

République Algérienne Démocratique et Populaire
Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique
Université 8Mai 1945 – Guelma
Faculté des Sciences et de la Technologie
Département de Génie Electrotechnique et Automatique



Domaine : Sciences et Technologie
Filière : Electrotechnique
Spécialité : Réseaux Electriques

**Mémoire de fin d'études
Pour l'obtention du diplôme de Master Académique**

**Calcul et minimisation du champ électrique au voisinage d'une
ligne de transport d'énergie électrique haute tension**

Présenté par : **BERKANI FATIHA
HAIHAEM AMAL**

Sous la direction de : **Mr. LADJIMIA**

juin 2017

REMERCIEMENTS



Nous tenons à remercier tous d'abord le bon dieu, le tout puissant le miséricordieux de m'avoir donné la santé et tout ce dont j'avais besoin pour rédiger ce mémoire.

Nous tenons à remercier notre encadreur « Mr LADJIMI ABDELAZIZ » pour l'aide qu'il nous apporte et pour tous les conseils qu'il nous a donné.

Nous tenons à remercier également tous les personnels enseignants de département de l'électrotechnique et Automatique qui nous ont permis d'acquérir beaucoup de connaissance dans le domaine électrique et spécialement le chef de département «Mr MANDACI SOUFIAN» et l'adjoint «Mr BELOUCIF» .

Dédicace

Je dédie ce travail par la grâce de dieu :

A la lumière de ma vie mes très chères père et mère pour le soutien, l'amour, ainsi que tous les sacrifices qu'ils ont consentis pour que je mène à bien mes études.

*A tous mes frères et ses familles: Chahine, Nadir,
Noureddine*

et spécialement mon frère Farid que j'aime fort

A mon chère fiancé Aouadi Abdelghafour et son famille que j'ai le respect beaucoup

A mes sœurs que je souhaite la réussite à ses enfants.

A ma binôme madame Berkani Fatiha qui m'a encouragé et m'a conseillé beaucoup.

A mes chères amies : Salwa et Amina Bouchra imene Zineb djazira que sont vraiment le milieu de ma force et de courage.

Sans oublier: Maymouna, Hanane, Maroua, Nada, Bouchra

Que je les considère mes sœurs dans l'association namae.

AMAL

Dédicace

*Je dédie ce travaille à ma chère mère mes
sœurs et mes frères.*

*A m'entière famille et spécialement mes
enfants : RIAYANE, SOUNDOUS, ABDOU,
ADEM que j'aime beaucoup, sans oublier mon
marie ZAALANI HACENE.*

*Ainsi que mes amis de travail qu'elles m'ont
encouragée pour finir mes études.*

sommaire

Liste de figure

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

Chapitre I : Généralités

1.1. Généralités	2
1.2. Les lignes électriques	2
1.2.1. Composants des lignes aériennes	3
1.2.1.1. Les conducteurs	3
1.2.1.2. Les pylônes	3
1.2.1.3. Les câbles conducteurs	3
1.2.1.4. Les câbles de garde	3
1.2.1.5. Les isolateurs	4
1.2.1.6. Les différentes configurations des lignes électriques	4
1.2.1.7. Types de lignes	4
1.3. Les postes	5
1.3.1. Définition	5
1.3.2. Différents types de postes	6
1.3.3. Composants électriques dans un poste [5]	7 X
1.3.4. Les problèmes engendrés pour l'implantation d'un poste électrique	7
1.4. Compatibilité électromagnétique	8
1.4.1. Sources de perturbation électromagnétiques	8
1.4.1.1. Classification	8
1.4.2. Compatibilité électromagnétique et réseau de transport d'énergie	9
1.4.3. Couplage électromagnétique	9
1.4.3.1. Couplage par conduction directe	9
1.4.3.2. Couplage par champ	9
1.5. Action des champs perturbateurs sur les être vivant	11
1.5.1. Interaction des champs électrique basse fréquence avec la matière vivante	11
1.5.2. Induction de courants	12
1.6. Champs électromagnétiques des lignes de transport d'énergie	12
Conclusion	13

TAJ, au
débat de
→ la phrase.

Chapitre II : Calcul Du Champ Eléctrique D'un Ligne HT Par La Méthode Des Eléments Finis

Introduction	14
2.1. Notions générales d'électromagnétisme	14
2.1.1. Définitions	14
2.1.2. Les équations de Maxwell	14
2.1.2.1. Potentiel électrique scalaire	16
2.1.2.2. Potentiel vecteur magnétique	16
2.1.2.3. Relation entre champ électrique et potentiel vecteur magnétique	16
2.2 Méthode de calcul du champ électrique d'une ligne de transport d'énergie électrique	17
2.2.1. Modèle électrostatique de Maxwell	17
2.2.2. Formulation éléments finis du problème électrostatique	18
2.2.2.1 Organigramme de traitement du problème électrostatique- magnétostatique	19
2.3. Validation expérimentale	20
2.3.1. Ligne étudiée	20
2.3.1.1. Procédé de calcul du champ électrique par éléments finis	21
2.3.1.2. Matériels de mesures	22
2.3.2. Comparaison	24
2.4. Conclusion	25
Chapitre III : Applications "Applications" P	
3.1. Introduction	26
3.1.1. Influence de la configuration de la ligne	26
3.1.1.1 Exploitations des résultats	28
3.1.2. Influence de <u>La</u> tension d'alimentation	30
3.1.3. Influence du câble de garde	30
3.1.4. Ligne électrique en faisceaux	32
3.1.5. Influence de la hauteur de la ligne	36
3.1.6. Influence de la distance entre phase	36
3.2. Réduction du champ électrique émis par une ligne électrique aérienne haute tension	37
3.2.1. Réduction du champ électrique émis par une ligne électrique par la technique des écrans	37
Conclusion	38

Conclusion générale	40
Références Bibliographiques	41

Liste de figure

Figure 1.1. Différents configuration d'une ligne de transport d'énergie électrique.....	4
Figure 1.2. Les types de lignes.....	5
Figure 1.3. Différents types des postes électriques.....	6
Figure 1.4. Différents composants électriques d'un poste.....	7
Figure 1.5. Couplage par conduction-couplage par champ électromagnétique.....	10
Figure 1.6. Capacité mutuelle.....	10
Figure 1.7. Les modes de couplages (résumé).....	11
Figure 2.1. Organigramme du principe de résolution du problème magnétostatique/ électrostatique linéaire par la méthode des éléments finis.....	19
Figure 2.2. Ligne étudié 400 KV (Draouche-Ramadan Djamel).	20
Figure 2.3. Géométrie de la ligne teste.....	21
Figure 2.4. Domaine d'étude.....	21
Figure 2.5. Maillage du domaine d'étude (Zoom).....	22
Figure 2.6. Instrument de mesure du champ électrique.....	23
Figure 2.7. Champ électrique généré par une ligne 400KV à 1m du sol.....	25
Figure 3.1. Différentes configurations de la ligne.....	27
Figure 3.2. Maillages des domaines d'études.....	28
Figure 3.3. Champ électrique au voisinage d'une ligne en nappe au niveau du sol.....	28
Figure 3.4. Champ électrique au voisinage d'une ligne en triangle au niveau du sol.....	29
Figure 3.5. Champ électrique au voisinage d'une ligne en drapeau au niveau du sol.....	29
Figure 3.6. Champ électrique à 1m du sol émis par une ligne de transport d'énergie pour les trois configurations.....	29
Figure 3.7. Influence de la tension d'alimentation.....	30
Figure 3.8. Ligne en nappe avec un câble de garde.....	30
Figure 3.9. Comparaison du champ électrique à 1m du sol (avec un câble de garde et sans câble de garde).....	31
Figure 3.10. Ligne en nappe avec deux câbles de garde.....	31
Figure 3.11. Champ électrique à 1m du sol avec deux câbles de garde.....	32
Figure 3.12. Ligne en nappe avec deux câbles de garde et deux conducteurs par phase.....	33
Figure 3.13. Maillage du domaine d'étude (zoom).....	33
Figure 3.14. Champ électrique à 1m du sol.....	34
Figure 3.15. Champ électrique à 20 m du sol.....	34

Figure 3.16. Ligne en nappe avec deux câbles de garde et trois conducteurs par phase.....	34
Figure 3.17. Maillage du domaine d'étude (zoom).....	35
Figure 3.18. Champ électrique d'une ligne en nappe (trois conducteurs par phase) à 1m du sol	35
Figure 3.19. Comparaison du champ électrique à 1m du sol (ligne à trois conducteurs de phase ; ligne à deux conducteurs par phase)	36
Figure 3.20. Comparaison du champ électrique à 1m du sol	36
Figure 3.21. Comparaison du champ électrique à 1m du sol	37
Figure 3.22. Ligne en nappe avec écrans	37
Figure 3.23. Comparaison du champ électrique à 1m du sol (sans et avec écrans)	38

Chapitre I :

Généralités

1.1. Généralités:

Les sources de production d'énergie électrique, particulièrement les centrales nucléaire ou hydraulique éloignées des centres de consommation c'est -à-dire des centres industriels et des villes. L'énergie est acheminée à distance par des liaisons électriques à grand flux qui remplissent une fonction de transport d'énergie.

Les utilisateurs, extrêmement nombreux, est bien évidemment répartis sur l'ensemble du territoire.

Pour réaliser la liaison des unes avec les autres, il est nécessaire d'établir des connexions en lignes aériennes ou en canalisation. Ces liaisons sont raccordées entre elle à des nœuds appelés postes.

D'une manière générale, les réseaux sont ainsi constitués de branches formés par des lignes de transport d'énergie et de nœuds formés par les postes.

Les branches peuvent former, suivant les cas, des antennes ou des mailles. Il apparait alors qu'il n'est pas techniquement possible de confier à un type unique de réseaux l'ensemble des fonctions complexes qui sont à assurer. Il convient de distinguer trois types de réseaux [4] :

- Le réseau du grand transport et d'interconnexion.
- Les réseaux à caractère régional.
- Les réseaux de distribution.

1.2. Les lignes électriques :

Le transport de l'énergie électrique du producteur au consommateur se fait à l'aide des lignes électrique, qui constituent les artères d'un système d'énergie électrique. Ces lignes sont composées de 3 phases. Chaque phase peut être constituée d'un faisceau de plusieurs conducteurs espacés de quelques décimètres facilitant ainsi le transport de l'énergie.

L'avantage du triphasé est que la somme des tensions et la somme des courants sur l'ensemble des trois phases (régime normal) est égal à zéro [4].

Ceci a pour effet de diminuer le champ électrique et magnétique quand on s'écarte des phases. Nous verrons également que différentes configurations autres que triphasées permettent de réduire encore mieux le champ électrique et magnétique à proximité des lignes haute tension.

1.2.1. Composants des lignes aériennes :

Une ligne électrique est un élément du réseau électrique destiné à transporter l'énergie électrique entre deux ou plusieurs de ses nœuds (postes). La notion de ligne est générale, aussi bien dans son utilisation que dans sa construction. Elle est utilisée pour le transport, l'alimentation et la distribution de l'énergie électrique ; ainsi que pour l'interconnexion des réseaux régionaux et inter territoriaux. Par ligne aérienne (ou en câble) on sous-entend une installation qui intègre dans sa construction un ensemble de composants.

En effet, une ligne aérienne est composée essentiellement par les éléments suivants [5] :

1.2.1.1. Les conducteurs:

Les conducteurs sont en général en aluminium, en cuivre, en aldrej ... etc.

1.2.1.2. Les pylônes :

Leur rôle est de maintenir les câbles à une distance minimale de sécurité du sol et des obstacles environnants, afin d'assurer la sécurité des personnes et des installations situées au voisinage des lignes. Le choix des pylônes se fait en fonction :

- des lignes à réaliser,
 - de leur environnement,
 - des contraintes mécaniques liées au terrain et aux conditions climatiques de la zone.
- Généralement, les lignes peuvent être simples ou doubles. Leur silhouette dépend de la disposition des câbles conducteurs.

1.2.1.3. Les câbles conducteurs

Pour transporter le courant, on utilise des câbles conducteurs portés par les pylônes. Le courant utilisé est triphasé. Chacune des phases peut utiliser de un à quatre câbles. Les câbles conducteurs sont "nus", l'isolation électrique est assurée par l'air et non par une "gaine isolante".

La distance des conducteurs entre eux et avec le sol garantit la bonne tenue de l'isolement. Cette distance augmente avec le niveau de tension.

1.2.1.4. Les câbles de garde

Il existe aussi des câbles qui ne transportent pas de courant, ce sont les "câbles de garde". Ils sont disposés au-dessus des câbles conducteurs et les protègent contre la foudre.

Certains permettent aussi de transiter des signaux de télécommunication nécessaires à l'exploitation du réseau public de transport d'électricité.

1.2.1.5. Les isolateurs

Les chaînes d'isolateurs, généralement en verre, assurent l'isolement électrique entre le pylône et le câble sous tension. Les isolateurs sont d'autant plus nombreux que la tension est élevée.

1.2.1.6. Les différentes configurations des lignes électriques :

On distingue des différents modes de configuration des lignes électriques, ces configurations sont:

- En drapeau ;
- En nappe verticale ;
- En nappe Horizontale ;
- En triangle.

