

الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية

وزارة التعليم العالي و البحث العلمي

UNIVERSITE BADJI MOKHTAR- ANNABA



جامعة باجي مختار – عنابة

FACULTE : Sciences de l'ingénieur

DEPARTEMENT : Électrotechnique

MEMOIR DE MASTER

DOMAINE : Sciences et Technologies

FILIERE : Electrotechnique

Spécialité : Réseaux électrique

Thème

Modélisation analytique des champs électromagnétiques en vue d'estimation de l'exposition publique et professionnelle basse fréquence

Présentés par :

AHMIL INES

BELDI ASMA

Dirigée par :

Dr : TOURAB Wafa

Jury de soutenance :

- | | | | |
|---------------------|-------------|-----|---------------------|
| - AZZAGE EL BAHI | PRESIDENT | PR | Université d'Annaba |
| - TOURAB Wafa | RAPPORTEUR | MCB | Université d'Annaba |
| - ADJABI MOHAMED | EXAMINATEUR | PR | Université d'Annaba |
| - KESENTINI A/HAMID | EXAMINATEUR | MCB | Université d'Annaba |

Promotion : juin 2019

REMERCIEMENT

Trouver les bons mots pour dire « merci » est une chose difficile. Tout d'abord, nous tenons à exprimer toute notre gratitude au Docteur Tourab Wafa pour sa sympathie, ses compétences et sa grande disponibilité. Sans elle, nous n'aurions pas finalisé ce projet.

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

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

DEDICACE

Je dédie ce travail, à mon papa chéri que j'ai perdu depuis 10ans déjà, à ma mère chérie que Dieu Le Tout Puissant me la Garde nChAllah,

A mon frère unique Mohamed,

A mes sœurs : Sandra, Rajia, Manel.

A ms neveu :Danyal, Mes nieces ; Melis, Aris, Clarys .

A mes beaux-frères : Fethi, Sameer, Nourreddine

A tous mes amis notamment Younes et Hana et Nachewa.....

Asma

DEDICACE

Je dédie ce travail, à mes parents chéris que Dieu Le Tout Puissant me les Garde nChAllah,

A mon mari : Hamza

A ma fille : Anais lumière de mes yeux

A mes frères : Moetaz BiAllah et Hatem

A toute ma famille

A tous mes amis.

Ines

Résumé

Avec l'accroissement de la population et l'industrialisation rapide, la demande de l'énergie électrique a augmenté. Les lignes de transmission THT est une mesure pour faire face à cette problématique.

L'exposition publique et professionnelle aux champs électromagnétiques rayonnés par ces lignes a fait l'objet de plusieurs travaux de recherche afin d'évaluer et de remédier à leurs interactions possibles avec l'être humain et l'environnement.

Ce travail traite la caractérisation de l'environnement électromagnétique au voisinage des lignes électriques haute tension en vue de prédire l'exposition publique et professionnelle aux champs électrique et magnétique émanant de ces lignes. Dans les lieux de travail concernant la production et la transmission de l'énergie électrique à la fréquence industrielle les ouvriers (cas des live –lines – workers) assurant différentes tâches d'entretien et de maintenance des équipements électriques HT , durant plusieurs heures à longueur de journée sont exposés à des intensités de champs électromagnétiques intenses qui excèdent parfois les limites admissibles imposées par l'organisation mondiale de protection contre le rayonnement électromagnétique basse fréquence ICNIRP . Cette over exposition se répercute sur leur santé et peut être à l'origine d'effets néfastes irréversibles.

Dans ce contexte la modélisation analytique et numérique des quantités de charges électrique et magnétique dissipées par les lignes de transmissions s'avère utile et nécessaire pour répondre à cette problématique.

Dans ce travail un code de calcul analytique a été développé dans l'environnement Matlab pour calculer les intensités des champs à des hauteurs de 0m ,1m,1.5m et 1.8m du sol qui modélisent l'exposition humaine aux champs électromagnétiques basse fréquence , par la suite une simulation numérique avec le logiciel Comsol-Multiphysics nous a permis d'étudier le comportement de ces champs pour différentes hauteurs par rapport au sol approchant les phases des lignes souvent fréquentées par les ouvriers d'électricité assurant différentes tâches de maintenance .

Les résultats analytiques sont toujours comparés avec les normes internationales établies et révisées par l'ICNIRP en 2010 qui sont : 5 kV/m pour le champ électriques et 100 micro Teslat pour le champ magnetique.

Les mots clés : hautes tensions; lignes de transmission ; les champs électromagnétiques basse fréquence ; normes internationales.

Sommaire

CHAPITRE 1-Généralité sur les réseaux électriques

1.1- Introduction	1
1.2- Historique et évolution des réseaux électriques	1
1.3- Niveaux de tension	1
1.4- Architecture et topologie des réseaux aériens	2
1.4.1-Réseaux maillés.....	2
1.4.2-Réseau bouclé	2
1.4.3-Réseau radial	2
1.4.4-Réseau arborescent	3
1.5- Types de réseaux électriques	3
1.5.1-Réseaux de transport	3
1.5.2-Réseaux de répartition	3
1.5.3-Réseaux de distribution	3
1.5.3.1- Réseau à moyenne tension (MT)	3
1.5.4-Réseau à basse tension (BT)	3
1.6-Poste de transformation	4
1.7-Postes d'interconnexions	4
1.8-Lignes de transport	5
1.8.1-Ligne aérienne	5
1.8.2-Lignes souterraines	6
1.9-Contraintes liées au fonctionnement des lignes	7
1.9.1-Contraintes électriques	7
1.9.1.1-Tension électrique.....	7
1.9.1.2-Intensité du courant électrique	7
1.9.2-Contraintes liées à la nature	7
1.10- Composants de la ligne	8
1.10.1- Conducteurs	8

Sommaire

1.10.2- Isolateurs	9
1.10.3- Supports	9
1.10.3.1- Triangle	10
1.10.3.2- Nappe	10
1.10.3.3- Drapeau	10
1.10.4- Câble de garde	10
1.10.4.1- Rôle statique	11
1.10.4.2- Rôle dynamique	11
1.11-Schéma équivalent des lignes aériennes	11
1.12-Paramètres électrique de la ligne	12
1.12.1- Résistance	12
a.Effet de la température	12
a. Effet de la température	13
1.12.2- Inductance	13
1.12.3- Capacité	13
1.13- Conclusion	14
CHAPITRE 2 : Notions de compatibilité Electromagnétique	
2.1- Introduction	15
2.2-Définition de la CEM	15
2.3-Acteurs de la CEM	15
2.3.1- Source	15
2.3.1.1-Définition	15
2.3.1.2-Réseaux électriques comme source	16
2.3.2- Couplage	16
2.3.2.1-Définition	16
2.3.2.2-Chemin de couplage dans les réseaux électriques	16
2.3.2.3-Types de milieux	16

Sommaire

2.3.3- Victime	17
2.3.3.1- Définition	17
2.3.3.2- Réseaux électriques comme victime	17
2.4- Modes de couplage	18
2.4.1- Mode commun	18
2.4.2- Mode différentiel	18
2.5-Types de couplages	18
2.5.1- Couplage par conduction (impédance commune)	19
2.5.1.1-Définition	19
2.5.1.2-Liaison directe ou perturbations directement conduites..	19
2.5.1.3-Couplage d'un champ électrique avec un conducteur ..	20
2.5.1.4-Couplage d'un champ magnétique avec une boucle	21
2.5.2- Couplage par rayonnement	21
2.5.2.1-La zone de champs lointains	22
2.5.2.2-La zone de champs proche	22
2.5.3- Couplage inductif	22
2.5.3.1-Equations mise en jeux	22
2.5.3.2-Couplage par diaphonie inductive	22
2.5.4- Couplage capacitif	23
2.5.4.1-Equations mises en jeux	23
2.5.4.2-Couplage par diaphonie capacitive	23
2.5.4.3-Couplage d'un conducteur à un plan de masse	24
2.5.5- Couplage par ionisation.....	24
2.6-Effets de la géométrique	25
2.6.1- Effet pelliculaire (Effet de peau)	25
2.6.2- Effet de proximité	25
2.6.3- Effet de couronne	25

Sommaire

2.6.4- Effet de bord.....	25
2.7-Norme de la CEM	25
2.7.1- Limite admissible du champ électromagnétique.....	26
2.7.1.1-Sur l'être humaine	26
2.7.1.2-Sur le matériel	26
2.8-Conclusion.....	27

CHAPITRE 3: Modélisation theorique des champs électromagnétiques sous une ligne électrique haute tension

3.1- Introduction.....	27
3.2- Modélisation analytique des champs electromagnetiques 50 Hz.....	27
3.2.1- Equations de Maxwell.....	28
3.2.2- Détermination du vecteur potentiel magnétique.....	29
3.3- Calcul analytique du champ électrique rayonné par une ligne HT.....	31
3.3.1- Grandeurs de l'électrostatique.....	31
3.3.1.1- Force électrique.....	31
3.3.1.2- Potentiel électrique.....	32
3.3.2- Méthode des images.....	36
3.3.3- Méthodes de calcul du champ électrique.....	38
3.3.3.1- Formulation mathématique du champ électrique en deux dimensions.....	39
3.4- Calcul analytique du champ magnétique rayonné par une ligne HT...44	
3.4.1- Champ magnétique génère par un fil rectiligne.....	44
3.4.2- Méthode vectorielle pour le calcul du champ magnétique.....	45
3.5- Programmation sous l'environnement Matlab.....	50
3.5.1-Exploitation du programme de calcul.....	53
3.5.2 - Résultats et Discussions.....	54
3.5.2.1- Comportement du champ électrique.....	55

