biologiques, particulièrement sur les corps humains qui sont situés au sol se tenant sous une ligne à haute tension.

Le champ électrique au niveau du sol sous une ligne de transmission à haute tension est approximativement uniforme et les lignes de champ sont verticales au niveau du sol. Mais En présence d'un corps humain, le champ électrique au niveau du sol est fortement perturbé, en raison des charges extérieures accumulées sur le corps humain. Le champ électrique au niveau du sol peut atteindre plusieurs fois le champ électrique uniforme.

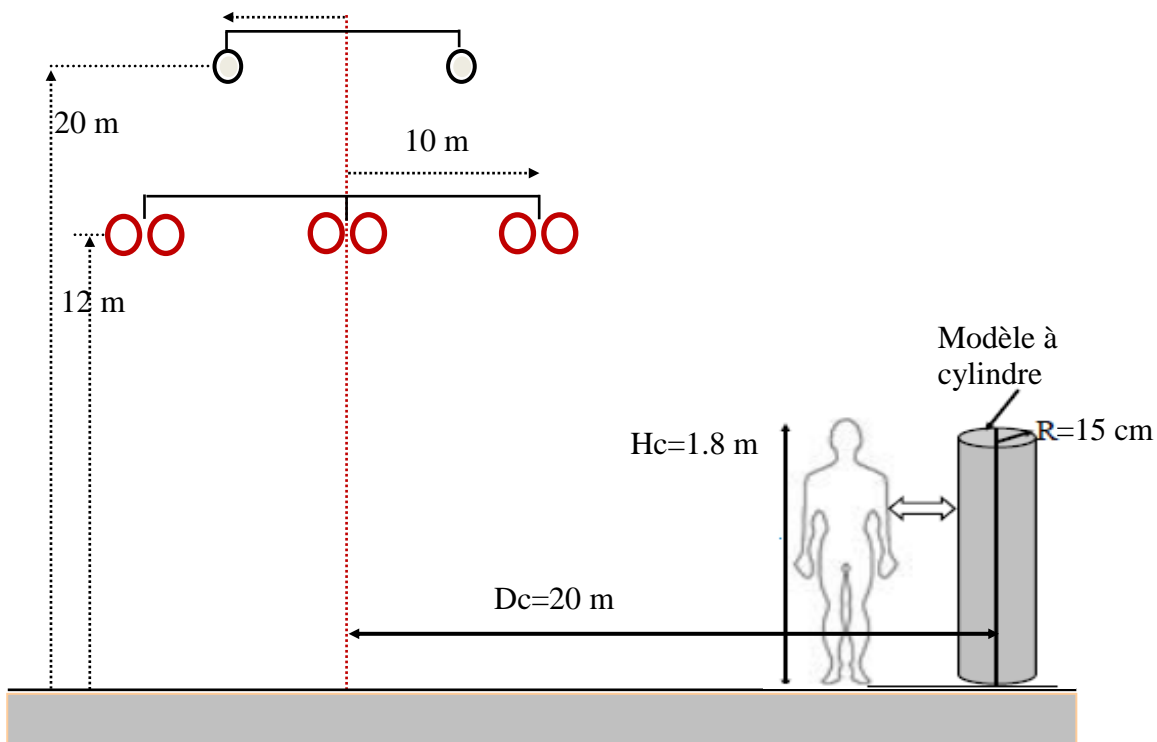


Figure III -14 : Modèle en 2D du corps humain

En utilisant la même configuration géométrique précédente de la ligne électrique, on considère un être humain d'une hauteur de 1.8 m, situé à une distance de 20 m par rapport au centre de la ligne électrique. Pour simplifier le calcul, il est préférable de considérer le modèle humain comme une forme cylindrique d'un rayon de 15 cm. En conséquence, le modèle de bloc est simplifié et réduit à quelques tissus biologiques distinctifs notamment la peau de l'être humain avec une perméabilité relative égale à 1. Le modèle simplifié est montré sur la figure (III-14) ci-dessus.