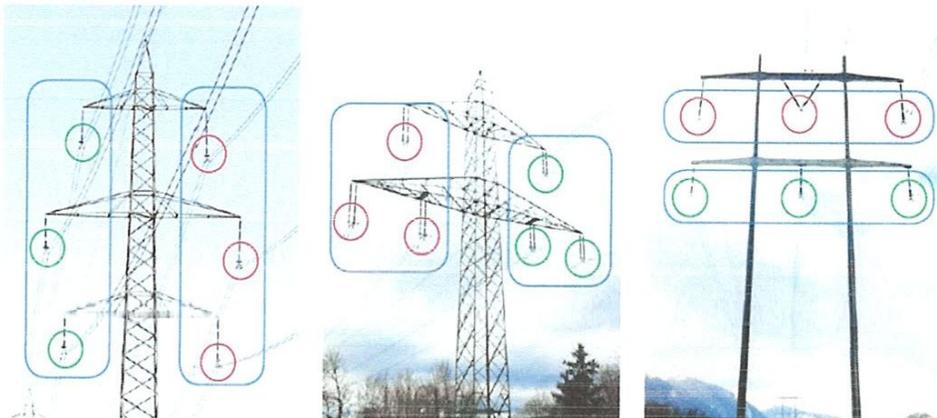


Figure 1. Différents configuration d'une ligne de transport d'énergie électrique

1.2.1.7. Types de lignes :

Les lignes peuvent être classées suivant plusieurs critères :

- Situation dans l'espace : lignes aériennes, lignes souterraines (câbles).
- Classe de tension.
- Nature de la tension : continue, alternative monophasé ou triphasée.

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

-La THT entre 220 à 800 kV, ces lignes constituent le national dit grand transport et d'interconnexion (la THT est essentiellement et deux niveaux 200 et 400 KV).

répartition

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

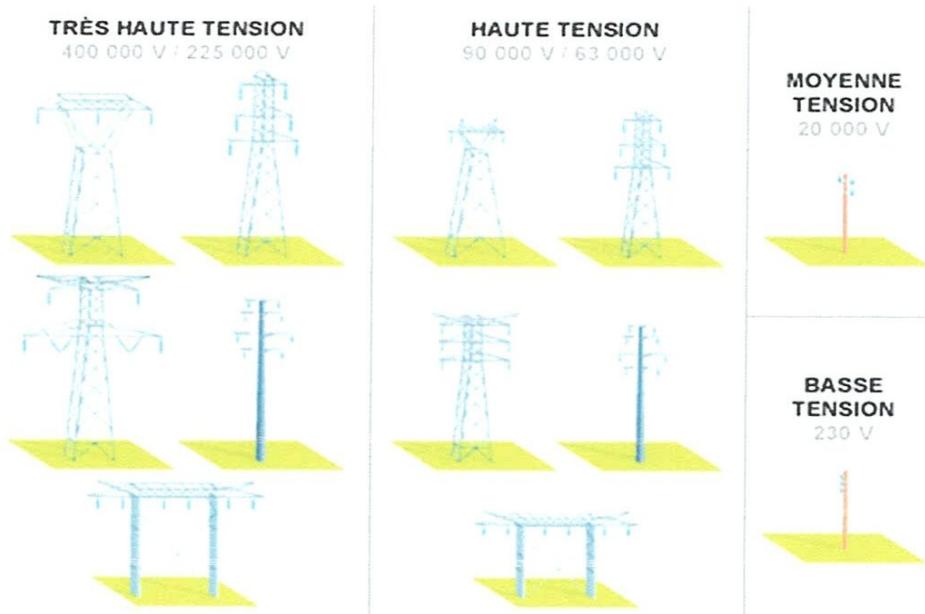


Figure 1.2. Les types de lignes

1.3. Les postes :

1.3.1. Définition:

A la sortie des centrales de production, l'énergie électrique est à très haute tension afin de limiter les pertes par effet joule d'une part, et de satisfaire les demandes plus en plus importantes des quantités d'énergie d'autre part.

Pour transporter économiquement l'électricité, il est donc nécessaire d'élever sa tension puis de l'abaisser par plusieurs transformations successives, les transformateurs, qui constituent les *organes* de liaison entre réseaux et des tensions différentes, sont installés dans les postes qui colportent donc au moins deux jeux de barres à deux tensions différentes.

La partie centrale de poste est constituée par un ou plusieurs jeux de barres triphasés. Exploités à une tension déterminée et auxquels chaque branche est raccordée par l'intermédiaire d'un appareil de coupure qui permet de le séparer du réseau.

Le plus souvent ; un poste comporte un ou deux jeux de barres, un second jeu de barres se justifie non seulement parce qu'il permet une meilleure exploitation du réseau, mais aussi parce qu'il est pratiquement indispensable à sa de fonctionnement [5].

1.3.2 Différents types de postes:

Les considérations suscitées conduisent à distinguer types de postes suivant les fonctions qu'ils assurent :

A chaque type de postes correspondent un schéma électrique et des dispositions constructives particulières

- ✦ **Postes de sortie de centrale :** le but de ces postes est de raccorder une centrale de production de l'énergie au réseau ;
- ✦ **Postes d'interconnexion :** le but est d'interconnecter plusieurs lignes électriques (poste A dans la figure 1.3).
- ✦ **Postes de transformations :** le but est de transformer le niveau de tension, à l'aide d'un transformateur.
- ✦ **Postes de distribution :** le but est d'abaisser le niveau de tension pour distribuer l'énergie électrique aux clients résidentiels ou industriels.
- ✦ **Postes mixtes :** Assurant à la fois la fonction d'interconnexion et la fonction de transformation, ces postes très fréquents. (poste B dans la figure.1,3).

L'aspect des postes électriques varie fortement suivant leurs fonctions. Les postes peuvent être en surface à l'intérieur d'une enceinte, souterrains, dans des bâtiments qu'ils desservent [5].

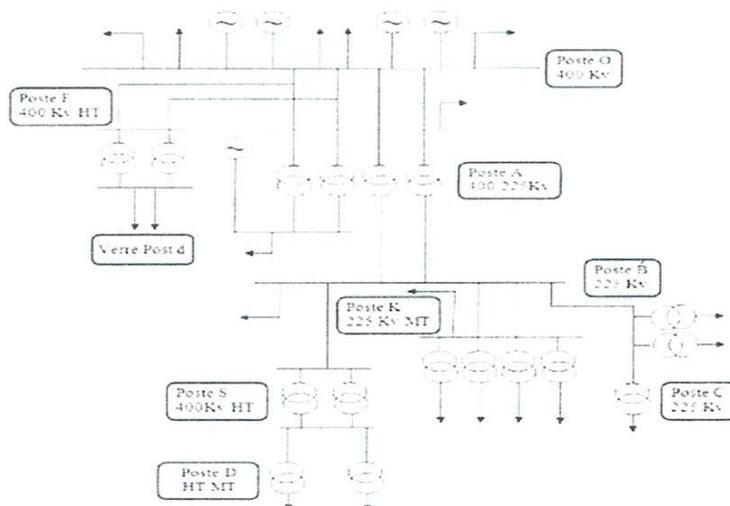


Figure 1.3. Différents types des postes électriques

1.3.3. Composants électriques dans un poste [5] :

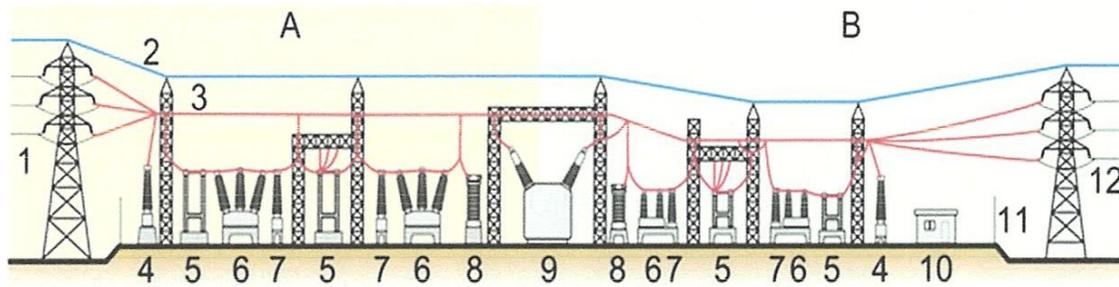


Figure 1.4. Différents composants électriques d'un poste

A : côté primaire

B : côté secondaire

1. Ligne électrique primaire

2. Câble de garde

3. Ligne électrique

4. Transformateur de tension

5. Sectionneur

6. Disjoncteur

7. Transformateur de courant

8. Parafoudre

9. Transformateur (de puissance)

10. Bâtiment secondaire

11. Clôture

12. Ligne électrique secondaire

1.3.4. Les problèmes engendrés pour l'implantation d'un poste électrique :

L'implantation d'un poste électrique est loin de poser les problèmes environnementaux suscités par l'implantation d'une centrale électrique ou d'une ligne à haute tension.

✚ **L'esthétique** : les postes électriques utilisant une technologie à isolation dans l'air sont fortement déconseillés en zone urbaine de par la surface nécessaire pour implanter les différentes parties qui doivent être isolées entre elles et pour des raisons de sécurité. On préférera des postes à isolation gazeuse installés en bâtiment solution idéale en zone urbaine voir en ville en sous-sol, sinon en espace ouvert la surface est réduite au maximum (4 à 6 fois moins que pour un isolement en technologie en espace libre).

✚ **Les nuisances sonores** : les phénomènes de striction dans les transformateurs engendrent un bruit continu ainsi que le bruit des ventilateurs pour les transformateurs de fortes puissances pouvant être gênant pour le voisinage.

✚ **Les nuisances magnétiques** : chaque site doit faire l'objet d'une étude de réduction des champs électromagnétiques résultant des fuites des circuits magnétiques. Les effets de ces fuites sont visibles sur les télévisions ou écrans de PC à tube par une légère danse de l'image. Elles doivent toujours être inférieures aux normes 25 μ T pour être sans effet sur la santé.

1.4. Compatibilité électromagnétique

La compatibilité électromagnétique (CEM) « c'est l'aptitude d'un appareil ou d'un système à fonctionner dans son environnement électromagnétique de façon satisfaisante et sans produire lui-même des perturbations intolérables pour tout ce qui se trouve dans cet environnement ».

Le réseau de transport d'énergie étant parmi les équipements susceptible d'être perturbateur (émission à différentes fréquences) et perturbé (présence en sein de l'appareillage de contrôle et de commande du réseau) [6].

1.4.1. Sources de perturbation électromagnétiques:

1.4.1.1. Classification :

On peut classer les sources de perturbations électromagnétiques selon quatre critères :

1-L'origine :

-Les sources de perturbations d'origines naturelles (la foudre...)

-Les sources de perturbations Artificiels (émetteurs radio et TV, téléphone portable, ligne de transport d'énergie...).

2-La fréquence

-Les perturbations basses fréquences,

-Les perturbations moyennes fréquences,

- perturbations Hautes fréquences,

3- Support de propagation

-Les perturbations conduites par des conducteurs, qui sont caractérisées par leur courant et potentiel électrique.

-Les perturbations rayonnées dans l'air, qui caractérisées par leurs champs électriques et magnétiques.

4-La nature temporelle

-Les perturbations permanentes ou entretenues, qui brulent essentiellement les circuits analogiques.

-Les perturbations transitoires qui plantent les circuits numériques.

1.4.2. Compatibilité électromagnétique et réseau de transport d'énergie :

L'environnement direct du réseau de transport d'énergie d'un poste est le siège de multiples sources d'interférences électromagnétiques. Ces sources peuvent être classées selon leurs fréquences d'émission :

1-Sources basse fréquence (SBF) :

De nombreuses études ont montré l'existence des champs électromagnétiques dans la bande basse fréquence. Ces champs sont principalement dus au rayonnement des lignes et des jeux de barres.

2-Sources MF

Les champs rayonnés dans cette gamme de fréquence ont pour principales origines :

-Les commutations dans les systèmes de l'électronique de puissances.

-Les signaux moyenne-fréquence transmis, en permanence ou occasionnellement, pour des besoins particuliers (contrôle...) parmi ces signaux : les courants porteurs.

-L'effet couronne dans les sections conductrices du poste (ligne, jeux de barres,...).

3-Sources HF

Les champs rayonnés dans cette gamme de fréquence sont dus aux transitoires dans le réseau de transport d'énergie, les principales sources sont :

-Les ondes transitoires générées par les manœuvres (ouverture et fermeture des interrupteurs) internes du réseau.

-Les transitoires qui apparaissent lors de l'injection d'une onde de foudre [4].

1.4.3. Couplage électromagnétique

1.4.3.1. Couplage par conduction directe :

Un couplage par conduction directe se produit lorsqu'un conducteur appartenant à un récepteur véhicule un courant électrique qui provient directement d'une source de bruit. Dès lors qu'un courant circule dans un conducteur relié à un récepteur, ce courant trouve toujours un trajet qui lui permet d'y pénétrer. Une fois à l'intérieur, il s'y répartit en obéissant aux lois classiques de l'analyse des circuits électriques ; de cette manière, ses effets peuvent être calculés.