Sommaire

3.5.2.2 – Comportement du champ magnétique.....	55
3.6 – Effets de la géométrie de la ligne sur le champ électromagnétique....	56
3.6.1 - Effets de la géométrie de la ligne sur le champ électrique.....	58
3.7 - Estimation de l'exposition aux champs électromagnétiques 50 Hz....	60
3.7.1 Méthodes numériques en électromagnétisme.....	61
3.7.2. Méthode des éléments finis (FEM).....	62
3.8. Formulation numérique	68
3.9.. Simulation numérique.....	70
3.9 .1. Procédé de calcul du champ électrique à l'aide des éléments fin...	70
3.9.1.2 Cas d`une seule ligne 220 kV.....	71
3.9.1.3. Influences des paramètres électriques et géométriques sur la distribution de champ électromagnétique.....	76
3.9.2.4 Influence de la géométrie de la ligne	78
3.10. Cas de deux ligne 220 kV parallèles	79
3.11- Conclusion	85

Liste des figures

Chapitre 1 : généralité sur les réseaux électrique	
Figure 1.1 : Architecture générale du réseau électrique en Algérie	
Figure 1.2 : Réseau d'interconnexion	
Figure 1.3 :Ligne triphasée	
Figure 1.4 : Type de pylônes	
Figure 1.5 : Schéma équivalent d'un tronçon de ligne aérienne	
Chapitre 2 : Notions de compatibilité Electromagnétique	
Figure 2.1 : Acteurs de la CEM	
Figure 2.2 : Mode commun	
Figure 2.3 : Mode différentiel	
Figure 2.4 : Modes de couplage	
Figure 2.5 : Impédance commune	
Figure 2.6 : Couplage d'un champ électrique avec un conducteur	
Figure 2.7 : Couplage d'un champ magnétique avec la boucle	
Figure 2.8 : Couplage par rayonnement	
Figure 2.9 : Diaphonie inductive	
Figure 2.10 : Couplage par diaphonie capacitive	
Figure 2.11 : Couplage conducteur - plan de masse	
Figure 2.12 :Couplage par ionisation	
Chapitre 3: Modélisation théorique des champs électromagnétiques sous une ligne électrique haute tension	
Figure 3.1 : Disposition du calcul du champ électromagnétique.	
Figure 3.2 : champ électrique créé par un fil infiniment long	
Figure 3.3 : Distribution de Charges équivalentes pour la région en dehors de la surface sphère de rayon a: (a) sphère chargée en volume de rayon a, (b) charge ponctuelle, et (c) charge surfacique de la sphère de rayon $r < a$.	
Figure 3.4 : (a) Charge au-dessus d'un sol parfaitement conducteur, et (b) charges induites sur le sol remplacée par une charge équivalente	
Figure 3.5 : Constitution d'un faisceau de deux conducteurs $n=2$.	
Figure 3.6 : Détermination des coefficients de potentiel d'une ligne.	
Figure 3.7 : Détermination le champ électrique pour une phase	
Figure 3.8 : Champ magnétique rayonné par un fil de longueur infinie	

Figure 3.9 : Champ magnétique émis par les trois phases d'une ligne électrique en un point M	
Figure3.10 : Algorithme pour le calcul du champ électromagnétique rayonné par une ligne HT	
Figure 3.11 : Dimension de la ligne 400 kV (Drouech – Ramdan Djamel)	
Figure 3.12 : Profils du Champs électrique à 1m du sol ; Champ horizontal vertical et total	
Figure 3.13 : Champ électrique généré par une ligne 400 kV à 1m du sol.	
Figure 3.14 : Profils du Champs magnétiques à 1m du sol ; Champ horizontal et vertical	
Figure 3.15 : Profile du champ magnétique pour la ligne étudié 400 kV à 1m du sol.	
Figure 3.16 : Configurations de lignes de transmission; (a) en nappe horizontale, (b) en nappe vertical, (d) en delta et (c) en delta Inversé.	
Figure 3.17 : Champ électrique pour les quatre configurations	
Figure 3.18 : Profils du champ magnétique pour les configurations de lignes : en nappe, vertical, en delta et en delta inversé	
Figure 3.19 : niveaux sensibles du corps humain	
Figure 3.20 : Profils du Champs électrique généré par une ligne 400 kV aux quatre niveaux les plus sensibles du corps humain	
Figure3.11 Description de la méthode- résolution d'un système physique par EF.	
Figur3.11 Différents igcas du maillage.	
Figure3.12 logiciel d'éléments finis.	
Figure3.13 Présentation du logiciel: a) Géométrie du modèle, b) Application du Maillage, c) simulation en 2D, d) simulation en 3D, e) Application Zoom, t) Résultat sous forme de courbe.	
Figure 3.22 : Zoom du domaine d'étude	
Figure 3.23 : Maillage du domaine d'études	
Figure3.23 Profils de champ électrique à 0m, 1.5m et 1.8m au-dessus de sol .	
Figure3.24 Profils de champ électrique entre 2 à 10m au-dessus de sol	
Figure3.25 Profils de champ électrique entre 11 à 19m au-dessus de sol	
Figure3.26 Profils de champ électrique entre 21 à 30m au-dessus de sol	
Figure3.27 Profils de champ magnétique à 0m, 1.5m et 1.8m au-dessus de sol	

Figure3.28 Profils de champ magnétique de 2 à 10m au-dessus de sol	
Figure3.29 Profils de champ magnétique de 11 à 19m au-dessus de sol	
Figure3.30 Profils de champ magnétique de 21 à 30m au-dessus de sol	
Figure 3.31 Influence de la tension sur la distribution du champ électrique.	
Figure3.32 Influence des courants dans les phases sur distribution du champ magnétique.	
Figure3.33 Influence de la disposition de phases sur la distribution du champ électrique.	
Figure 3. 34 Modèle de deux lignes haute tension 220kV parallèle	
Figure3.35 Profils du champ électrique au niveau du sol	
Figure3.36 Profils du champ électrique à 1.5m et 1.8m au-dessus du sol	
Figure3.37 Profils du champ électrique de 2 à 10m au-dessus du sol	
Figure3.38 Profils du champ électrique de 11 à 19m au-dessus du sol	
Figure3.39 Profil de champ magnétique au niveau du sol	
Figure3.40 Profils de champ magnétique à 1.5m et 1.8m au-dessus du sol	
Figure3.41 Profils de champ magnétique de 2 à 10m au-dessus du sol	
Figure3.42 Profils de champ magnétique de 11 à 19m au-dessus du sol	

Liste des tableaux

Chapitre1	page
Tableau 1.1 : Niveaux de tension	12

Introduction générale

Les champs électromagnétiques sont de plus en plus présents dans notre environnement au fur et à mesure que se développent les réseaux électriques et de télécommunications (radio, télévision, téléphonie mobile) et l'utilisation d'appareils tels que les fours à micro-ondes.

La présence de champs électromagnétiques, non perceptibles, suscite quelques craintes pour la santé publique, notamment pour les femmes enceintes et les jeunes enfants, et cela est renforcé en milieu professionnel, car le travailleur peut être en plus exposé à des champs électromagnétiques émis par d'autres sources artificielles d'une intensité bien plus forte et/ou beaucoup plus longtemps.

Un champ électrique, mesuré en volt/mètre, est provoqué par une accumulation de particules électriquement chargées. Le passage d'un courant électrique, dans tout conducteur sous tension, crée un champ électromagnétique, et produit un rayonnement électromagnétique qui se propage dans l'espace à la vitesse de la lumière.

Les rayonnements électromagnétiques sont des rayonnements non ionisants, au même titre que les rayons de la lumière visible, ultraviolette ou infrarouge, c'est-à-dire que, contrairement aux rayons X ionisants, ils ne sont pas assez énergétiques pour arracher des électrons aux atomes qu'ils atteignent.

Les types de rayonnements se distinguent par leur fréquence exprimée en Hertz (Hz) (ou à partir de l'inverse, ce qui donne la longueur d'onde : plus la fréquence est basse, plus la longueur d'onde est élevée), et leur intensité.

Le spectre des rayonnements non ionisants est très large, puisqu'il englobe des fréquences extrêmement basses (ELF) avec des longueurs d'onde de plusieurs kilomètres, jusqu'au rayons ultraviolets de longueur d'ondes d'une centaine de nanomètres (millionième de millimètre) !

Les champs électromagnétiques de basse fréquence, provoquent à court terme des courants induits dans le corps humain, avec une stimulation électrique du système nerveux sans danger apparent et prouvé pour l'activité cérébrale ou cardiaque, hormis pour des situations exceptionnelles de très fortes intensités. Toutefois des personnes hypersensibles souffrent de céphalées, nausées, vertiges, troubles de la vision, de l'audition et du sommeil, palpitations... symptômes non spécifiques qui évoquent plutôt une réaction d'anxiété vis-à-vis d'un phénomène diffus, non maîtrisable et non perceptible de manière directe.

Pour prévenir les effets des champs électromagnétiques, des valeurs limites d'exposition ont été élaborées pour le public, basées sur une recommandation de l'Union européenne et sur les lignes directrices de la Commission internationale de protection contre les radiations non ionisantes (ICNIRP) résumées es dans le tableau suivant :

Limites ICNIRP pour 50 Hz	Champ électrique (V/m)	Champ magnétique (μT)
Public général	5000	100
Exposition professionnelle	10000	1000

En haute tension, le transport d'énergie électrique s'effectue par la propagation d'onde électromagnétique le long de la ligne de transmission électrique. Cette propagation s'accompagne par le rayonnement d'un champ électrique et d'un champ magnétique sur une longueur d'onde de 6000 km. L'évaluation de l'interférence de ces champs avec l'environnement nécessite la maîtrise des outils de leurs calculs analytiques et numériques qui sont souvent validés par des investigations expérimentales .