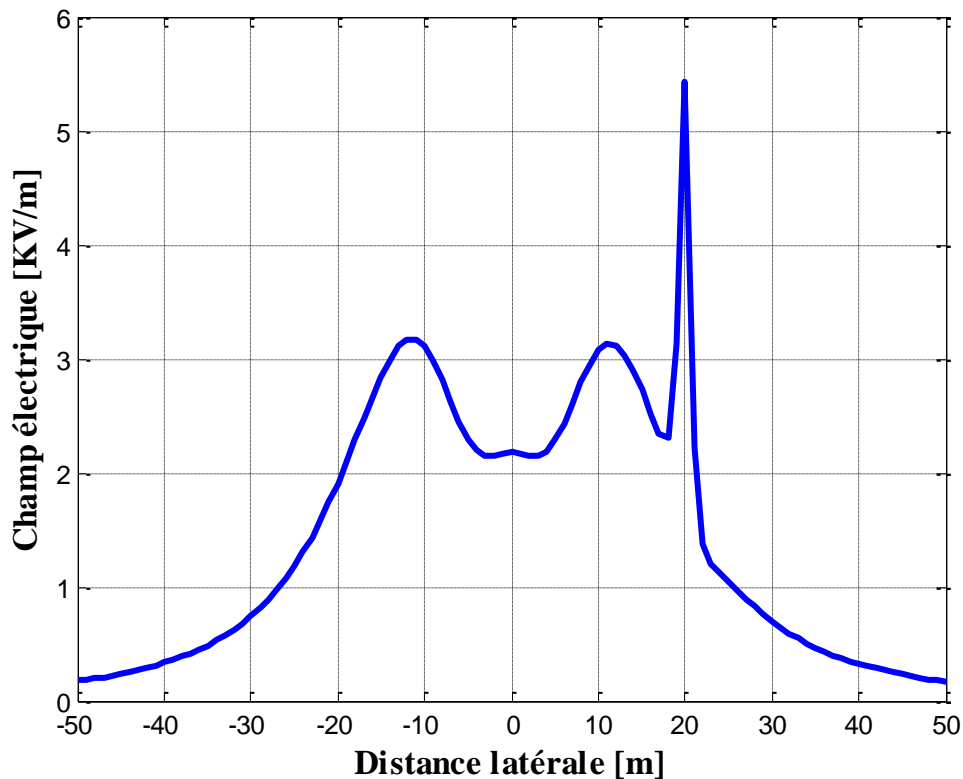


Figure III -15 : Profil latéral du champ électrique à 1 mètre au-dessus du sol avec la présence d'un être humain

La figure (III -15) représente le profil latéral du champ électrique à une hauteur d'un 1 mètre au-dessus du sol, avec la présence d'un être humain. On constate d'après ce graphe que la présence de l'être humain sous et au voisinage d'une ligne à haute tension à un effet significatif sur la distribution du champ électrique.

En effet le champ électrique subit à une augmentation considérable à l'endroit où l'être humain est situé, à la suite des charges électriques accumulées sur le corps humain à travers l'induction électrostatique (ou couplage capacitif), ces charges portées par l'être humain créent à leur tour un champ électrique, lequel vient se superposer au champ électrique original.