1.4.3.2. Couplage par champ :

Propagation d'un champ électromagnétique dans un milieu non-conducteur (air-autre type de matériau isolant) ou conducteur (blindage métallique).

a- couplage par champ proche :

Ainsi qu'on l'apprend en électromagnétisme, les caractéristiques du champ électromagnétique rayonné par une source de radiations varient en fonction de la distance qui

sépare la source de radiation du lieu où le champ est observé. Près de la source, le champ électromagnétique rayonné dépend essentiellement des caractéristiques de la source, les termes les plus grands des composantes électriques du champ EM varient en fonction de $\frac{1}{r^2}$ et $\frac{1}{r^3}$. Cette région est appelée la zone de rayonnement en champ proche ou zone d'induction.

Dans cette région, les champs \vec{E} et \vec{H} peuvent être considérés séparément. Suivant la composante du champ électromagnétique qui entraîne les effets les plus grands, on parle de couplage par induction électrique ou le couplage par induction magnétique [4].

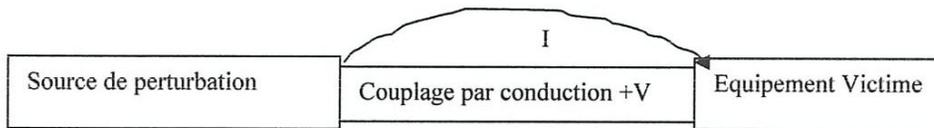


Figure 1.5. Couplage par conduction-couplage par champ électromagnétique

b- couplage par champ électrique:

Il traduit l'existence de lignes de flux d'induction électrique qui partent de la source de perturbation pour aboutir sur le récepteur victime, la cause des couplages par induction électrique (ou couplage capacitifs) sont les capacités parasites. Une capacité parasite entre deux matériaux traduit l'existence de ligne de flux électrique qui partent d'une de ces matériaux pour aboutir sur l'autre, les capacités parasites appartiennent à la catégorie des capacités dites mutuelles.

La figure 1.6 schématise la signification physique d'une capacité parasite et son modèle équivalent [4].

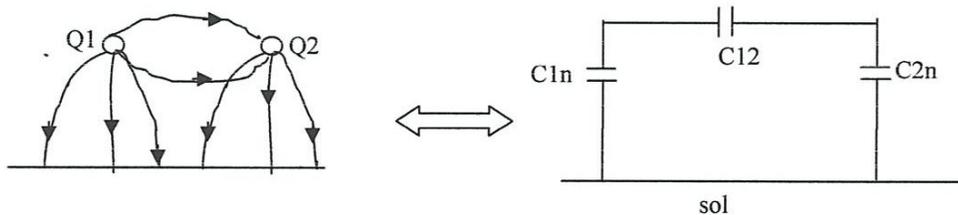


Figure 1.6. Capacité mutuelle

c- Couplage par d'induction magnétique

Il correspond à un récepteur qui est traversé par des lignes de flux d'induction magnétique générées par une source de perturbation ; un tel couplage se représente par une inductance mutuelle.

d- Couplage par un champ lointain :

Au-delà de la zone de rayonnement en champ proche s'étend la zone de rayonnement dite en champ lointain. Dans cette zone, les caractéristiques du champ électromagnétique rayonné ne dépendent que des propriétés du milieu dans lequel le champ se propage. Les composantes E et H du champ électromagnétique sont en phase dans le temps et leurs amplitudes varient en fonction de la distance en $1/r$.

Dans cette zone, et dans l'air, on dit que l'on a affaire à un couplage par champ électromagnétique ou par onde plane; il faut employer les équations d'onde électromagnétique pour calculer les deux champs E et H.

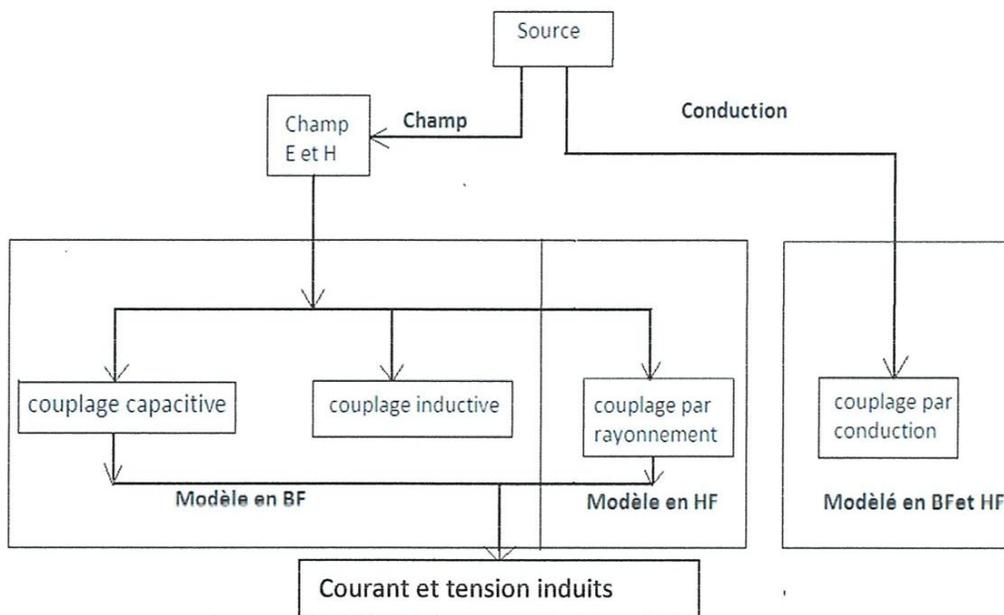


Figure 1.7. Les modes de couplages (résumé)

1.5. Action des champs perturbateurs sur les êtres vivants

15.1. Interaction des champs électriques basse fréquence avec la matière vivante

Les propriétés électriques de la matière sont définies par la permittivité relative ϵ_r et la conductivité σ . La permittivité est liée à la polarisation P de la matière sous l'effet du champ électrique E. La conductivité est liée à la densité de courant j exprimée en ampères par mètres carrés, quand seules les charges interviennent dans la conduction, ce qui est le cas dans la gamme de fréquence des extrêmes basses fréquences (EBF).

Tissu	Conductivité $\sigma(\frac{S}{m})$	permittivité (<u>relative?</u>)
Sang	0.7	5300
Muscle	0,23	$1,8 \cdot 10^7$
Matière grise	0,075	$1,2 \cdot 10^7$
Os	0,02	$1,210^7$
Graisse	0.02	$1,2 \cdot 10^7$
Peau sèche	0.0002	1100

La conductivité augmente avec la teneur en eau des tissus et que la permittivité est élevée pour les principaux tissus dans la gamme de fréquence EBF [7].

1.5.2. Induction de courants

Le champ électrique à l'intérieur de l'organisme est atténué par rapport au champ externe d'un facteur 10^8 à 50 Hz. Les courants induits dans les tissus par les champs externes sont donc négligeables. Ce n'est pas le cas pour le champ magnétique externe car les variations périodiques du champ magnétique à l'extérieur du corps induisent à l'intérieur de celui-ci un champ électrique E (loi de Faraday)

La densité de courant qui en résulte est proportionnelle à l'induction magnétique B, la fréquence et le rayon de la boucle de courant au sein de l'organisme. Ainsi, dans un champ de $1 \mu T$ à 50 Hz, une densité de courant de $6,5 \mu A/m^2$ est induite dans un circuit de 20 cm de diamètre à l'intérieur du corps.

Les courants induits, qui s'ajoutent à ceux qui sont produits in situ par l'organisme, ont des effets qui sont maintenant bien connus. Les limites d'exposition ont été déterminées à partir de ces effets avec un facteur d'incertitude. [7].

1.6. Champs électromagnétiques des lignes de transport d'énergie

Pour diverses raisons, il est important de comprendre les champs électromagnétiques associés à la transmission de la puissance électrique via les systèmes de transport et distribution. Historiquement, c'était important pour assurer l'efficacité et la fiabilité des systèmes électriques. Par exemple, l'analyse du champ électromagnétique a été utilisée pour déterminer les paramètres des lignes de transmission pour l'écoulement de puissance, l'étude de stabilité et des pertes. L'analyse électromagnétique a également été utilisée dans les études de protection contre la foudre et dans la rupture de l'isolation. Une autre préoccupation a été la prévention contre les risques de choc électrique. Ces chocs peuvent se produire à la fois par

contact direct avec le système en question, ou indirectement, par contact avec des systèmes couplés électromagnétiquement au même système. Les lignes électriques peuvent perturber des systèmes tels que téléphone ; câble de communication et circuits de signalisation de chemin de fer. L'atténuation ces interférences nécessitent une compréhension des paramètres qui influent sur le couplage.

Les paliers de tensions des lignes électriques ont augmenté, d'autres effets des lignes électriques sur leur environnement sont devenus des préoccupations. Par exemple, les interférences radio du à l'effet couronne, ont été un problème depuis les années 1930. Plus récemment, les possibles effets sur la santé de l'exposition aux champs de très basse fréquence, champs électriques et magnétiques. C'est cette question qui a amené l'attention des médias à l'environnement des lignes électriques [7].

Conclusion

Dans ce chapitre nous avons introduit brièvement les éléments, du réseau de transport d'énergie, responsables de l'émission du champ électrique en basse fréquence.

Nous avons défini la notion de compatibilité électromagnétique et les différents modes de couplages.

L'exposition au champ électrique peut engendrer dans un dispositif électrique une surintensité une surtension ou les deux en même temps, les effets de l'exposition à ce champ sur l'être vivant peut engendrer des maladies. Le calcul du champ reste incontournable pour l'évaluation des perturbations sur les dispositifs électriques et les effets sur l'être vivant, nous dédions le chapitre 2 et 3 au calcul et minimisation du champ électrique des lignes HT.

Chapitre II :
Calcul Du Champ Eléctrique
D'un Ligne HT Par La
Méthode Des éléments Finis

Introduction

Le développement des réseaux électrique à H.T fait apparaître des problèmes liés au champ électrique élevé qui peuvent causer des dommages sur l'environnement et les objet situés à proximité de ces réseaux .si pour cela il est nécessaire de trouver des moyens pour déterminer et réduire le champ électrique.

2.1. Notions générales d'électromagnétisme

L'électromagnétisme considère les phénomènes électriques et magnétiques à un niveau macroscopique. Les forces électriques et magnétiques produites sur les charges électriques sont liées à l'existence de grandeurs vectorielles appelées respectivement champ électrique \vec{E} et champ d'induction magnétique \vec{B} .

2.1.1. Définitions

a-Champ électrique

Par définition, un champ est l'effet d'une source en un point de l'espace à un instant donné. Le champ le plus connu est le champ de gravitation \vec{g} crée par la terre en un point de l'espace.

D'après cette définition le champ électrostatique \vec{E} est l'effet créé par une charge électrique ou un ensemble de charges immobiles en un point de l'espace. Cet effet se manifeste par une force sur toute charge q placé en ce point : $\vec{F} = q\vec{E}$.

On peut définir le champ électrique comme étant un porteur d'énergie (électrique ou magnétique) de l transférer d'un point de l'espace à un autre [10].

b-Champ d'induction magnétique

Le champ d'induction magnétique \vec{B} traduit l'effet du déplacement des charges électriques (un courant I).

Les variations (dans le temps et dans l'espace) de ces deux grandeurs (\vec{E} , et \vec{B}) sont liées entre eux par les équations de Maxwell.

2.1.2. Les équations de Maxwell

Tous les phénomènes de l'électromagnétisme sont décrits par les quatre équations de Maxwell. Ces équations aux dérivées partielles peuvent être séparées en équations de couplage électromagnétique (2.1) et (2.2) et de conservation (2.3) et (2.4). Ce sont :

- **Maxwell Faraday**

$$\overrightarrow{rot}\vec{E} = -\frac{\partial\vec{B}}{\partial t} \quad (2.1)$$

- **Maxwell Ampère**

$$\overrightarrow{\text{rot}}\vec{H} = \vec{J} + \frac{\partial \vec{D}}{\partial t} \quad (2.2)$$

- **Maxwell Gauss électrique**

$$\text{div}\vec{D} = \rho \quad (2.3)$$

- **Maxwell Gauss magnétique**

$$\text{div}\vec{B} = 0 \quad (2.4)$$

Les grandeurs intervenant dans ces équations exprimées en SI, sont :

- L'induction magnétique B[T]
- Le déplacement électrique D[C.m⁻²]
- Le champ électrique E [V.m⁻¹]
- Le champ magnétique H[A.m⁻¹]
- La densité de courant J[A.m⁻²]
- La densité de charge volumique ρ [C.m⁻³]
- Le temps t[s]

Pour décrire complètement le problème, les relations constitutives du matériau sont ajoutées aux équations de Maxwell.

$$\vec{D} = \varepsilon \vec{E} \quad (2.5)$$

$$\vec{B} = \mu \vec{H} \quad (2.6)$$

$$\vec{J} = \sigma \vec{E} \quad (2.7)$$

où ε représente la permittivité électrique, μ est la perméabilité magnétique et σ est la conductivité électrique. A la limite de séparation de deux milieux correspondant aux indices i et j dans le domaine d'étude, des relations de passage doivent être telles que :

- La relation de continuité de la composante normale de l'induction magnétique \vec{B} :

$$\vec{n}\vec{B}_i = \vec{n}\vec{B}_j \quad (2.8)$$

- La relation de continuité de la composante tangentielle du champ électrique \vec{E} :

$$\vec{E}_i \times \vec{n} = \vec{E}_j \times \vec{n} \quad (2.9)$$

- La relation de continuité de la composante tangentielle du champ magnétique \vec{H} :

$$\vec{H}_i \times \vec{n} = \vec{H}_j \times \vec{n} \quad (2.10)$$

Les formulations peuvent être modifiées selon la nature de système étudié et parfois certaines grandeurs deviennent négligeables. C'est pour cette raison que, des simplifications

peuvent être apportées. Si on considère que les phénomènes étudiés relèvent du domaine quasi-stationnaire à des basses fréquences (50Hz), les courants de déplacement sont négligeables devant les courants de conduction. Ceci se traduit par :

$$\frac{\partial \vec{D}}{\partial t} \ll \vec{J} \quad (2.11)$$

Et l'équation de Maxwell Ampère (2.2) devient :

$$\overrightarrow{\text{rot}} \vec{B} = \mu \vec{J} \quad (2.12)$$

2.1.2.1. Potentiel électrique scalaire

En régime stationnaire l'équation (2.1) devient :

$$\overrightarrow{\text{rot}} \vec{E} = 0 \quad (2.13)$$

Comme le rotationnel d'un gradient est toujours est égale à zéro, il est possible ici d'écrire le champ électrique \vec{E} par :

$$\vec{E} = -\overrightarrow{\text{grad}} V \quad (2.14)$$

Cette relation montre que le champ électrique dérive d'un potentiel électrique scalaire.

où V est le potentiel scalaire électrique.