Ce document comporte trois chapitres :

- Le premier chapitre du manuscrit évoque l'état de l'art sur les réseaux électriques HT de façon générale. Il a permis de nous éclairer sur les différents types de réseaux électriques, leurs architectures et leurs conceptions.

- Le second chapitre nous a permis de bien situer le contexte de l'étude, en commençant par exposé la problématique des interférences des champs électromagnétiques basse fréquence avec l'environnement. Nous avons identifié les modes de transferts énergétiques entre la source et la victime qui sont à la base de tous les mécanismes d'interaction des CEM avec les environnements d'interférences.

Le troisième chapitre est consacré à la modélisation théorique des champs électriques et magnétiques rayonnés par les lignes triphasés haute tension. Dans lequel nous présentons et validons un code de calcul analytique développé dans l'environnement Matlab, qui nous a servi d'outil pertinent pour la caractérisation des quantités de charges capacitatives et inductives émises par des circuits de lignes électriques simples et doubles 220 kV et 400 kV.

A la fin nous achevons ce manuscrit par une conclusion générale qui résume les étapes suivies et les résultats obtenues dans ce travail dans le but de caractériser les lignes électriques HT comme sources de perturbations électromagnétiques dans l'environnement.

1.1- Introduction

Un réseau électrique est un ensemble d'outils destiné à produire, à transporter et à distribuer de l'énergie électrique. Il est constitué des générateurs, des transformateurs, des lignes de transport, de distribution et de répartition.

1.2- Historique et évolution des réseaux électriques

Les premières centrales électriques ont été construites par des industries pour s'autoalimenter en courant continu. L'usage public de l'électricité n'a réellement débuté qu'après l'exposition universelle de 1881. Les premières concessions municipales de production et de distribution d'électricité sont alors faites à des entreprises privées ou à des régies municipales pour l'éclairage public et l'alimentation de particuliers. Le courant alternatif s'est généralisé avec l'évolution technologique qui a permis d'adapter les tensions à des puissances importantes grâce aux transformateurs.

Le réseau électrique est hiérarchisé par niveau de tension. Celui-ci est fractionné en trois principales subdivisions à savoir le réseau de transport, de répartition et de distribution. Une notion de frontière peut être définie entre les niveaux de tension du réseau électrique. Ces frontières sont assurées par les postes sources et les transformateurs. Le réseau de transport achemine, sur ces grandes distances, l'énergie des centrales de production jusqu'aux abords des grandes centres de consommation. [3]

1.3- Niveaux de tension

La nouvelle norme en vigueur en Algérie (SONELGAZ) définit les niveaux de tension alternative dans le tableau (1.1)

Tableau 1.1 : Niveaux de tension

Domaines de Tension		Valeur de la tension composée nominale (Un en Volts)	
		Tension Alternative	Tension Continue
Très Basse Tension (TBT)		$U_n \leq 50$	$U_n \leq 120$
Basse Tension (BT)	BTB	$50 < U_n \leq 500$	$120 < U_n \leq 750$
	BTB	$500 < U_n \leq 1000$	$750 < U_n \leq 1500$
Haute Tension (HT)	HTA ou MT	$1000 < U_n \leq 50\ 000$	$1500 < U_n \leq 75\ 000$
	HTB	$U_n > 50\ 000$	$U_n > 75\ 000$

1.4- Architecture et topologie des réseaux aériens

Dans les réseaux nous trouvons plusieurs types de configuration topologiques ils ont dictée par : le niveau fiabilité recherché, la flexibilité et la maintenance, ainsi que les coûts d'investissement et d'exploitation. Les différentes topologies qu'on trouve usuellement sont illustrées ci-dessous [3]

1.4.1-Réseaux maillés

Tous les centres de production sont liés entre eux par des lignes THT au niveau des postes d'interconnexion ; ce qui forme un maillage. Cette structure permet une meilleure fiabilité mais nécessite une surveillance à l'échelle nationale voir continentale.

1.4.2-Réseau bouclé

Cette topologie est surtout utilisée dans les réseaux de répartition et distribution MT. Les postes de répartition HT ou MT alimentés à partir du réseau THT sont reliés entre eux pour former des boucles qui permettent d'assurer la disponibilité en cas défaillance. Cependant, il faut noter que les réseaux MT ne sont pas forcément bouclés.

1.4.3-Réseau radial

C'est une topologie simple qu'on trouve usuellement dans la distribution MT et BT. Elle est composée d'une ligne alimentée au départ par un poste source HT ou MT. En moyenne tension cette structure est souvent alimentée des deux côtés afin d'assurer la disponibilité.

1.4.4-Réseau arborescent

Cette structure est très utilisée en milieu rural et quelque fois en milieu urbain. Elle est constituée d'un poste de répartition qui alimente plusieurs postes de distribution (BT) grâce à des piquages à différents niveaux des lignes alimentant les postes MT/BT.

1.5- Types de réseaux électriques

Suivant le trajet de l'énergie depuis sa production jusqu'à son utilisation, il y a successivement différents types de réseaux dont les missions sont parfaitement définies [2] :

1.5.1-Réseaux de transport

Les réseaux de transport ont pour mission de conduire l'énergie et de permettre de réaliser à chaque instant l'égalité de la production et de la consommation sur l'ensemble du territoire en respectant des contraintes sur le maintien de la tension.

1.5.2-Réseaux de répartition

Ces réseaux ont pour fonction de faire la liaison entre le réseau de transport et les réseaux de distribution. Ils doivent assurer l'alimentation du territoire qui est généralement des zones importantes de consommation.

1.5.3-Réseaux de distribution

Les réseaux de distribution ont pour vocation de couvrir l'ensemble du territoire afin de desservir la totalité de clients qui demandent à être raccordés au réseau. Ils sont généralement de structure radiale ou arborescente.

1.5.3.1- Réseau à moyenne tension (MT)

Leur tension est comprise entre 2.4KV et 69KV dont les longueurs allant de 80km à 230km. Ce réseau relie les clients aux postes de transformation principaux [3].

1.5.4-Réseau à basse tension (BT)

Il est constitué des lignes aériennes dans les régions rurales, et des câbles souterrains dans les lieux urbains et les centres industriels. Leur tension est comprise entre 120V et 600V dont les longueurs sont inférieures à 80 km. Nous distinguons dans les réseaux de distribution deux entités principales que sont les postes et les liaisons [3]. La figure(I.1) montre l'architecture de réseau électrique en Algérie [9].

Chapitre 1 : généralité sur les réseaux électrique

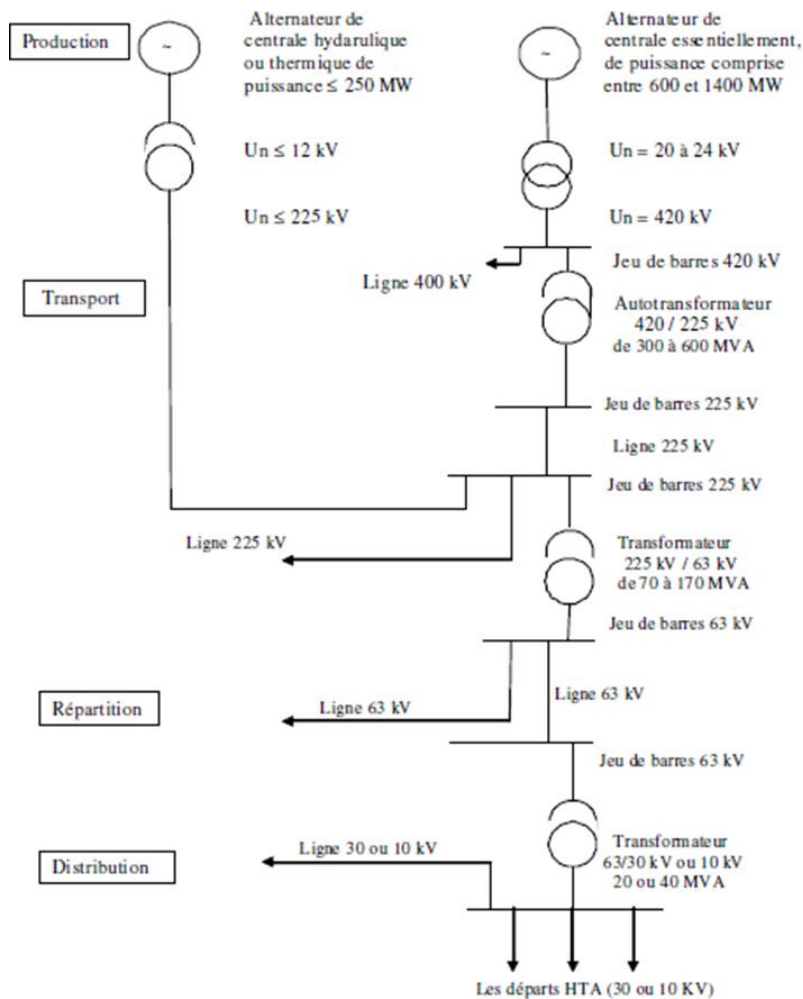


Figure 1.1 : Architecture générale du réseau électrique en Algérie

1.6-Poste de transformation

C'est l'ensemble de deux postes de coupure à des tensions différentes reliés par des transformateurs qu'ils ont pour rôle d'augmenter ou abaisser la tension, et réguler celle-ci au moyen de compensateur statiques, de réactance capacitatives ou inductives et de transformateurs à prise variables[3].