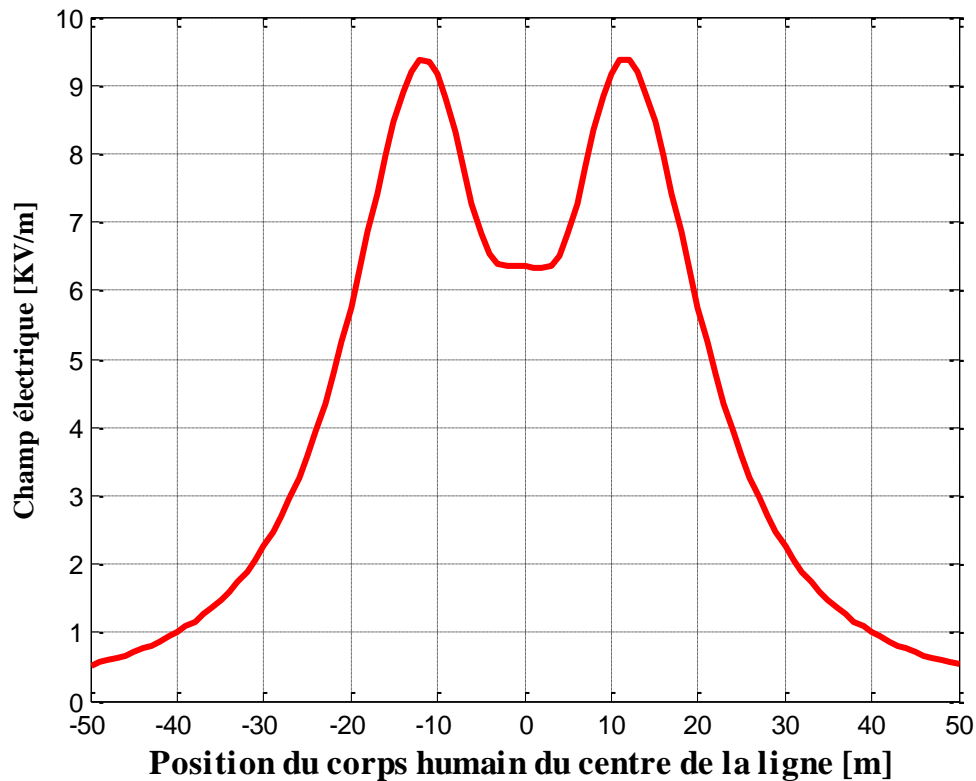


Figure III -16: L'effet de la position corps humain sur la distribution du champ électrique

L'effet de l'emplacement de l'être humain sur la répartition du champ électrique perturbé à 1 m au dessus du sol est illustré à la figure (III -16). On remarque que le champ électrique perturbé au niveau du corps humain est intense sous le centre de la ligne, puis il croit progressivement à mesure qu'on s'éloigne du centre de la ligne de transmission jusqu' à une valeur maximale, puis il décline régulièrement avec la l'augmentation de la position de l'être humain du centre de la ligne pour atteindre des valeurs négligeables très loin de ce centre.

III.5. Calcul de la densité de courant induit dans le corps humain

Les champs électriques et magnétiques à courant alternatif induisent des charges extérieures sur les corps humains, qui auront par conséquent un écoulement de faible courant à la surface du corps humain. L'intensité de la densité du courant induit dans l'organisme humain à la fréquence industrielle de 50-60 Hz est pratiquement trop faible pour avoir des effets marqués sur l'être humain.