2.1.2.2. Potentiel vecteur magnétique

Apartir de l'équation de Maxwell Gauss électrique on a :

$$\text{div } \vec{B} = \text{div } \overrightarrow{\text{rot}}(\vec{A}) = 0 \text{ (divergence d'un rotationnel est toujours égale à zero)}$$

$$\text{div}(\vec{B} - \overrightarrow{\text{rot}} \vec{A}) = 0 \Rightarrow \vec{B} = \overrightarrow{\text{rot}} \vec{A}$$

\vec{A} est appelé potentiel vecteur magnétique

$$\vec{B} = \overrightarrow{\text{rot}} \vec{A} \quad (2.15)$$

L'induction magnétique B derive d'un potentiel vecteur magnétique.

2.1.2.3. Relation entre champ électrique et potentiel vecteur magnétique

L'équation de Maxwell Faraday (2.1) s'écrit d'après (2.15) :

$$\overrightarrow{\text{rot}} \vec{E} = -\frac{\partial}{\partial t} (\overrightarrow{\text{rot}} \vec{A}) = -\overrightarrow{\text{rot}} \left(\frac{\partial \vec{A}}{\partial t} \right), \text{ soit } \overrightarrow{\text{rot}} \left(\vec{E} + \frac{\partial \vec{A}}{\partial t} \right) = 0.$$

Puisque le rotationnel d'un gradient est nul, il existe donc une fonction scalaire f telle que :

$$\vec{E} + \frac{\partial \vec{A}}{\partial t} = \overrightarrow{\text{grad}} f \quad (2.16)$$

La fonction f est, à une constante près, l'opposée du potentiel scalaire ($f = -V$) pour que la relation (2.16) soit en accord avec la relation champ potentiel (2.14) des régimes permanents ; donc (2.16) s'écrit dans le cas général :

$$\vec{E} = -\overrightarrow{grad}V - \frac{\partial \vec{A}}{\partial t} \quad (2.17)$$

Le champ électrique dérive d'un potentiel électrique scalaire et d'un potentiel vecteur magnétique.

Hypothèse :

Dans le cadre des systèmes étudiés, on considère que, le terme $\frac{\partial \vec{A}}{\partial t}$ est négligeable devant le terme $\overrightarrow{grad}V$ (ligne haute tension en basse fréquence). Donc la relation (2.17) devient (2.14).

2.2 Méthode de calcul du champ électrique d'une ligne de transport d'énergie électrique

Le calcul du champ électrique rayonné par une structure filaire aux basses fréquences est effectué en utilisant la méthode des éléments finis.

2.2.1. Modèle électrostatique de Maxwell *Quasi-stationnaire*

Il décrit tous les dispositifs dans lesquels le champ électrique est produit par des charges dont la répartition et la valeur ne varient pas en fonction du temps. La conception d'isolateurs et l'étude de la tenue des diélectriques sont les problèmes les plus caractéristiques.

En utilisant de (2.14), l'équation de Maxwell Gauss électrique (2.3) devient :

$$-\text{div}(\overrightarrow{grad}V) = \frac{\rho}{\epsilon} \quad (2.18)$$

On peut dire que les techniques numériques actuelles apportent une solution à ce problème dans la plupart des cas. En effet, l'inconnue est le scalaire V , ce qui impose donc une seule valeur à calculer en chaque point.

De plus, on est assuré de l'existence et de l'unicité de la solution lorsque les conditions aux limites du problème à étudier s'expriment en fonction de V ou de sa dérivée normale $\partial V / \partial n$ aux limites du domaine étudié (ce qui est pratiquement toujours le cas). Généralement, le potentiel est supposé connu sur une limite (condition de Dirichlet) ou bien les lignes équipotentielles scalaires sont supposées orthogonales aux limites (ce qui est le cas sur des plans de symétrie ou au voisinage de matériaux totalement isolants) et la dérivée normale $\partial V / \partial n$ est nulle (condition de Neumann homogène) [11].

2.2.2. Formulation éléments finis du problème électrostatique

Les dispositifs étudiés s'adaptent à une modélisation en deux dimensions dans un système de coordonnées cartésiennes la résolution de ce système par la méthode des éléments finis passent par la mise en équation de (2.18) sous forme d'équations aux dérivés partielles dans le système de coordonnées cartésiennes.

Pour un problème électrostatique et dans un système de coordonnées cartésiennes le champ électrique évolue dans les plans (x, y), la relation (2.18) s'écrit :

$$-\frac{1}{\varepsilon} \left(\frac{\partial^2 V}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 V}{\partial y^2} \right) = \underline{\underline{\rho}} \quad (2.19)$$

En appliquant la méthode de Galerkin à cette équation on a :

$$\iint_{\Omega} \left[\omega_i \left(-\frac{\partial^2 V}{\partial x^2} - \frac{\partial^2 V}{\partial y^2} \right) \right] d\Omega = \iint_{\Omega} \omega_i \varepsilon \rho d\Omega ; \quad d\Omega = dx dy \quad (2.20)$$

Où, Ω est le domaine de résolution, ω_i les fonctions de projection. Cette expression est la forme forte de la formulation éléments finis. Mais l'intégration par partie des termes en dérivées seconde nous donne la forme faible de cette formulation. Cette dernière d'explicitier les conditions aux limites naturelles.

$$\iint_{\Omega} \left[\left(\frac{\partial \omega_i}{\partial x} \frac{\partial V}{\partial x} + \frac{\partial \omega_i}{\partial y} \frac{\partial V}{\partial y} \right) \right] d\Omega - \left[\int \omega_i \frac{\partial V}{\partial x} dx + \int \omega_i \frac{\partial V}{\partial y} dy \right] = \iint_{\Omega} \omega_i \varepsilon \rho d\Omega \quad (2.21)$$

La discrétisation de V sous la forme $V = \sum_j (\omega_j V_j)$ et l'introduction des conditions de Neumann homogènes nous permet d'écrire cette équation sous la forme :

$$\sum_j \left[\iint_{\Omega} \left(\frac{\partial \omega_i}{\partial x} \frac{\partial \omega_j}{\partial x} + \frac{\partial \omega_i}{\partial y} \frac{\partial \omega_j}{\partial y} \right) d\Omega \right] V_j = \iint_{\Omega} \omega_i \varepsilon \rho d\Omega \quad (2.22)$$

Ceci nous conduit à la forme matricielle suivante :

$$[M]\{V\} = \{F\} \quad (2.23)$$

Tel que,

$$M_{ij} = \iint_{\Omega} \left(\frac{\partial \omega_i}{\partial x} \frac{\partial \omega_j}{\partial x} + \frac{\partial \omega_i}{\partial y} \frac{\partial \omega_j}{\partial y} \right) d\Omega$$

$$F_i = \iint_{\Omega} \omega_i \varepsilon \rho d\Omega \quad (2.24)$$

Le maillage utilisé est un maillage triangulaire, et les fonctions d'interpolations sont de premier ordre.

$$\omega_i = (a_i + b_i x + c_i y) \quad i = 1,2,3 \quad (2.25)$$

$$\begin{cases} a_1 = \frac{(x_2 y_3 - x_3 y_2)}{2\Delta_l} \\ b_1 = \frac{(y_2 - y_3)}{2\Delta_l} \\ c_1 = (x_3 - x_2)/2\Delta_l \end{cases} \quad (2.26)$$

Où Δ_l est l'aire du triangle et les autres coefficients a_i, b_i, c_i sont obtenus par une permutation circulaire. On obtient alors :

$$M_{ij} = (b_i b_j + c_i c_j) \Delta_l \quad (2.27)$$

$$F_i = \frac{\Delta_l}{3} \rho \quad (2.28)$$

2.2.2.1 Organigramme de traitement du problème électrostatique- magnétostatique

La méthode des éléments finis permet de résoudre les équations de Maxwell dans des conditions très générales. Ainsi, on est amène à résoudre des systèmes d'équations linéaires, suivant l'organigramme de la figure (2.1).

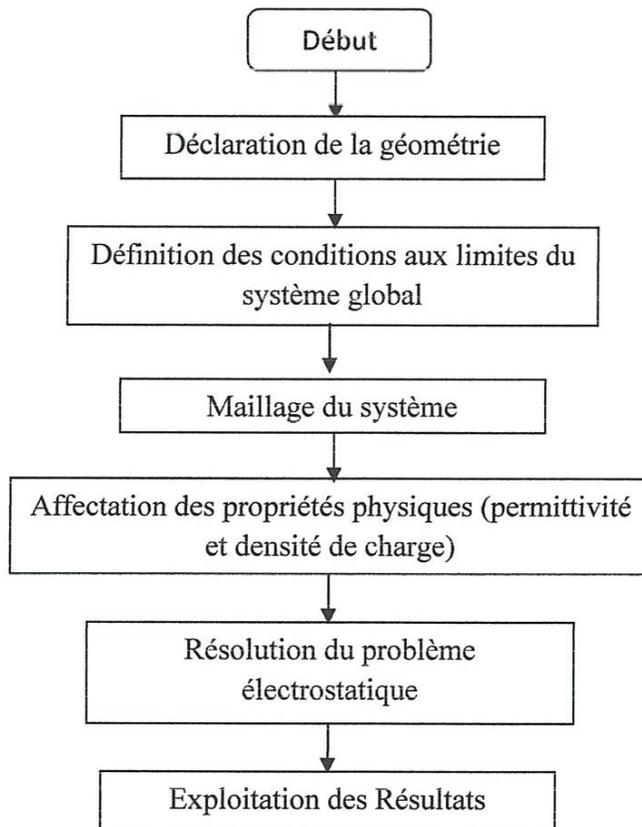


Figure 2.1 : Organigramme du principe de résolution du problème magnétostatique/électrostatique linéaire par la méthode des éléments finis

2.3. Validation expérimentale :

2.3.1. Ligne étudiée

Dans ce paragraphe nous proposons une comparaison entre le modèle éléments finis proposé et les résultats de mesures. Le dispositif test est une ligne haute tension de 400 KV (Ligne entre la centrale électrique de Draouch et Skikda, figure 2.2) [12], possédant les caractéristiques suivantes (figure 2.3) :

-Hauteur des phases : (26m, 32.5m, 26m) ;

-Abscisses des sous conducteurs par phases : (-10.75 ; -10.25 ; 6.75 ; 7.25 ; 10.25 ; 10.75) :

-Rayon des sous conducteurs : ($r=0.015\text{m}$) ;

-Hauteur du câble de garde : (40.6m)

-Abscisse de câble de garde (3m)

-Rayon des câbles de garde (0.012m) .

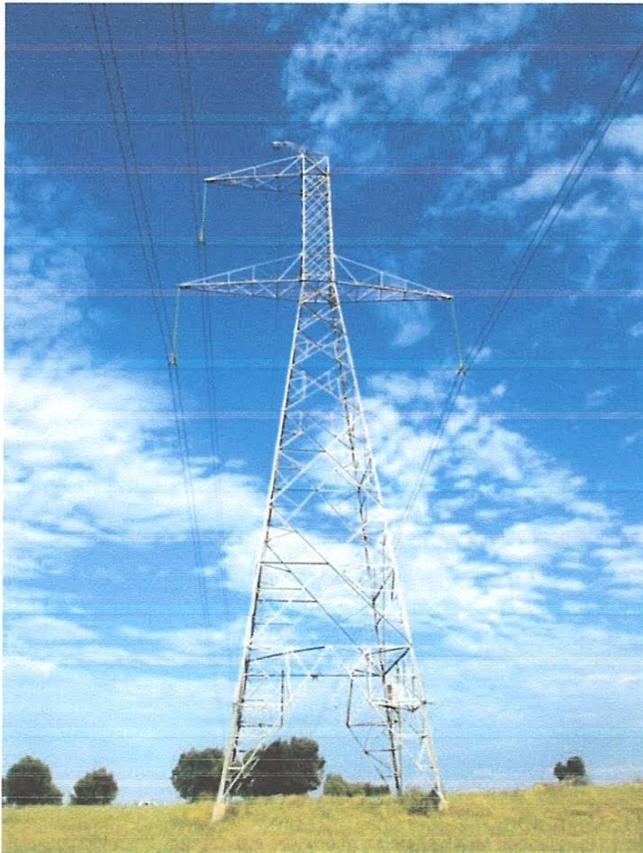


Figure 2.2. Ligne étudiée 400 KV (Draouche-Ramadan Djamel).