1.7-Postes d'interconnexions

Ils sont des connexions essentiellement réalisées par des jeux de barre qui relie les nœuds du réseau afin d'augmenter la stabilité de l'ensemble et de permettre des échanges d'énergie [3].

Chapitre 1 : généralité sur les réseaux électrique

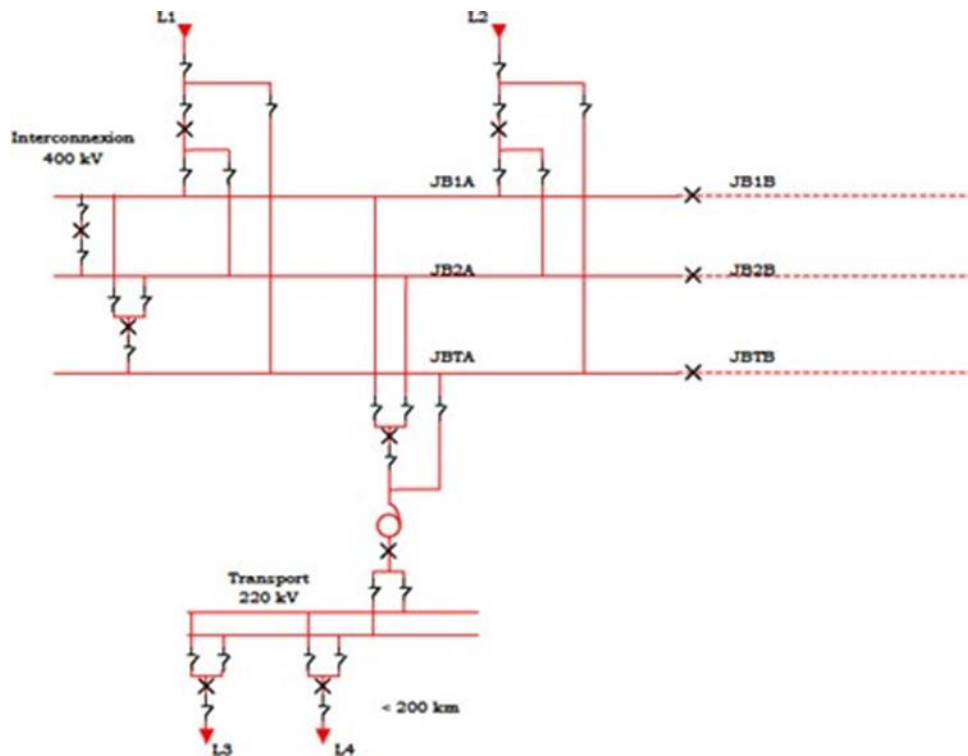


Figure 1.2 : Réseau d'interconnexion

1.8-Lignes de transport

1.8.1-Ligne aérienne

Elle est composée de conducteur, d'isolateurs, de pylônes et d'un câble de garde pour les lignes de haute tension. Son rôle principale est de transporter l'énergie électrique de la source de production jusqu'à la zone de consommation. Elle possède les caractéristiques suivantes [2] :

- La tension reste constante sur toute la longueur de la ligne et pour toutes les charges comprises entre zéro est la charge nominale.

- Un bon rendement.

- Les pertes joules ne doivent pas surchauffer les conducteurs.

Parmi les avantages des lignes aériennes sont:

- Sont moins coûteuses que les lignes souterraines du point de vue des frais d'installation et de réparation.

- Elles permettent une surveillance aisée de leur état et un repérage facile des accidents et des défauts.

- Elles peuvent être réparées très rapidement en cas d'accident ou de défaut.

- Elles peuvent être surchargées en intensité de courant sans trop de danger.

Parmi les inconvénients, on distingue:

- L'exposition aux surtensions d'origine atmosphérique.
- Leur installation donne lieu à des oppositions des propriétaires des terrains surplombés.
- Elles soulèvent des problèmes d'esthétique et de respect des sites.
- Elles sont susceptibles d'induire des forces électromotrices perturbatrices ou dangereuses dans les circuits de télécommunication.
- Elles sont susceptibles de produire des perturbations radioélectriques gênant les réceptions de radiodiffusion et de télévision.
- La rupture de leurs conducteurs est susceptible de présenter des dangers pour les personnes, les animaux.
- Selon certains, les champs électriques et magnétiques peuvent exercer une influence néfaste sur la santé [2].

1.8.2-Lignes souterraines

Les câbles souterrains ne produisent pas de champ électrique. En effet, celui-ci est confiné à l'intérieur de la gaine métallique qui entoure les conducteurs. [2]

Ces avantages :

- Elles constituent la seule solution possible dans les agglomérations plus serrées.
- Elles sont soustraites aux surtensions d'origine atmosphérique.
- Elles ne causent pas d'interférences avec les circuits de télécommunications.
- ne produisent aucune gêne pour les réceptions de radiodiffusion et télévision.
- Elles sont les seules solutions possibles pour traverser de larges fleuves ou des bras de mer lorsque la distance à franchir dépasse 3 km.

Parmi les inconvénients, en note:

- Elles sont d'un coût beaucoup plus élevé que celui des lignes aériennes. La différence est d'autant plus grande que la tension est plus élevée.
- Le repérage des défauts est délicat et lent.

- Les réparations sont coûteuses et parfois malaisées.
- Leurs armures et gaines doivent être protégées contre les effets de corrosion dus aux courants.
- Elles risquent d'être détériorées en cas de mouvements de terrains (particulièrement à craindre dans les régions minières).
- Leur isolement est susceptible d'être détérioré par élévation de température des conducteurs en cas de surcharge.
- Le dimensionnement des lignes aériennes est soumis à des contraintes liées à ses conditions de fonctionnement et à des contraintes externes dues à son environnement climatique.

1.9-Contraintes liées au fonctionnement des lignes

1.9.1-Contraintes électriques

1.9.1.1- Tension électrique

Les conducteurs aériens n'étant isolés que par la couche d'air qui les entoure. Le dimensionnement des lignes doit tenir compte de la tension à laquelle sont portés les conducteurs. Le maintien de l'isolation est assuré par des chaînes d'isolateurs dont le rôle est de relier le conducteur au pylône tout en maintenant une distance d'isolement suffisante pour éviter les phénomènes de claquage diélectrique (les champs électrique de rupture diélectrique dans l'air étant de l'ordre de 3 KV/m).

1.9.1.2-Intensité du courant électrique

Les conducteurs sont le siège de pertes joule qui engendrent un échauffement provoquant une dilatation des conducteurs et un allongement de la flèche qui sépare les conducteurs du sol. Ce phénomène a pour conséquence la détérioration des câbles et l'interruption du service.

1.9.2-Contraintes liées à la nature

Les contraintes liées à l'environnement climatique sont de nature mécanique dues principalement aux effets de:

•Vent :

Le vent a tendance de faire balancer les conducteurs créant ainsi un risque de court-circuit mais aussi de rupture. Il a un effet important sur les pylônes qui doivent être conçus pour résister aux augmentations les plus violents. [3]

•Givre :

Ce phénomène hivernal peut être important sur les sites montagneux ou il crée par accumulation des gaines de glace autour des conducteurs ce qui les alourdit et les fragilise lorsque la température est très basse. Il est donc nécessaire de prévoir une solidité et une résistance à la surcharge suffisantes [3].

•Neige :

Certaines formes de neige ont une capacité d'adhérence très forte qui crée des manchons autour des conducteurs et donc un poids supplémentaire qu'il convient de prévoir en termes de solidité et une résistance à la surcharge suffisantes [3].

1.10- Composants de la ligne

1.10.1- Conducteurs

Les conducteurs sont des câbles constitués de brins toronnés de cuivre ou d'aluminium ou d'alliages spéciaux d'aluminium à haute résistance mécanique. Leur surface extérieure est quasi cylindrique, striée de rainures hélicoïdales. Ils présentent des avantages de réduction du diamètre à section utile égale et de réduction du coefficient de traînée.

L'aluminium est souvent associé à l'acier sous forme de câbles aluminium-acier. On emploie également des câbles constitués par des brins ayant chacun une âme d'acier recouverte d'une couche conductrice de cuivre ou d'aluminium.

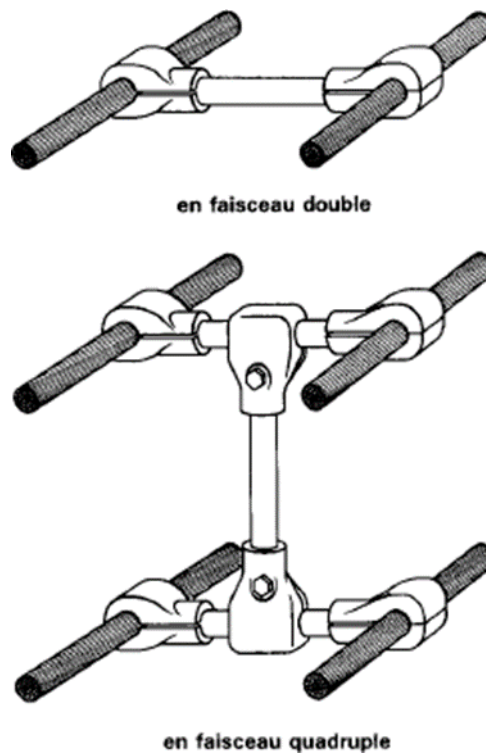


Figure 1.3:Ligne triphasée

Le conducteur d'une phase peut être réalisé en faisceau double, triple ou quadruple de conducteurs maintenus à distance par des entretoises [4] ; comme indiqué sur la figure (I.2).