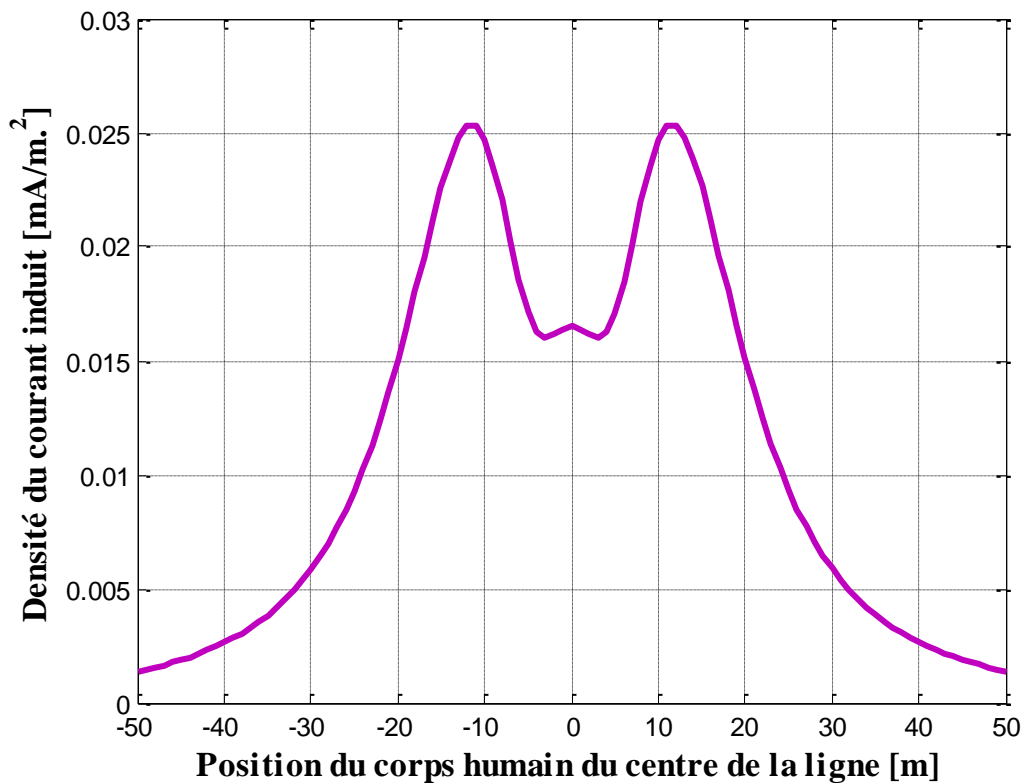


Figure III -17: Densité de courant produite dans un corps humain exposé à un champ électrique de fréquence industrielle

La densité du courant induit sur la surface du corps humain est directement due à l'effet du champ électrique créé par la ligne électrique, son intensité est proportionnelle à la composante normale au champ électrique.

La figure III -17 montre les résultats de calcul de la densité du courant induit sur la surface du corps humain situé à des distances différentes à partir de l'axe central de la ligne de transport.

On peut voir que la densité du courant induit est maximale près et sous les conducteurs latéraux.

La densité du courant induit sous le conducteur central est inférieure à celle calculée précédemment que les conducteurs latéraux. La densité du courant induit décroît rapidement avec l'accroissement de la position de l'être humain la distance, à un point situé très loin du centre de la ligne, la valeur est environ dix fois plus faible que la valeur maximale rencontrée sous la ligne.

III.6. 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 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.

Il y a de nombreux facteurs qui affectent les valeurs des champs électriques produits par une ligne électrique aérienne haute tension, il dépend directement du niveau de la tension de la ligne, la distance de séparation entre les conducteurs de phase, aussi de la hauteur des conducteurs par rapport au sol, il est affecté principalement par la géométrie de la ligne électrique simple et double et les séquences des conducteurs de phase d'une ligne HT.

La présence de l'être humain au dessous ou à proximité d'une ligne à haute tension perturbe fortement le champ électrique à cause de l'accumulation de charges électriques à la surface de la peau de l'être humain. Le corps humain est un bon conducteur d'électricité. Sous l'influence d'un champ électrique perturbé alternatif, les charges électriques déposées sur le corps subissent un mouvement de va-et-vient au même rythme que la fréquence de la tension électrique, ce champ produit donc une faible densité du courant induit dans le corps.

Conclusion Générale

Conclusion générale

Les lignes électriques assurent la fonction "transport de l'énergie" sur les longues distances, leur rôle est donc de transporter l'énergie électrique en un site de la production vers les consommateurs.

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 sur l'environnement. Il résulte de ce qui précède, que lorsqu'un corps humain est plongé dans un champ électrique, celui-ci provoque une migration de charges électriques, qui viennent se disposer à la surface de ce corps. Les charges portées par le corps humain créent à leur tour un champ électrique, lequel vient se superposer au champ d'origine de la ligne électrique. C'est cette superposition qui est la cause d'une déformation du champ électrique total au voisinage du corps humain et l'on parle alors de champ électrique perturbé.

Notre travail consiste à déterminer précisément les valeurs du champ électrique générées par une ligne aérienne électrique à haute tension, et la densité du courant induit sur la surface du corps humain, afin de répondre aux préoccupations du public vis-à-vis les effets indésirables des champs électriques générés par ce réseau électrique. 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 (simple et double circuit), le champ électrique dépend directement du niveau de tension, il dépend également de la distance mutuelle des conducteurs de phase et avec la hauteur des conducteurs de phase à partir du sol.