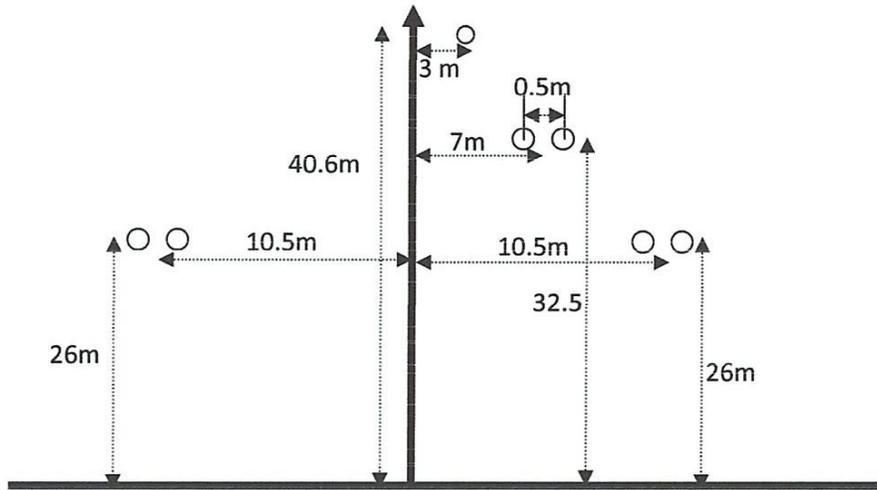


Figure 2.3. Géométrie de la ligne teste

2.3.1.1. Procédé de calcul du champ électrique par éléments finis :

⚡ Domaine d'étude et conditions aux limites

La structure géométrique qui fera l'objet d'étude est représentée par le domaine de résolution de la figure 2.4

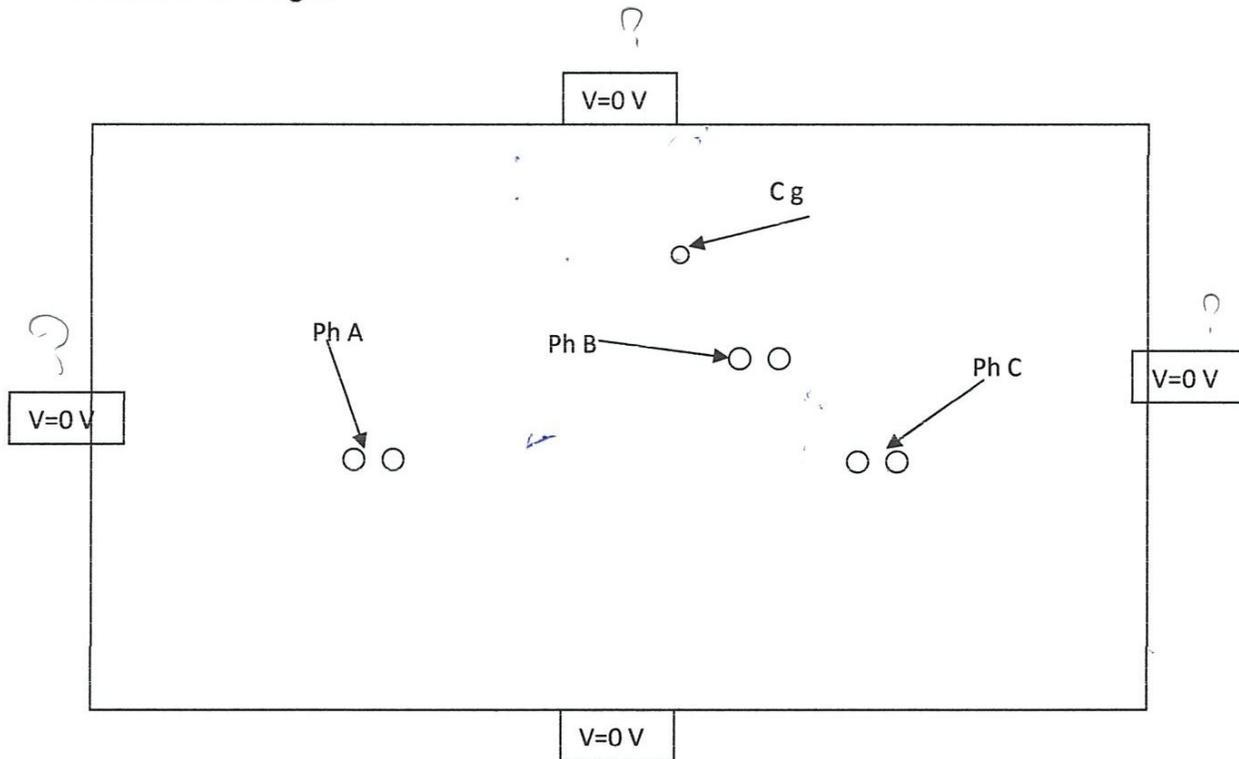


Figure 2.4. Domaine d'étude

Les conditions aux limites associées au domaine d'étude sont :

- Condition de type Dirichlet $V=0$ V sur le câble de garde ;
- Condition de type Dirichlet $V=400$ KV sur la phase A ;
- Condition de type Dirichlet $V=400*(-0.5-j0.76)$ KV sur la phase B ;
- Condition de type Dirichlet $V=400*(-0.5+j0.76)$ KV sur la phase C ;
- Condition de type Dirichlet $V=0$ V le sol.

✚ Maillage du domaine d'étude

Le domaine d'étude maille en éléments finis qui fera l'objet de traitement est celui représenté par la figure 2.5 ci-dessous.

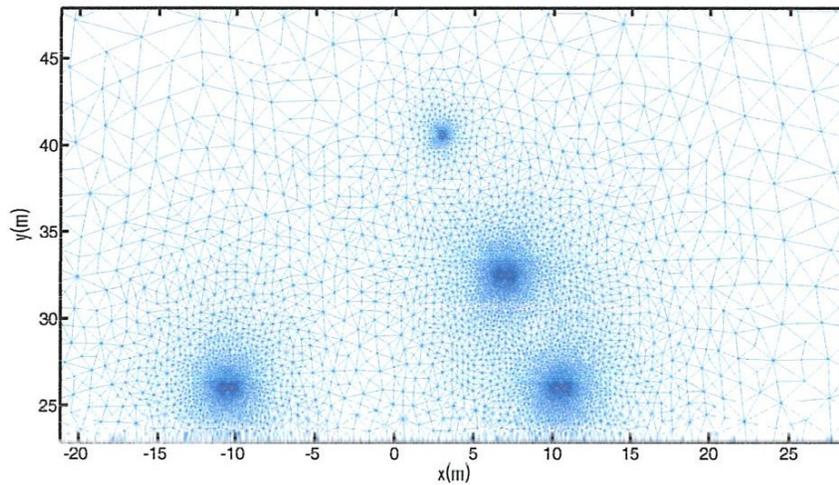


Figure 2.5. Maillage du domaine d'étude (Zoom)

2.3.1.2. Matériels de mesures

L'instrument utilisé pour mesurer le champ électrique est le PMM8440 analyseur du champ électrique et la densité de flux magnétique, avec une gamme de fréquence de 5 Hz à 100 kHz. L'instrument mesure les composants x, y, z du vecteur de champ électrique. Les mesures peuvent être transférées à un ordinateur personnel par l'intermédiaire d'une fibre optique avec un port USB pour le stockage, l'affichage et plus une analyse [12].



Figure 2.6. Instrument de mesure du champ électrique

✚ Résultats de mesures

Le tableau 2.1 résume les résultats de mesures du champ électrique relevés à une hauteur de 1m par rapport au sol sous la ligne de la figure 2.2.

Tableau 2.1. Champ électrique émis par une ligne 400 KV [12]

Distance x en (m)	Champ électrique E en (V/m)
-40	571
-38	655.26
-36	750.32
-34	832.57
-32	909.25
-30	1019.8
-28	1150.4
-26	1285.9
-24	1482.5
-22	1671
-20	1712.58
-18	1754
-16	1660.6
-14	1566.4

-12	1373.2
-10	1149.1
-8	903.61
-6	723.12
-4	668.92
-2	603.67
0	775.708
2	548.896
4	635.9
6	719.25
8	771.96
10	889.18
12	1051.5
14	1214.7
16	1315.85
18	1217
20	1111
22	1025
24	912
26	898
28	735
30	690.1
32	562.8
34	428.1
36	371.55
38	320
40	270

2.3.2. Comparaison

La méthode de calcul du champ électrique d'une ligne haute tension par élément fini a été validée par les données expérimentales d'une ligne électrique 400 KV (figure 2.1). Les mesures nous ont été fournies par [12]. La figure 2.7 montre qu'il y a un accord entre le champ électrique calculé par le modèle élément fini et le champ électrique mesuré à 1m du

sol. Ce résultat permet de valider le programme de calcul du champ électrique d'une ligne haute tension mise en œuvre sous environnement Matlab.

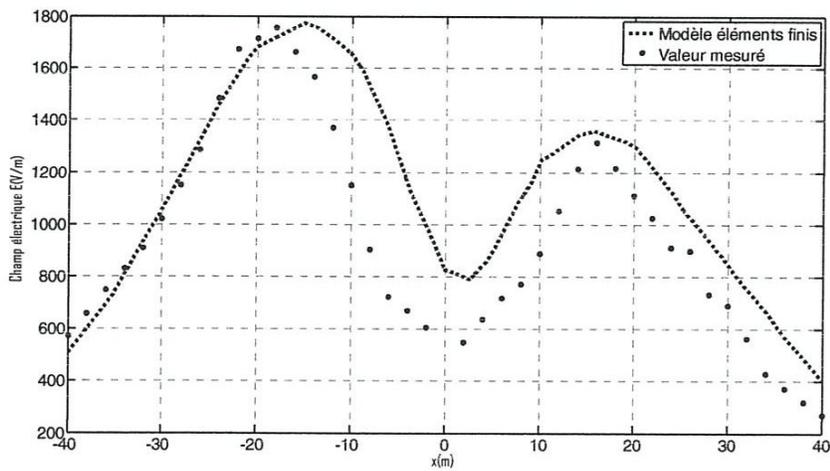


Figure 2.7. Champ électrique généré par une ligne 400KV à 1m du sol

2.4. Conclusion

Dans ce chapitre nous avons présenté les formulations des équations de Maxwell, en termes des potentiels scalaire V et magnétique A , pour le calcul du champ électrique d'une ligne haute tension. Nous avons également proposé un code de calcul du champ électrique par la méthode des éléments finis. La validation est effectuée en comparant les résultats de calcul du champ électrique émis par une ligne haute tension 400 KV avec celles de mesure.

Chapitre III :

Applications

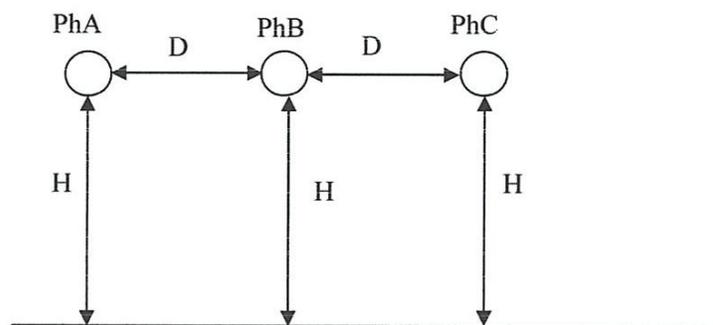
3.1. Introduction

Le champ électrique au voisinage d'une ligne haute tension est en fonction de différents paramètres géométriques et électriques, telle que :

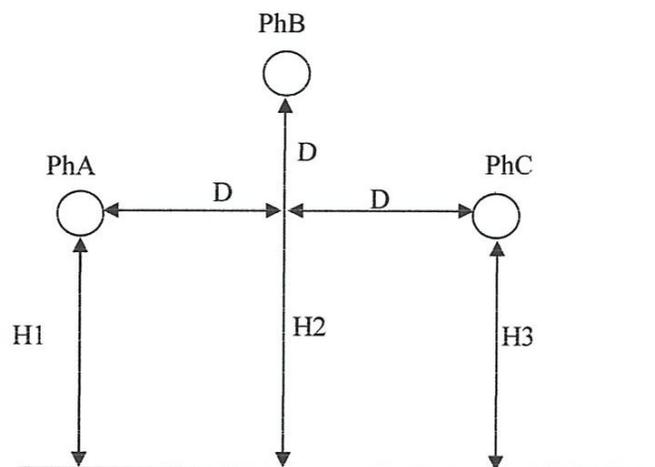
- ✚ La configuration de la ligne
- ✚ La tension d'alimentation
- ✚ La présence du câble de garde
- ✚ Le nombre de conducteur par phase
- ✚ La hauteur de la ligne
- ✚ La distance entre phase
- ✚ La présence des écrans