1.10.2- Isolateurs

Ils sont généralement en porcelaine ou en verre. Ils se présentent sous deux formes d'isolateurs rigides utilisés jusqu'aux tensions de 15 kV et les isolateurs de suspension composés généralement de plusieurs éléments accrochés les uns aux autres, (chaînes d'isolateurs). Ces derniers sont employés pour les tensions plus élevées. [4]

1.10.3- Supports

Les supports sont souvent appelés pylône à cause de leur forme. Il caractérise l'armement qui est la forme géométrique de répartition des conducteurs dans l'espace. Ils comprennent des conducteurs et des câbles de garde destinés à protéger les conducteurs des coups de foudre. Il y a trois grandes familles d'armement: triangle, nappe et drapeau. [3]

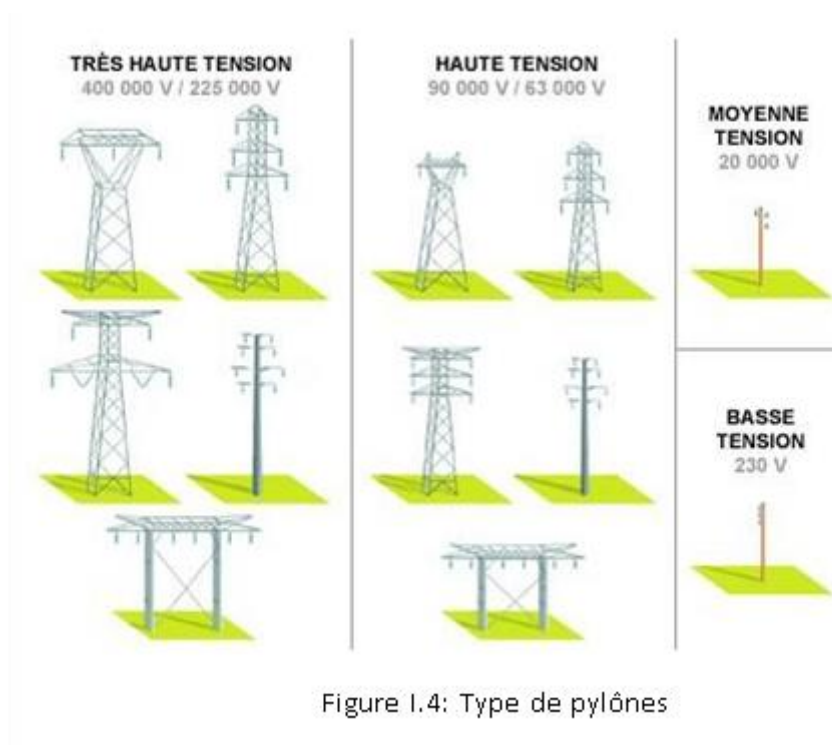


Figure 1.4: Type de pylônes

Figure 1.4: Type de pylônes

1.10.3.1- Triangle

Les trois conducteurs sont repartis aux sommets d'un triangle équilatéral. Il y a une répartition régulière des conducteurs de phase et de leurs caractéristiques électriques (inductances et capacités) mais une dissymétrie par rapport au sol.

1.10.3.2- Nappe

Les conducteurs sont tous dans un même plan horizontal. Les caractéristiques par rapport au sol sont identiques mais la répartition entre phases est dissymétrique.

1.10.3.3- Drapeau

Dans cette répartition les conducteurs sont dans un même plan vertical. Il n'y plus aucune symétrie dans le calcul des caractéristiques électriques.

1.10.4- Câble de garde

Le câble de garde est constitué d'un ou plusieurs conducteurs d'un diamètre inférieur ou équivalent au conducteur de phase d'une ligne. Il est situé à un niveau supérieur et parallèlement aux conducteurs de phase et relié à la terre par l'intermédiaire à travers le pylône. Il est caractérisé par ses rôles statiques et dynamiques.

1.10.4.1- Rôle statique

Le câble de garde contribue à la réduction du potentiel statique des conducteurs de phases d'une ligne située sous un nuage orageux. [5]

1.10.4.2- Rôle dynamique

Les lignes sont alimentées ou mises à la terre pour des raisons de sécurité. Les rôles dynamiques du câble de garde sont :

- Amortissement des ondes de surtensions de foudre par abaissement de l'impédance caractéristique des conducteurs de phase.

- Blindage contre les surtensions induites par le transport d'énergie électrique en haute tension sur les lignes de télécommunication. [5]

1.11-Schéma équivalent des lignes aériennes

Théoriquement chaque phase d'une ligne aérienne peut être représentée par un circuit équivalent comprenant un ensemble de résistances, d'inductances, de capacités et de conductance. Le schéma équivalent est donné par la figure ci-dessous

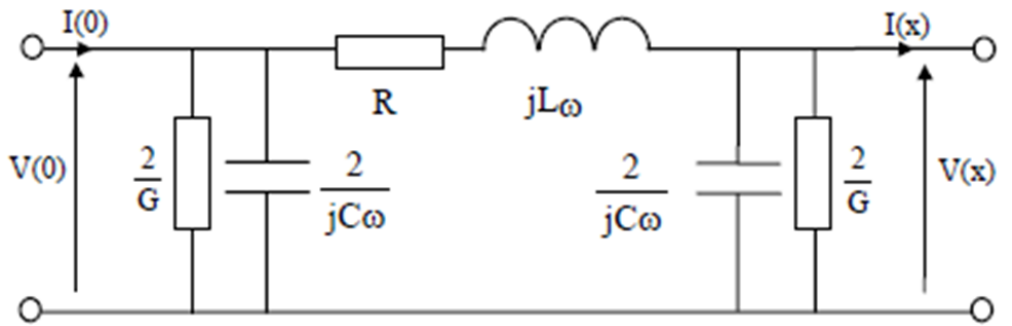


Figure 1.5 : Schéma équivalent d'un tronçon de ligne aérienne

Les paramètres longitudinaux sont dus au passage du courant électrique et caractérisé par une impédance :

$$Z = R + jX \dots\dots\dots(1.1)$$

Les paramètres transversaux sont dus aux effets engendrés par le champ électrique et caractérisé par une admittance :

Chapitre 1 : généralité sur les réseaux électrique

Les paramètres transversaux sont dus aux effets engendrés par le champ électrique et caractérisé par une admittance :

$$Y = g + jb \dots\dots\dots(1.2)$$

$Z[\Omega /m]$: Impédance de la ligne

$Y[\Omega^{-1} /m]$: Admittance de la ligne

$R[\Omega /m]$: Résistance de la ligne.

$X[\Omega /m]$: Réactance de la ligne

$G[\Omega^{-1} /m]$: Conductance de la ligne.

$b[\Omega^{-1} /m]$: Susceptance de la ligne.

$L[Km]$: Longueur de la ligne.

1.12-Paramètres électrique de la ligne

1.12.1- Résistance

La résistance des conducteurs dépendent de la température et de la fréquence.

a.Effet de la température

Si on note par $\rho(T)$ la résistivité électrique dépendant de la température :

$$\rho(T) = \rho_0 \dots\dots\dots(1.3)$$

ρ_0 : résistivité à 20°C

La résistance linéique de la ligne est donc :

$$R(T) = \frac{\rho(T)}{S} + \frac{\rho_0(1-\alpha\Delta T)}{S} \dots\dots\dots(1.4)$$

a. Effet de la température

Si on note par δ l'épaisseur de peau électromagnétique, telle que :

$$\delta = \sqrt{\frac{\rho}{\pi \mu f}} \dots\dots\dots (1.5)$$

Si le diamètre du conducteur est très grand devant l'épaisseur de peau, la résistance linéique est :

$$R = \frac{\rho}{\pi D \delta} \dots\dots\dots (1.6)$$

- ρ [$\Omega.m$]: Résistivité du métal
- S [m^2] : Section du conducteur
- D [m] : Diamètre du conducteur
- f [HZ]: La fréquence du réseau

1.12.2- Inductance

Un conducteur parcouru par courant variable « I » génère un flux magnétique « φ ». La variation de ce dernier est à l'origine de l'apparition de tension induite.

Pour tenir compte de ces effets, on définit l'inductance linéique d'un conducteur Seul comme suit :

$$L = \frac{\varphi}{I} = \frac{\mu_0}{2\pi} \left(\ln \frac{2h}{D} + \frac{1}{4n} \right) \dots\dots\dots (1.7)$$

- h (m) : hauteur de la ligne par rapport à la terre.
- D (mm) : diamètre du conducteur.
- n : Nombre de conducteurs du faisceau.

1.12.3- Capacité

Le champ électrique établit entre la ligne et la terre est à l'origine de l'apparition de courant capacitif (courant de fuites). Pour tenir compte de ces effets, on définit la capacité telle que :

$$C = \frac{Q}{V} = \frac{2\pi\epsilon_0}{\ln \frac{D}{h}} \dots\dots\dots (1.8)$$

1.13- Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons évoqué quelques généralités sur les réseaux électriques et donné un bref aperçu sur les expressions des paramètres électrique des conducteurs formant une ligne de transport d'énergie. Dans le prochain chapitre, nous résumons les concepts de la compatibilité électromagnétique qui permettent de fixer le niveau du champ électromagnétique généré par les lignes de transport.

2.1- Introduction

La Compatibilité électromagnétique (CEM) est présente partout à l'état naturel. Il règne à la surface de la terre un champ électrique naturel créé par la présence de charges électriques dans la haute atmosphère. De même pour le champ magnétique terrestre dont l'existence est prouvée par la déviation d'une aiguille aimantée suivant l'axe Nord-Sud. Artificiellement, tout passage de l'énergie électrique dans un conducteur génère à la fois un champ électrique et un champ magnétique. Sachant que ces champs sont relativement néfastes, il faut alors les étudier vis-à-vis de la CEM.