Conclusion générale

Également, nous avons trouvé que la densité du courant induit sur la surface du corps humain est très faible par rapport aux courants fixés par la commission internationale de protection contre les rayonnements non ionisants (ICNIRP).

En perspective, on suggère que cette étude pourrait être élargie à un calcul numérique de la densité du courant induit en utilisant la méthode des charges fictives. Dans l'analyse que nous allons le proposer, le corps humain est modélisé par une sphère pour la tête, un cylindre mince pour le cou, un cylindre épais pour la taille et un cylindre épais mais de peu de rayon pour les jambes et un cylindre de longueur très petite pour les chaussures.

Bibliographie

- [1] Nekrouf. A, Sebbagh. W : Calcul des courants induits Dans les objets placés au voisinage des lignes Haute Tension. PFE, Université Djilali liabbes de SBA, 2002.
- [2] Nicolas FAURE: modélisation électromagnétique en présence d'espace application l'étude de tubes électronique de types magnétron, thèse de doctorat, université de limoges, 2006.
- [3] P. Krempf : Précis Electromagnétisme, MP, Cours Méthodes Exercices résolus, Bréal 2004..
- [4] Fred Gardiol: électromagnétisme volume 3, presses polytechnique et universitaires romandes Lausanne, 1994.
- [5] Dhanistha Panyasak : Réduction de l'émission électromagnétique des circuits intégrés : l'alternative asynchrone, thèse doctorat, institut national polytechnique de Grenoble, 2004.
- [6] S. Demarty Contribution à l'étude électromagnétique théorique et expérimentale des cartes de circuit imprimé, thèse doctorat, université de limoges, Thèse N° 40-2006.
- [7] Samuel Akue Boulingui : Etude du couplage électromagnétique entre circuits intégrés par émulation du perturbateur - Application en téléphonie 3G, thèse doctorat, l'Université de Toulouse, 2009.
- [8] Redouane Tahmi : Contribution à l'Etude des Perturbations Electromagnétiques des Convertisseurs de l'Electronique de Puissance, Ecole Nationale Polytechnique, ENP, Thèse de Doctorat d'Etat ,2006.
- [9] Emmanuel Batista: Nouvelles Structures Electroniques pour le Transport Electrique, Impacts des nouvelles contraintes d'intégration sur les interférences électromagnétiques et moyens de prévision de la Compatibilité Electromagnétique, thèse doctorat, l'Université de Toulouse, 2009.
- [10] Abdallah Darkawi : La Compatibilité Électromagnétique (CEM). École d'ingénieur. France. 2016.
- [11] Le ha hoang : Contribution à la modélisation tridimensionnelle des interactions champ électromagnétique – corps humain en basses fréquence, thèse de doctorat, ECL 2007 L'école centrale de lyon
- [12] 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.

- [13] 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.
- [14] 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.
- [15] 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.
- [16] Berrdjem Chamsiddine, Boudjerda Lahcen : Modélisation analytique des champs électromagnétiques rayonnés par une ligne électriques HT 400 KV, Mémoire de Master , Université Badji Mokhtar Annaba, juin 2017.
- [17] 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.
- [18] Cigré : Group de travail, 36.01, Effet couronne et champs, Le transport de l'énergie électrique et 'Environnement : Champs, Bruits et Perturbations, no:74
- [19] ICNIRP, International Commission on Non-Ionizing Radiation Protection, Guidelines for Limiting Exposure to Time-Varying Electric and Magnetic Fields (1Hz to 100 kHz), Health Physics, Vol.99, No, 6, pp. 818-836, 2010.
- [20] Pol pirote : Réseaux d'énergie électrique et environnement, effet de couronne et champs, une introduction, septembre 2001. www.tdee.ulg.ac.be/userfiles/file/documenta.pdf