3.1.1. Influence de la configuration de la ligne

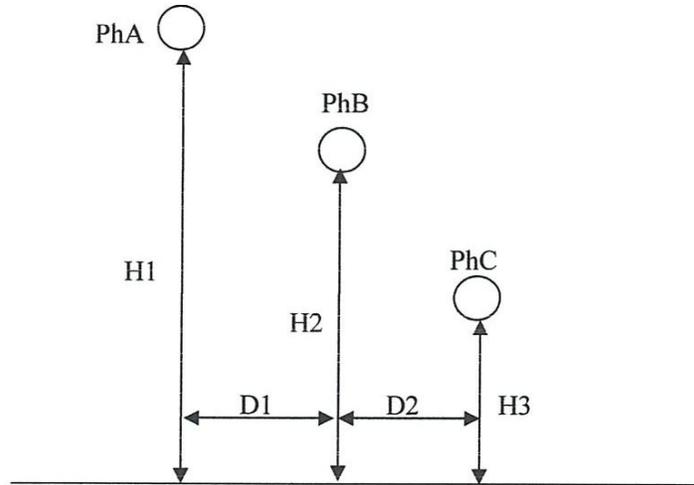
Dans ce paragraphe nous procédés à des calculs effectués sur une ligne de 380KV pour trois configurations (Fig. 4.1) : Ligne en nappe, ligne en triangle, ligne en drapeau et ligne.



a-Ligne en nappe



b) Ligne en triangle



c) Ligne en drapeau

Figure 3.1. Différentes configurations de la ligne

Pour une ligne électrique en nappe, les paramètres géométriques de la ligne sont :

-Hauteurs des conducteurs : $H_1=H_2=H_3=25\text{m}$

-Espacement entre conducteurs : $D=10\text{m}$

-Rayon du conducteur de phase 0.014m

-Pour une ligne électrique en triangle, les paramètres géométriques de la ligne sont :

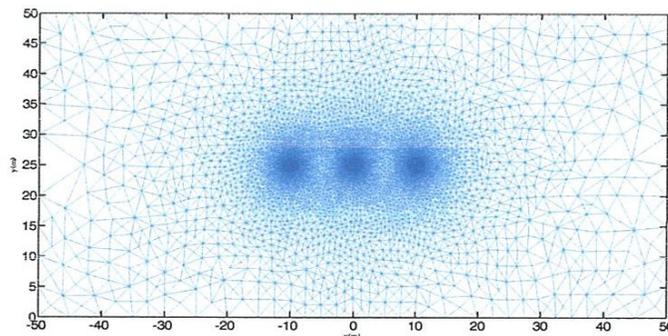
-Hauteurs des conducteurs : $H_1=H_3=25\text{m}$ et $H_2=35\text{m}$

-Pour une ligne électrique en drapeau, les paramètres géométriques de la ligne sont :

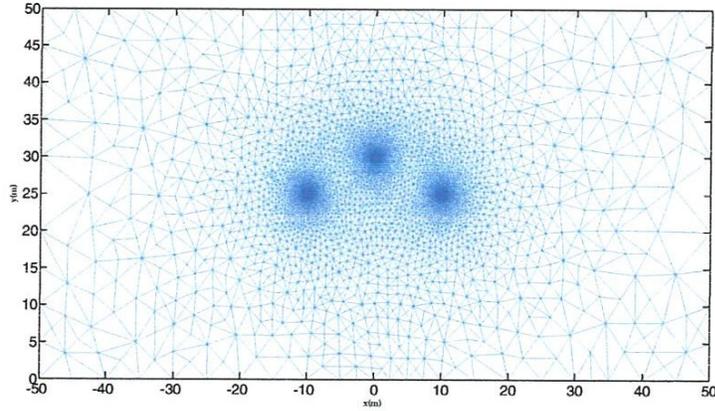
-Hauteurs des conducteurs : $H_1=50$, $H_2=40$ et $H_3=30\text{ m}$

-Espacement entre conducteurs : $D_1=0.3\text{m}$ et $D_2=0.4\text{m}$

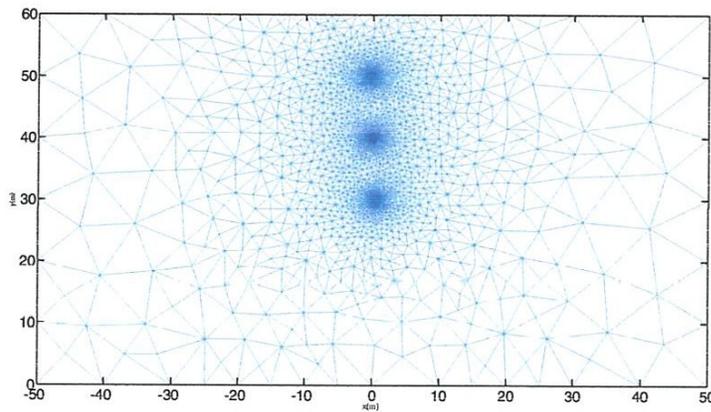
Les domaines d'étude maillent en éléments finis pour les trois configurations sont représentés par la figure 3.2.



a) ligne en nappe



b) Ligne en triangle



c) Ligne en drapeau

Figure 3.2. Maillages des domaines d'études

3.1.1.1 Exploitations des résultats

Les résultats obtenus sont fournis dans les figures 3.4, 3.5 et 3.6

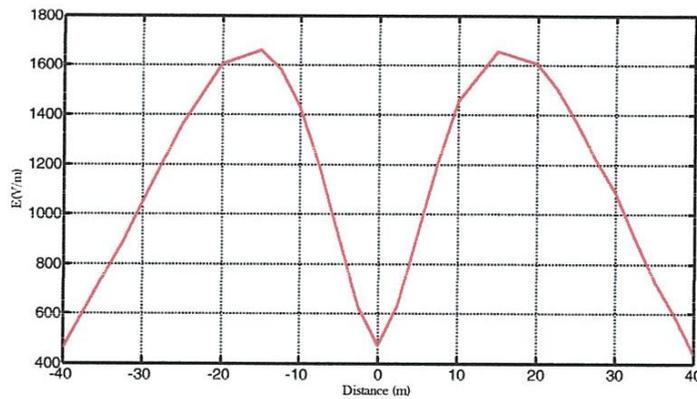


Figure 3.3. Champ électrique au voisinage d'une ligne en nappe au niveau du sol

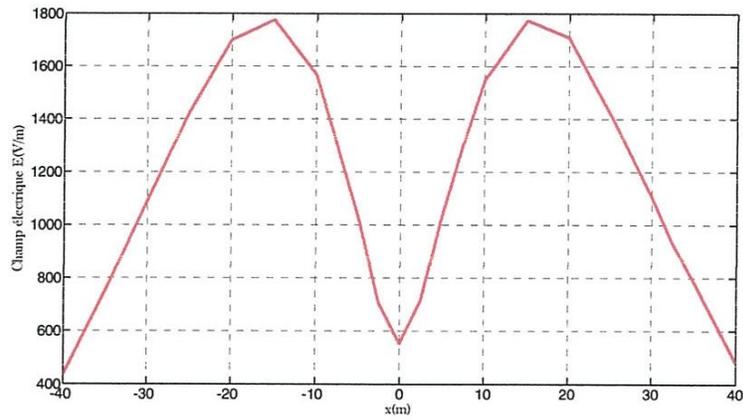


Figure 3.4. Champ électrique au voisinage d'une ligne en triangle au niveau du sol

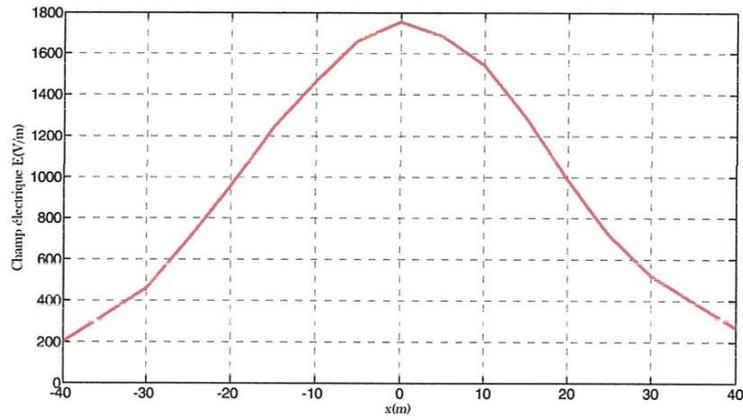


Figure 3.5. Champ électrique au voisinage d'une ligne en drapeau au niveau du sol

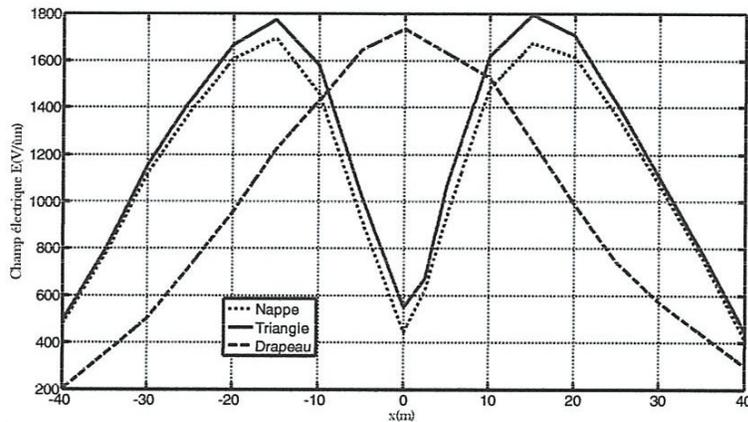


Figure 3.6. Champ électrique à 1m du sol émis par une ligne de transport d'énergie pour les trois configurations

A partir de ces résultats de calculs du champ électrique (Figure 3.6), le champ électrique crée par la ligne de configuration en triangle est plus grand que celle en drapeau et en nappe. *La*

3.1.2. Influence de La tension d'alimentation

Le champ électrique est plus important lorsque la tension entre phase de la ligne est élevée (Figure 3.7).

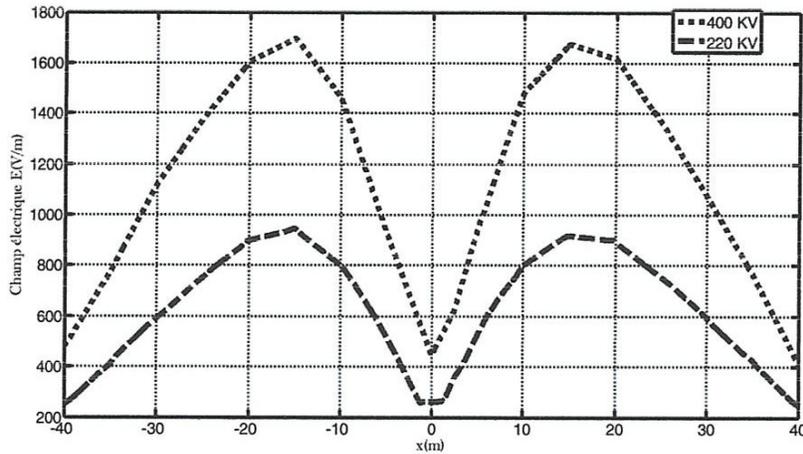


Figure 3.7 Influence de la tension d'alimentation

3.1.3. Influence du câble de garde

a) Ligne en nappe avec un câble de garde

La ligne possédant les caractéristiques suivantes (figure 3.8) :

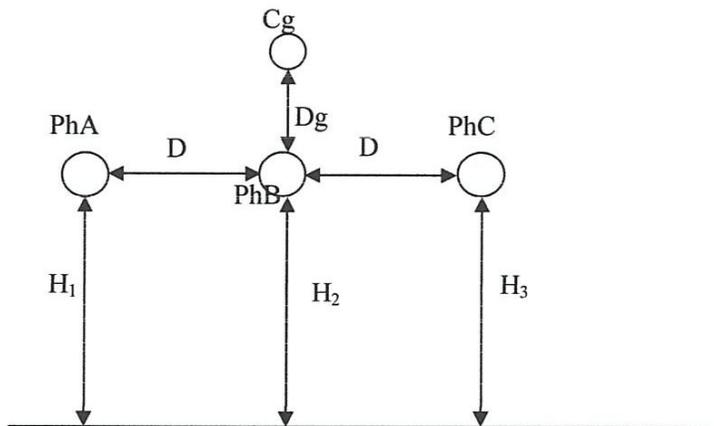


Figure 3.8. Ligne en nappe avec un câble de garde

- Hauteur des phases 25m ;
- Rayon des phases 0.014m ;
- Abscisses des phases (-10m ; 0m ; 10m) ;
- Hauteur de câble de garde 29m ;
- Rayon du câble de garde 0.011m ;
- Abscisse du câble de garde 0m.