2.2-Définition de la CEM

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

2.3-Acteurs de la CEM

Les acteurs qui mettent en évidence la CEM sont : Source, Couplage et Victime. Le schéma de la figure II.1, la position de ces acteurs dans un processus d'étude de la CEM.



Figure 2.1: Acteurs de la CEM

2.3.1- Source

2.3.1.1-Définition

Tout appareil, qui émet une perturbation électromagnétique, est qualifié de source. Parmi les principales causes de perturbations, on cite ; la distribution d'énergie électrique, les ondes hertziennes, les décharges électrostatiques et la foudre. [6]

2.3.1.2-Réseaux électriques comme source

La tension et le courant génèrent respectivement des champs électrique et magnétique. Le transit de l'énergie mise en jeu étant à basse fréquence, les champs électrique et magnétique sont alors indépendants ; il s'agit des champs proches où le calcul se fait séparément.

Des coupures brèves de l'énergie (dV/dt ou dI/dt), génèrent des champs électrique et magnétique à haute fréquence ; on parle alors de champ lointain où les champs électrique et magnétique sont étroitement liés par une onde électromagnétique.

2.3.2- Couplage

2.3.2.1-Définition

Le couplage est le chemin de transmission des perturbations électromagnétiques de la source vers la victime. [6]

2.3.2.2-Chemin de couplage dans les réseaux électriques

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

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

2.3.2.3-Types de milieux

a.Milieu conducteur

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

$$\mathbf{J}=\sigma\mathbf{E}$$

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

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

Pour une tension sinusoïdale et en notation complexe la loi se généralise $U =ZI$

où Z est l'impédance.

b. Milieu isolant

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

c. Milieu magnétique

Un milieu magnétique favorise la circulation du champ magnétique. Il est

Caractérisé par : $\begin{cases} \mathbf{B} = \mu \mathbf{H} \\ \mu_0 = \mu_0 \mu_r \end{cases} \dots\dots\dots (2.2)$

μ_r : Perméabilité magnétique relative du milieu

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

d. Milieu diélectrique

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

Caractérisé par :

$$\begin{cases} \mathbf{D} = \epsilon \mathbf{E} \\ \epsilon = \epsilon_0 \epsilon_r \end{cases} \dots\dots\dots (2.3)$$

ϵ : Permittivité diélectrique appelée aussi constante diélectrique

$\epsilon_0 = 10^{-9} / 36\pi \left[\frac{F}{m} \right]$: Permittivité diélectrique du vide.

ϵ_r : Permittivité diélectrique relative du milieu

2.3.3- Victime

2.3.3.1- Définition

La victime, dans la trilogie source/couplage/victime, représente tout matériel susceptible d'être perturbé. [6]

2.3.3.2- Réseaux électriques comme victime

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

2.4- Modes de couplage

2.4.1- Mode commun

Le mode commun correspond souvent à un mode parasite. Sa tension est définie comme étant égale à la valeur moyenne de la tension entre les différents fils et la masse. Le courant de mode commun se divise entre les différents fils de liaison dans le même sens. Il est égal au courant qui s'écoule à la masse. [7]

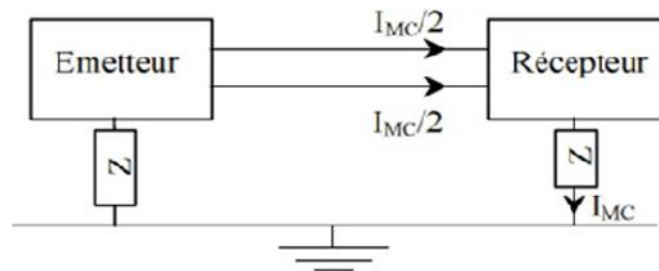


Figure 2.2: Mode commun

2.4.2- Mode différentiel

Les signaux utiles sont généralement transmis en mode différentiel. Le courant différentiel se boucle sur les deux fils de liaison. Il circule en sens opposé sur chacun des fils. [7]

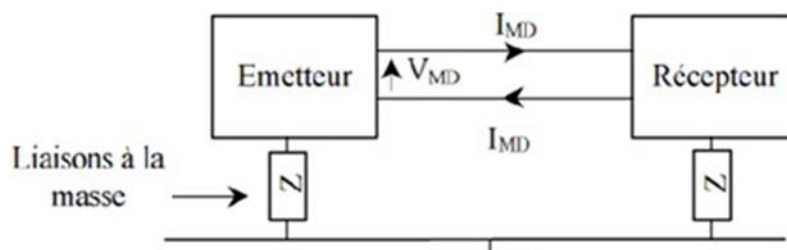


Figure 2.3 : Mode différentiel

Il est difficile de filtrer une perturbation en mode différentielle si le signal utile à la même fréquence que la perturbation. Il faut donc éviter que ce mode de couplage puisse se produire. [7]

2.5- Types de couplages

En peut citer trois types de couplages:

- Couplage par conduction qui se traduit par la circulation d'un courant perturbateur.

- Couplage par rayonnement qui se transmet par le champ électrique, ou magnétique B ou électromagnétique (E, B).
- Couplage par ionisation qui se transmet à travers une décharge électrique dont le courant est constant. Le schéma(II.2) montre les différents modes de couplage. [7]

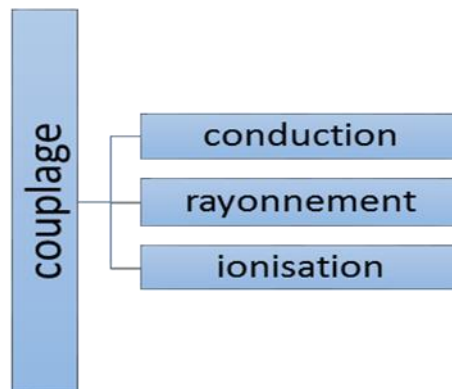


Figure 2.4 : Modes de couplage

2.5.1- Couplage par conduction (impédance commune)

2.5.1.1-Définition

Le couplage par conduction est mis en évidence lorsqu'un courant circule entre deux sous-systèmes d'un système électrique à travers des impédances communes constituées caractérisé par un milieu conducteur (résistances et réactances).

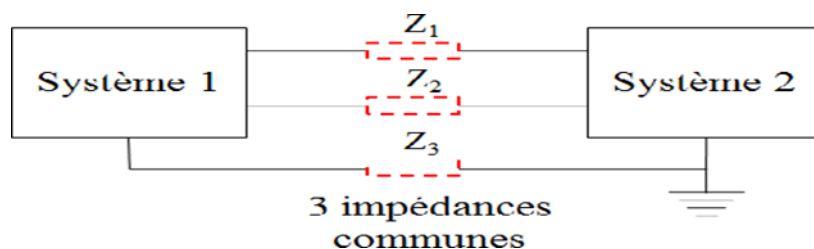


Figure 2.5 : Impédance commune

Il est difficile de filtrer une perturbation en mode différentielle si le signal utile à la même fréquence que la perturbation. Il faut donc éviter que ce mode de couplage puisse se produire.

2.5.1.2-Liaison directe ou perturbations directement conduites

La perturbation provoquée est transmise directement à la victime sans qu'elle soit modifiée. En peut citer quelque perturbation causée sont les suivent:

a. Variation rapide de tension

Elle est causée principalement par des défauts où la tension peut augmenter ou diminuer de quelques pourcent dont la durée est de quelques (ms).

b .variation lente de tension

Causée principalement par la variation la charge sur le réseau de distribution dont la durée peut atteindre plusieurs secondes.

c. Creux ou microcoupures de tension

Causées par des défauts sur les lignes d'alimentation, orage, vent (contact bref entre les lignes) pendant une durée comprise entre 1ms et 1s.

d.Surtension

Produite soit localement par une variation rapide du courant traversant un circuit inductif ou par résonance du circuit LC, (coupure due à un défaut, délestage du réseau, ...)

2.5.1.3-Couplage d'un champ électrique avec un conducteur

Un champ électrique variable engendre, sur les conducteurs parallèles à ses lignes de champ, un courant électrique. Ce phénomène est appelé couplage champ à câble.

Dans le cas du réseau filaire cuivré, les lignes aériennes se comportent comme de véritables antennes vis-à-vis des multiples champs électriques alentours, qui y induisent des courants parasites de mode commun.

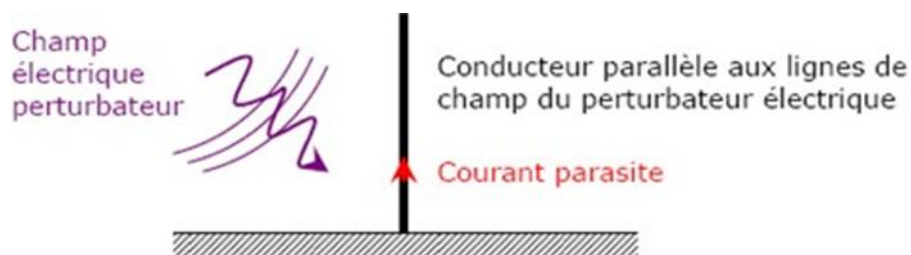


Figure 2.6 : Couplage d'un champ électrique avec un conducteur

2.5.1.4-Couplage d'un champ magnétique avec une boucle

Un champ magnétique variable traversant une boucle y induit un flux magnétique variable dont toute variation crée une différence de potentiel contre électromotrice. Ce phénomène est appelé couplage champ à boucle.

Dans le cas d'une ligne monofilaire, un courant de mode commun peut être induit par un champ magnétique externe dans la boucle formée par le câble, le plan

de terre et les impédances de connexion des équipements à la terre. Ce mécanisme est présenté sur la figure 2.8.

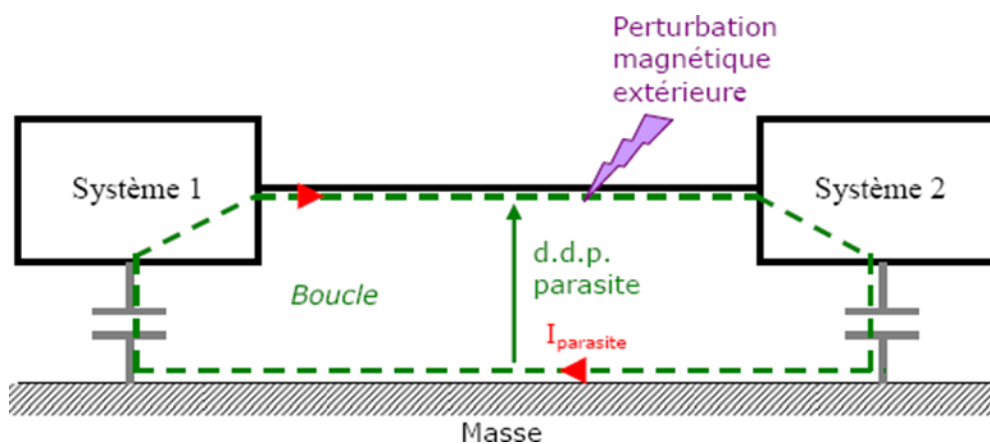


Figure 2.7 : Couplage d'un champ magnétique avec la boucle

2.5.2- Couplage par rayonnement

Le schéma de la figure 2.5.au-dessous montre ce dernier

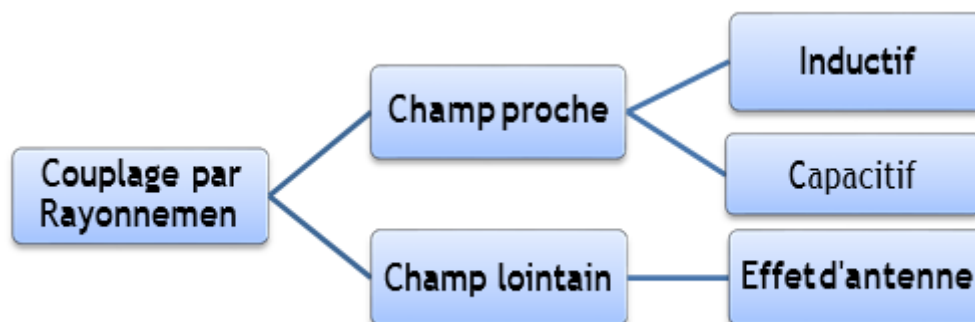


Figure 2.8: Couplage par rayonnement

2.5.2.1-La zone de champs lointains

Dans la zone lointaine de l' émetteur ($> \gamma/6$), où la fréquence est élevée, le champ électrique et le champ magnétique sont perpendiculaires à la fois entre eux et à la direction de propagation. Leur mesure et leur calcul ce fait d' une manière couplées. Ils forment une onde électromagnétique.

2.5.2.2-La zone de champs proche

Dans la zone proche de l'émetteur où la fréquence est faible, le champ électrique et le champ magnétique sont découplés et agissent indépendamment les uns des autres et sont mesurables et se calculent séparément

2.5.3- Couplage inductif

2.5.3.1-Equations mise en jeux

Une circulation du courant dans un conducteur crée un champ magnétique qui rayonne autour de ce dernier. [6]

Dans le cas de configurations symétriques, le champ se calcule par le théorème d'Ampère :

$$\int_C \vec{B} \cdot d\vec{t} = \mu_0 \sum_I^N I_i = N\mu_0 I \quad \dots\dots\dots(2.4)$$

Dans le cas de configurations qui ne présentent aucune symétrie, le champ se calcule par la formule de Biot et Savart:

$$\vec{B} = \frac{\mu_0}{4\pi} \int_l \frac{I(d\vec{l}) \times \vec{r}}{r^3} \quad \dots\dots\dots (2.5)$$

Quand un champ magnétique traverse circuit formant une surface, le flux génère une tension induite décrite par la loi de Faraday.

$$e = - \frac{d\phi}{dt} = - S \frac{dB}{dt} \quad \dots\dots\dots(2.6)$$

2.5.3.2-Couplage par diaphonie inductive

La diaphonie est un mode de couplage qui se rapproche du couplage champ à câble.

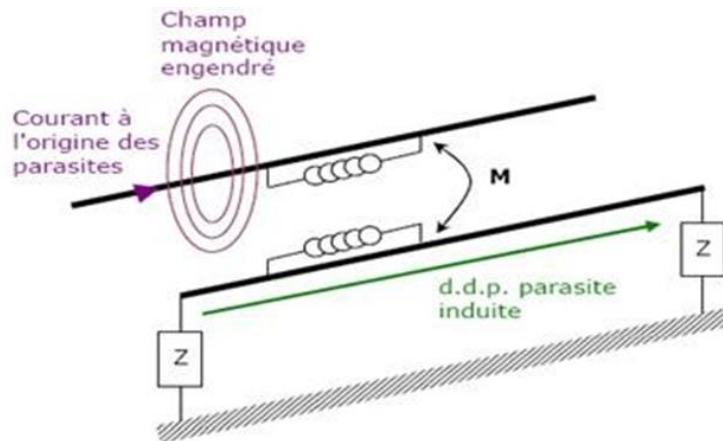


Figure 2.9 : Diaphonie inductive

Le courant qui circule dans un fil génère un champ magnétique. Ce champ, s'il est variable, génère à son tour une différence de potentiel contre électromotrice dans les boucles voisines.

2.5.4- Couplage capacitif

2.5.4.1-Equations mises en jeu

Toute différence de potentiel entre deux éléments, causée par une différence de charges électriques, va générer un champ électrique sous la loi de Gauss :

$$\int_s \vec{E} \cdot \vec{dS} = \frac{\sum Q}{\epsilon_0} \dots\dots\dots (2.7)$$

Le champ électrique et les différents potentiels sont liés par :

$$\vec{E} = -\overrightarrow{\text{grad}v} \dots\dots\dots(2.8)$$

2.5.4.2-Couplage par diaphonie capacitive

La différence de potentiel entre un conducteur et son environnement génère autour de ce conducteur un champ électrique. Ce champ, s'il est variable, peut se coupler dans une autre structure filaire qui lui est parallèle et génère à son tour un courant. Ce courant parasite sera d'autant plus élevé que la tension et la fréquence de ce courant sont élevées.

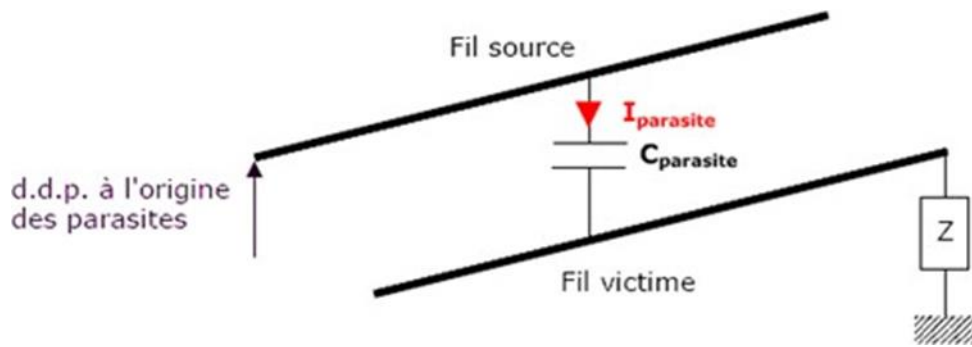


Figure 2.10 : Couplage par diaphonie capacitive

2.5.4.3-Couplage d'un conducteur à un plan de masse

La capacité entre deux conducteurs voisins n'est jamais nulle. Sous l'action d'une perturbation extérieure, une différence de potentiel peut être engendrée entre ces deux conducteurs, donnant naissance à un courant de mode commun entre les deux systèmes. Ce phénomène est appelé couplage conducteur à plan de masse.

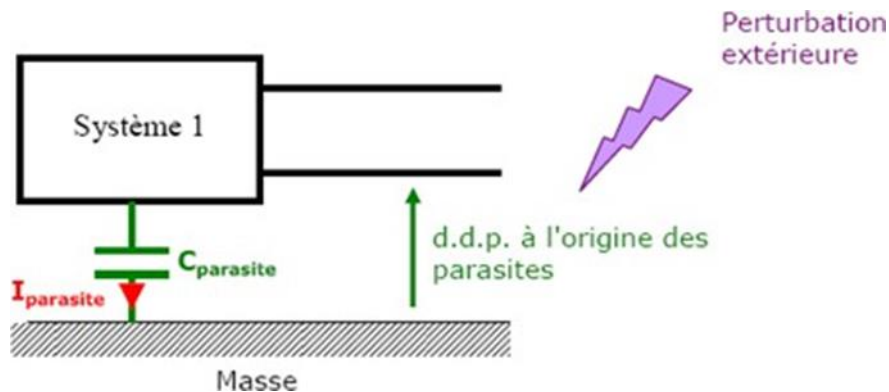


Figure 2.11 : Couplage conducteur - plan de masse

2.5.5- Couplage par ionisation

Ce couplage concerne les milieux ionisés soit par la chaleur ou par l'humidité.