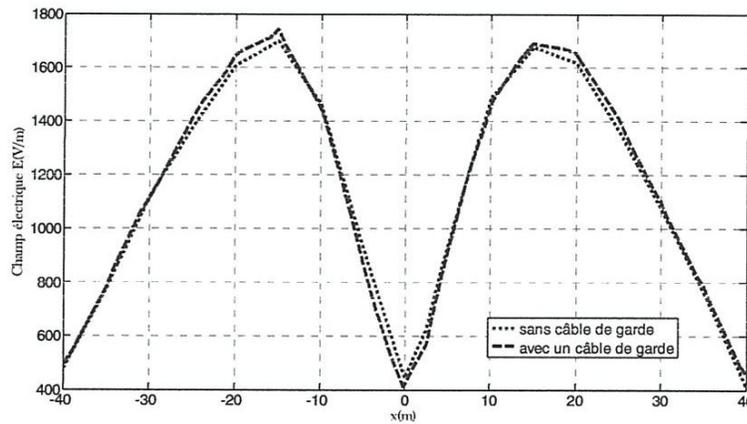


Figure 3.9. Comparaison du champ électrique à 1m du sol (avec un câble de garde et sans câble de garde)

L'existence d'un câble de garde augmente légèrement le champ électrique d'après la figure 3.9.

b) Ligne en nappe avec deux câbles de garde

La ligne possédant les caractéristiques suivantes (figure 3.10) :

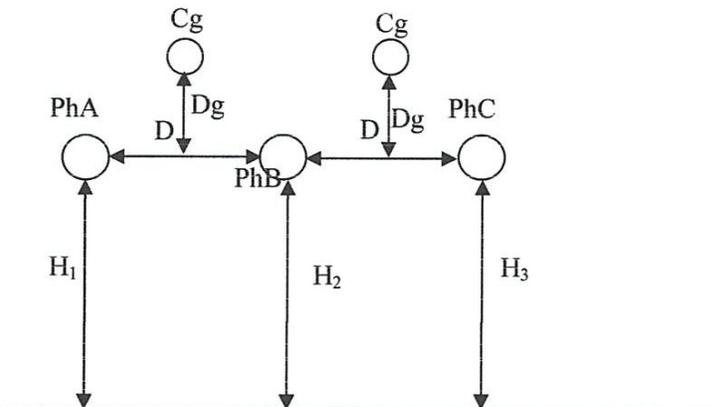


Figure 3.10. Ligne en nappe avec deux câbles de garde

- Hauteur des phases 25m ;
- Rayon des phases 0.014m ;
- Abscisses des phases (-10m ; 0m ; 10m) ;
- Hauteur des câbles de garde 29m ;
- Rayon du câble de garde 0.011m ;
- Abscisse du câble de garde (-5m ; 5m).

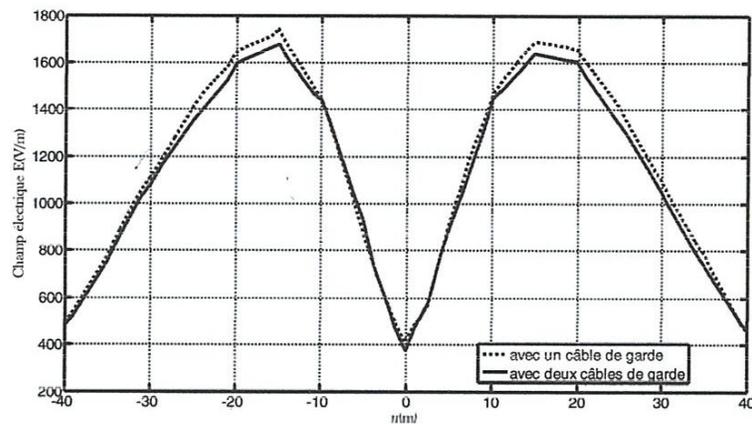


Figure 3.11. Champ électrique à 1m du sol avec deux câbles de garde.

D'après la figure 3.11, on peut remarquer que la disposition des câbles des gardes utilisée dans la figure 3.10 permet de diminuer plus le champ électrique par rapport à la disposition de la figure 3.8.

pas très juste.

3.1.4. Ligne électrique en faisceaux

a) Ligne électrique en nappe à deux conducteurs par phase

Il s'agit d'une ligne 400 kV en nappe [13].

La ligne possédant les caractéristiques suivantes (figure 3.12) :

- Hauteur des phases 20m ;
- Abscisses des sous conducteurs par phases (-10.75 ; -10.25 ; -0.25 ; 0.25 ; 10.25 ; 10.75)
- Rayon des sous conducteurs $r=0.015$ m ;
- Hauteur des câbles de garde (27m)

-Abscisses des câbles de garde (-8m ; 8m)

-Rayon des câbles de garde (0.012m)

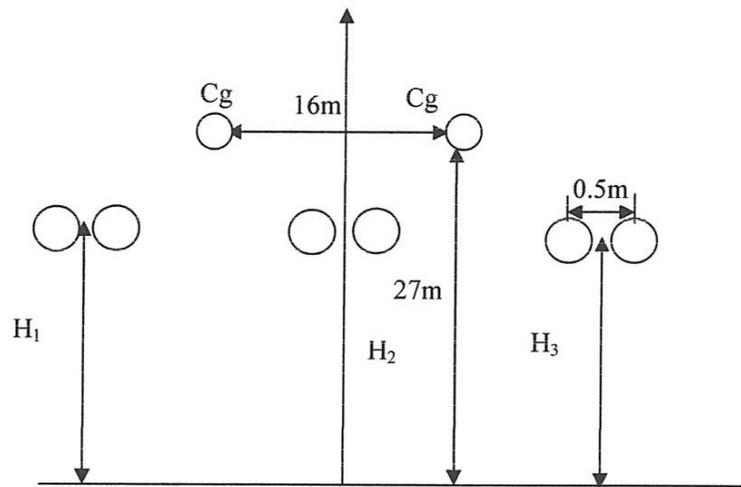


Figure 3.12. Ligne en nappe avec deux câbles de garde et deux conducteurs par phase

Le domaine d'étude maille en éléments finis qui fera l'objet de traitement est celui représenté par la figure 3.13

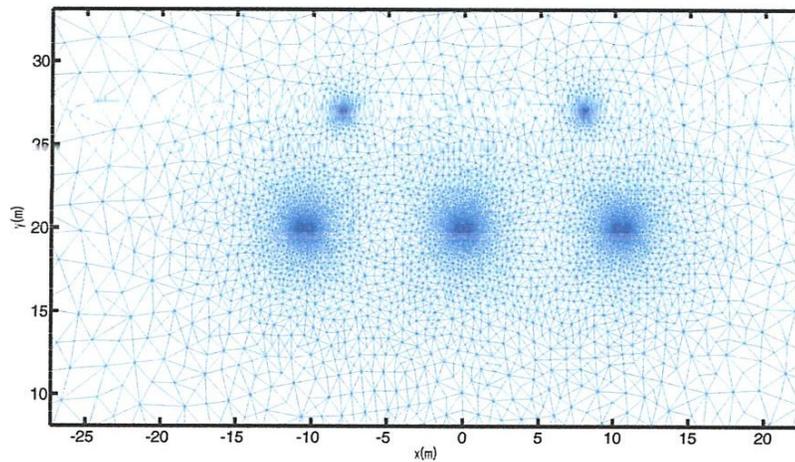


Figure 3.13. Maillage du domaine d'étude (zoom)

Les résultats obtenus concernant l'allure du champ électrique sont illustrées par les figures suivantes.

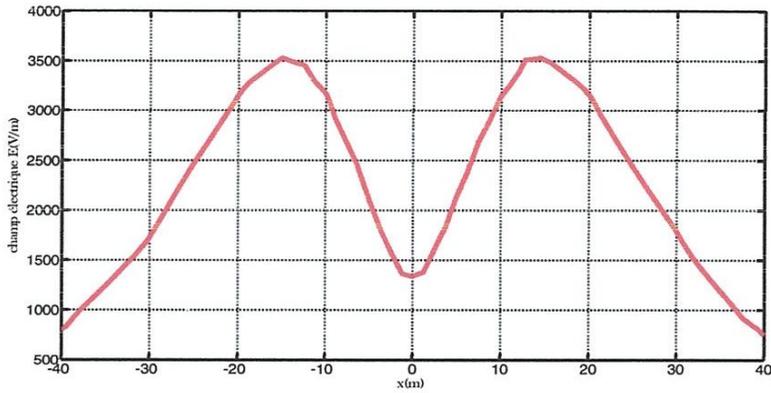


Figure 3.14. Champ électrique à 1m du sol.

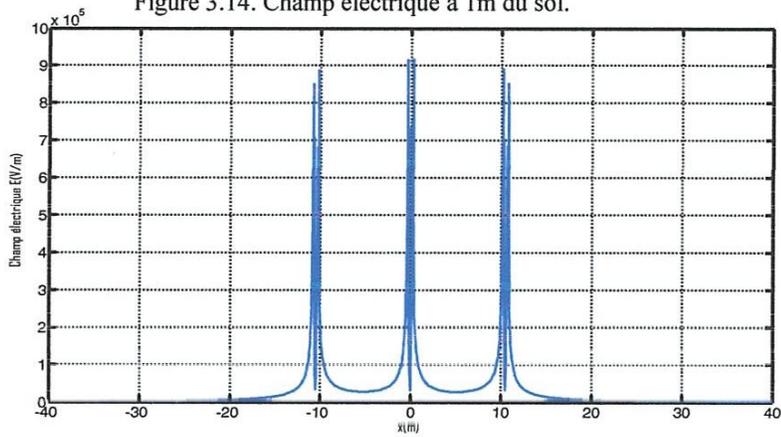


Figure 3.15. Champ électrique à 20 m du sol.

b) Ligne électrique en nappe à trois conducteurs par phase

La ligne possédant les caractéristiques suivantes (figure 3.16) :

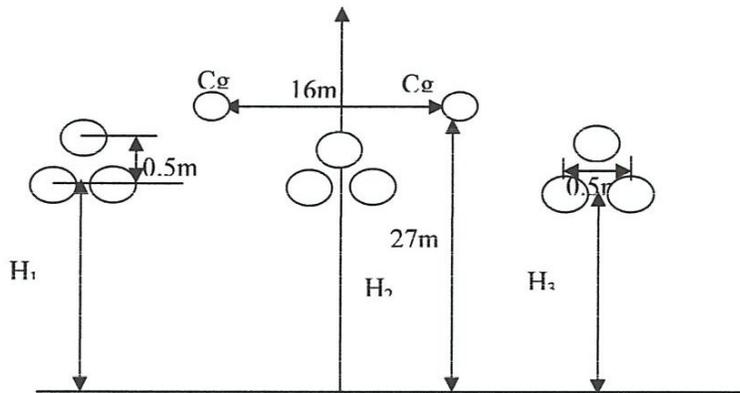


Figure 3.16. Ligne en nappe avec deux câbles de garde et trois conducteurs par phase

- Hauteur des phases (20m, 20.5m, 20m ; 20m, 20.5m, 20m ; 20m, 20.5m, 20m) ;
- Abscisses des sous conducteurs par phases (-10.75 :-10.5 : -10.25 ; -0.25 :0 : 0.25 ;10.25 :10.5 :10.75)
- Rayon des sous conducteurs $r=0.015m$;
- Hauteur des câbles de garde (27m)
- Abscisses des câbles de garde (-8m ; 8m)
- Rayon des câbles de garde (0.012m)

Le domaine d'étude maille en éléments finis est représenté par la figure 3.17 :

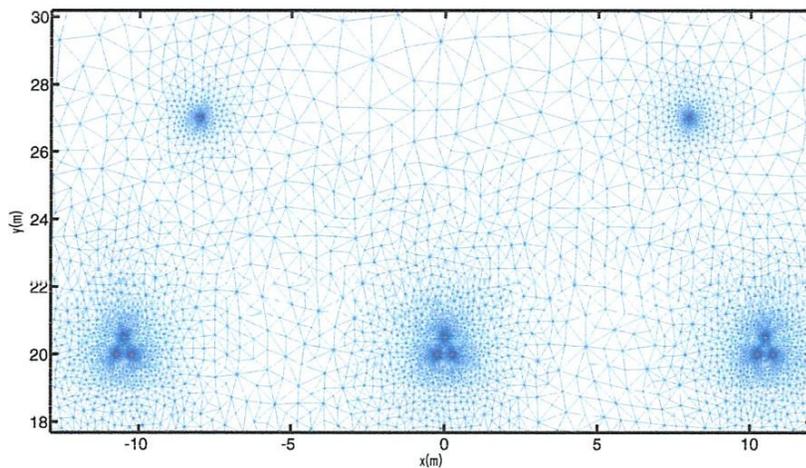


Figure 3.17. Maillage du domaine d'étude (zoom)

Les résultats obtenus concernant l'allure du champ électrique à 1m du sol sont illustrés par la figure 3.18.

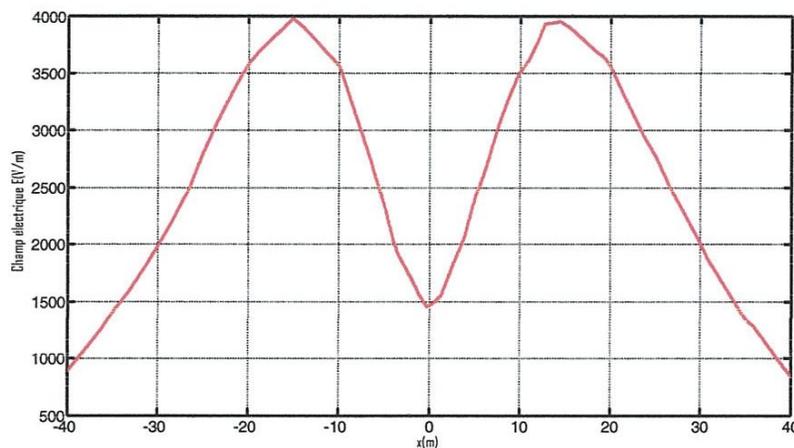


Figure 3.18. Champ électrique d'une ligne en nappe (trois conducteurs par phase) à 1m du sol

On remarque (figure 3.19) que les valeurs du champ électrique pour la ligne électrique à trois conducteurs par phase sont peu élevées par rapport aux valeurs d'une ligne à deux conducteurs par phase.

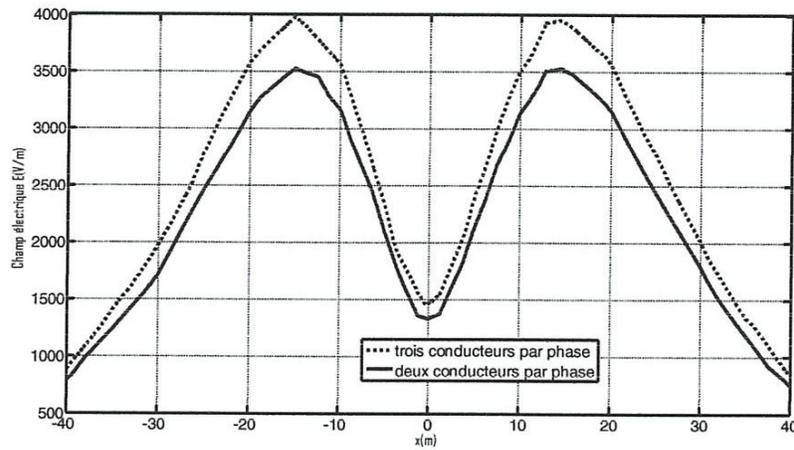


Figure 3.19. Comparaison du champ électrique à 1m du sol (ligne à trois conducteurs de phase ; ligne à deux conducteurs par phase)

3.1.5. Influence de la hauteur de la ligne :

Nous remarqu^{ons}ant bien que le champ électrique est inversement proportionnel à la hauteur de la ligne (figure 3.20)

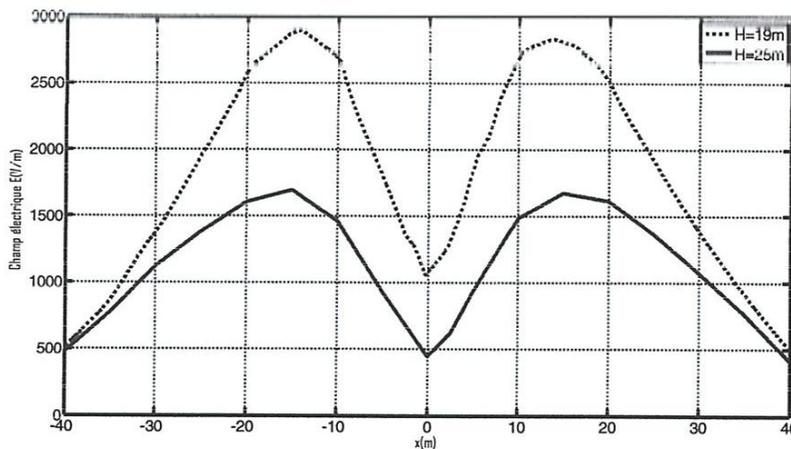


Figure 3.20. Comparaison du champ électrique à 1m du sol

3.1.6. Influence de la distance entre phase ?

L'augmentation de la distance entre phases augmente les valeurs du champ électrique (figure 3.21).

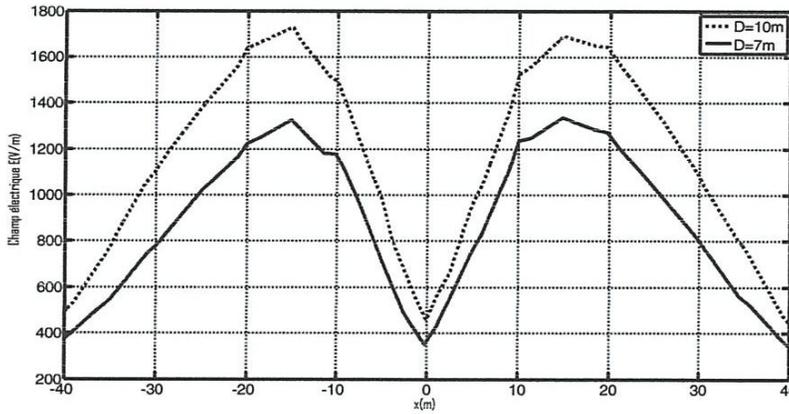


Figure 3.21. Comparaison du champ électrique à 1m du sol

3.2. Réduction du champ électrique émis par une ligne électrique aérienne haute tension

Il existe en général deux moyens pour réduire l'intensité du champ électrique sous les lignes aérienne [14] :

Le premier est un choix convenable de la hauteur des pylônes, déterminant la hauteur des conducteurs de phase au-dessus du sol, associé à la disposition la plus favorable des indices horaires des tensions. Le second est l'utilisation des conducteurs jouant le rôle d'écrans, placés entre les conducteurs des phases et le sol, pour déterminer la minimisation du champ obtenu par la mise en place des conducteurs écrans, on utilise la méthode des éléments finis [14].

3.2.1. Réduction du champ électrique émis par une ligne électrique par la technique des écrans.

Nous avons procédé dans le cadre de cette étude à des calculs effectués sur une ligne en nappe de 400 KV avec écrans (figure 3.22) [14].

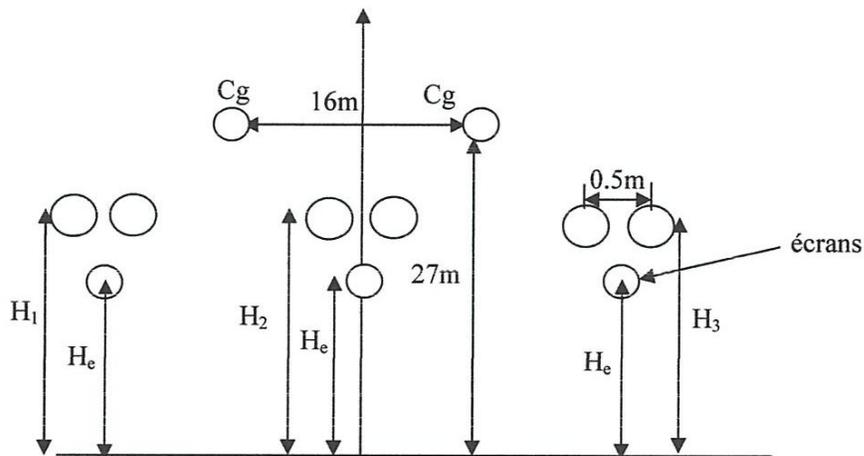


Figure 3.22. Ligne en nappe avec écrans

La ligne possédant les caractéristiques suivantes (figure 3.22) :

- Hauteur des phases 20m ;
- Abscisses des sous conducteurs par phases : (-10.75 ; -10.25 ; -0.25 ; 0.25 ; 10.25 ; 10.75) ;
- Rayon des sous conducteurs $r=0.015\text{m}$;
- Hauteur des câbles de garde (27m)
- Abscisses des câbles de garde (-8m ; 8m)
- Rayon des câbles de garde (0.012m)
- Hauteurs des conducteurs d'écrans :(15 m) ;
- Abscisses des conducteurs des écrans : (-10.5 ; 0 ; 10.5)
- Rayon des conducteurs d'écrans : (0.012m).

On constate (Figure 3.23), que la présence des écrans permet une réduction du champ électrique émis par la ligne.

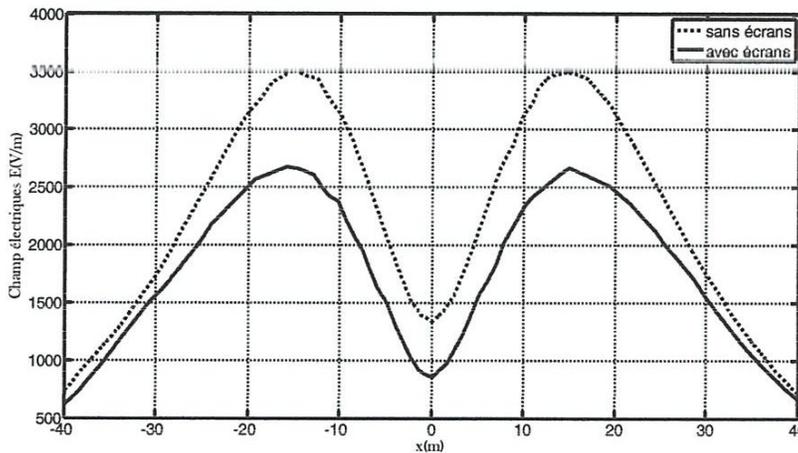


Figure 3.23. Comparaison du champ électrique à 1m du sol (sans et avec écrans)

Conclusion

Le présent chapitre a été consacré à la présentation des différents résultats obtenus par l'application de la méthode des éléments finis au calcul des champs électriques générées par les lignes de transport d'énergie électriques pour différentes configurations.

Dans ce chapitre nous avons aussi remarqué que la présence des écrans permet la réduction du champ électrique émis par les lignes électriques.

Conclusion générale

Le travail entrepris dans le cadre de ce mémoire a été orienté vers l'étude et l'analyse du champ électrique émis par une ligne haute tension.

Dans un premier temps, nous avons réalisé une étude bibliographique sur les lignes et les postes électriques aériennes, ensuite nous avons présenté les mécanismes de couplage électromagnétiques et les effets du champ électrique sur la santé.

Dans un deuxième temps, nous avons développé un code de calcul du champ basé sur la méthode des éléments finis pour calculer le champ électrique en deux dimensions au voisinage d'une ligne aérienne haute tension. En suite nous avons utilisé ce code à la ligne haute tension 400 KV Ed-Draouche skikda et nous avons comparé les valeurs du champ électrique avec celles mesurés. Les résultats obtenus sont très proches.

Enfin, le dernier volet est consacré à l'application de la méthode proposé pour le calcul du champ électrique au voisinage des lignes électriques triphasées aériennes haute tension de différentes configuration avec et sans écrans.

Le code de calcul réalisé permet en effet d'effectuer plusieurs types de calcul afin de prédéterminer les différentes grandeurs liées à l'émission du champ électrique. Il est ainsi possible de connaître avant réalisation d'un nouveau réseau électrique les conséquences dues à l'effet d'émission du champ électrique. De cette façon on peut concevoir une ligne qui donne le minimum d'impact sur l'environnement.

Références Bibliographiques

- [1] M. Brahami, A. Tilmatine, F. Meghnefi, H. Sayah, « Prédétermination des grandeurs liées aux conséquences de l'effet de couronne sur les lignes haute tension », Acta Electrotehnica, Vol, 49, N°1, 2008.
- [2] B. Ali Rachedi, « Compatibilité électromagnétique: Etude de l'environnement électromagnétique généré par les lignes haute tension », Thèse de doctorat, Université 8 Mai 1945 Guelma, 2016.
- [3] J. F. Affolter, F. Conti, F. Gaille, « Calcul et analyse du champ électrique A proximité d'une ligne électrique haute tension », <https://fr.scribd.com/document/24339671/Calculs-Et-Analyse-Du-Champ-Electrique-Ligne-Electrique-Haute-Tension>.
- [4] Michel Auget et Jean-Morf, « Energie Electrique », Traité d'électricité, Vol. XII
- [5] K. Bounia, « Les réseaux électriques : Première partie Éléments de Description et D'analyse de Base », Direction de la publication universitaire de Guelma, 2010.
- [6] H. Battaz, K. Makdem, « Quantification et méthode de minimisation du champ électromagnétique en basse fréquence », Mémoire de fin d'étude (Ingénieur d'état), université de Skikda, 2004.
- [7] J. M. Delbarre, « Poste haute tension et très haute tension : Rôle et structure », Technique de l'ingénieur. Vol. D,4570.1-14570.16
- [8]. F. Chauvet, « Compatibilité électromagnétique : Introduction », Technique de L'ingénieur, Vol. D, 1900-E3750.1-D, 1900. E3750. 20.
- [9] H. Mehdi, « Etude des problèmes de compatibilité électromagnétique liés au passage en 400KV des lignes de transport d'énergie électrique », Mémoire de Magister, Université des sciences et de la technologie d'Oran Mohamed Boudiaf.
- [10] R. Abdessemed. M. S Aggoune. F. Z Kadid, Electrostatique, cours et exercice, Université de Batna.
- [11] A. Brahmia, A. Harid, « Calcul et analyse du champ électromagnétique a proximité d'une ligne électrique haute tension », mémoire de master, Université 8 Mai 1945 Guelma, 2012.
- [12] M. Dafri, « Modélisation expérimentale et théorique des champ électromagnétique rayonnés par les lignes électriques haute tension », Mémoire de master, Université Badji Mokhtar, Annaba, 2016.
- [13] R. Djekidel, « Application de la méthode des charges fictives sur les équipements haute tension pour le calcul du champ électrique », Mémoire de Magister, Université Amar Thelidji Laghouat, 2010.

[14] R. Djekidel, D. Mahi, A. Ameer, A. Ouchar, « Calcul et réduction du champ électrique au voisinage d'une ligne de transport d'énergie électrique haute tension », Acta Electrotechnica, Vol, 55, N°1-2, PP, 26-31, 2014.