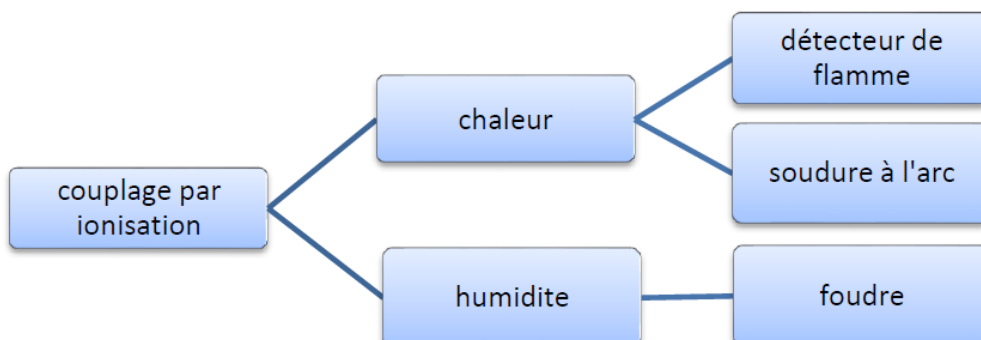


Figure 2.12: Couplage par ionisation

2.6- Effets de la géométrie

2.6.1- Effet pelliculaire (Effet de peau)

En courant alternatif, la densité de courant est maximale sur la surface d'un conducteur et décroît vers le l'intérieur du conducteur. Ce phénomène, appelé "effet pelliculaire" ou "effet Kelvin", modifie les pertes par effet Joule et la réactance interne des conducteurs.

L'amortissement des courants de Foucault dans le matériau, dans le cas simple d'une onde plane harmonique d'incidence nulle, décroît exponentiellement en fonction de la profondeur du matériau. [7]

L'épaisseur où circule le courant est donnée par:

$$\delta = \sqrt{\frac{2}{\mu\sigma\omega}} = \frac{1}{\mu\sigma\pi f} \dots\dots\dots(2.9)$$

2.6.2- Effet de proximité

Dans une ligne monophasée, le courant circulant dans l'un des conducteurs, a tendance à se concentrer dans la région en regard de l'autre conducteur. [4]

2.6.3- Effet de couronne

Il s'agit d'un phénomène appelé « effet couronne ». Tout près des fils, le champ électrique est très intense ; ce qui crée une multitude des petites décharges électriques dans l'air à proximité. L'effet couronne est très local puisqu'il ne se produit qu'à quelques centimètre des conducteurs. Il augmente par mauvais temps et produit alors un faible bruit.

Nous pouvons aussi en percevoir l'effet sous forme de perturbation des ondes radio lorsque nous passons en voiture sous la ligne. [4]

2.6.4- Effet de bord

Appelé aussi l'effet de proximité, il est souvent à l'origine de la déformation des lignes de champs électromagnétiques. On le retrouve à proximité des pylônes et isolateurs. Il est inexistant au milieu de la ligne.

2.7- Norme de la CEM

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

2.7.1- Limite admissible du champ électromagnétique

2.7.1.1-Sur l'être humaine

Relativement à l'électricité de 50/60 Hz, les valeurs limites, en fonction des effets immédiats que peuvent avoir sur l'être humain les champs électriques et magnétiques sont de $100\mu\text{T}$ pour le champ magnétique et de 5 kV/m pour le champ électrique. Ces valeurs ne tiennent compte que de la protection contre les effets thermiques (chaleur) et non des effets biologiques liés à une exposition sur le long terme. [11]

En ce qui concerne l'exposition chronique, les valeurs limites sont de 10V/m pour le champ électrique et de $0.2\ \mu\text{T}$ pour le champ magnétique.

Pendant le sommeil, les individus sont plus sensibles aux champs électromagnétiques. Dans ce cas, les limites doivent être bien plus basses dans des lieux de repos. Elles sont de 5V/m pour le champ électrique et $0.05\mu\text{T}$ pour le champ magnétique. [11]

2.7.1.2-Sur le matériel

Considérons la norme 55022 qui concerne une catégorie importante d'appareils électriques et les appareils de traitement de l'information. Cette norme est directement dérivée de la publication n°22 du CISPR et distingue deux classes d'appareils : [11]

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

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

2.8-Conclusion

Dans ce chapitre nous avons défini en premier lieu la compatibilité électromagnétique qui couvre les thèmes qui participent à la compréhension des mécanismes de transfert d'énergie entre une source électromagnétique et un équipement donné, et à l'évaluation des effets sur les dispositifs cibles appelés aussi victimes . Dans le domaine de basse fréquence les lignes haute tension sont des sources d'énergie électromagnétique et demeurent le principal intérêt de notre étude.

Nous avons schématisé le principe d'action des perturbations électromagnétiques et expliqué que pour qu'un phénomène de perturbation électromagnétique se produise, trois éléments doivent être présents : une source de perturbations, un milieu de couplage et une victime des perturbations.

Par la suite la compréhension des mécanismes d'interactions des champs électromagnétiques avec l'environnement, repose sur une identification parfaite des modes de transfert de l'énergie entre la source et la victime. Ces modes, que l'on appelle aussi « couplages » sont d'une manière générale l'expression des lois fondamentales de l'électromagnétisme et de la propagation.

3.1- Introduction

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.

3.2- Modélisation analytique des champs electromagnetiques 50Hz

Les modèles mathématiques développés jusqu'à présent, permettent de déterminer la distribution des quantités de charge électrique et magnétique au voisinage des lignes haute tension, par résolution des équations de Maxwell et de Laplace pour des géométries simples. En termes pratiques, ces modèles ne sont pas les plus adéquats pour le calcul du champ électromagnétique dans le voisinage des lignes électriques en raison de leurs mathématiques complexes, et l'imprécision dans les calculs. Pour cette raison, un simple modèle mathématique qui offre des résultats comparables à la valeur réelle, sera plus utile, surtout pour les concepteurs et les opérateurs des systèmes d'énergie électrique. Bien que les champs électriques et magnétiques générés par les lignes électriques sont couplés, dans le régime quasi statique et tenant compte de quelques hypothèses simplificatrices, ces champs peuvent être calculés de manière indépendante. Ainsi, en raison des variations lentes des champs électromagnétiques basse fréquence, les équations de Maxwell sont converties en des équations électrostatiques et magnétostatiques.

La problématique des calculs dans le voisinage des lignes haute tension réside dans la petite géométrie du conducteur par rapport aux grandes dimensions du système énergétique. Dans ce cas, on fait recourt aux solutions numériques tandis que les solutions analytiques sont utilisées pour déterminer les conditions aux limites et pour la vérification des résultats. Avec l'aide des ordinateurs modernes, les méthodes numériques sont de plus en plus attrayantes pour résoudre des problèmes pratiques des champs rayonnés par les dispositifs électriques. Elles consistent généralement en une discrétisation des équations intégrales de la loi de Biot et Savart. Parmi les méthodes développées pour les calculs numériques des champs électromagnétiques on peut citer la méthode de simulation de charge (CSM), méthode des éléments finis (FEM), méthode des différences finis (FD), la méthode des éléments de frontière (BEM), et la méthode des différences finis dans le domaine temporel (FDTD).

3.2.1- Equations de Maxwell

Considérons un milieu isotrope et homogène, de permittivité ϵ , et de perméabilité μ , la propagation du champ électromagnétique s'effectue dans l'espace libre selon les équations de Maxwell qui s'expriment sous la forme suivante.

$$\mathbf{rot}E = \frac{\partial B}{\partial t} \dots\dots\dots 3.1$$

$$\mathbf{rot}H = J + \frac{\partial D}{\partial t} \dots\dots\dots 3.2$$

$$\mathbf{div}D = P_v \dots\dots\dots 3.3$$

$$\mathbf{div}B = 0 \dots\dots\dots 3.4$$

Chapitre 3: Modelisation theorique des champs electromagnetiques sous une ligne électrique haute tension

Avec :

E : vecteur champ électrique ; B : vecteur induction magnétique.

H : vecteur champ magnétique ; J : vecteur densité de courant.

D : vecteur induction électrique ; P : densité volumique de charge.

A partir de l'équation 3.4 on peut déduire qu'il existe un potentiel magnétique

A tel que.

$$\mathbf{B} = \text{rot}\mathbf{A} \dots\dots\dots 3.5$$

Le champ magnétique H s'écrit alors :

$$\mathbf{H} = \frac{1}{\mu_0} \text{rot}\mathbf{A} \dots\dots\dots 3.6$$

De même, le champ électrique E s'exprime en fonction du potentiel vecteur magnétique A et du potentiel scalaire électrique ϕ .

$$\mathbf{E} = -\text{grad}\phi - \frac{\partial \mathbf{Q}}{\partial t} \dots\dots\dots 3.7$$

Ainsi, connaissant A et ϕ , on peut calculer le champ électrique et magnétique en tout point de l'espace.

3.2.2- Détermination du vecteur potentiel magnétique

En utilisant la jauge de Lorentz

$$\text{div}\mathbf{A} = -\epsilon_0\mu_0 \frac{\partial \phi}{\partial t} \dots\dots\dots 3.8$$

Et les équations de Maxwell ensemble projeté dans le plan fréquentiel, on obtient l'équation différentielle régissant le potentiel vecteur magnétique A.

$$\Delta\mathbf{A} + \mu_0\epsilon_0\omega^2\mathbf{A} = -\mu_0\mathbf{J} \dots\dots\dots 3.9$$

Chapitre 3: Modelisation theorique des champs electromagnetiques sous une ligne electrique haute tension

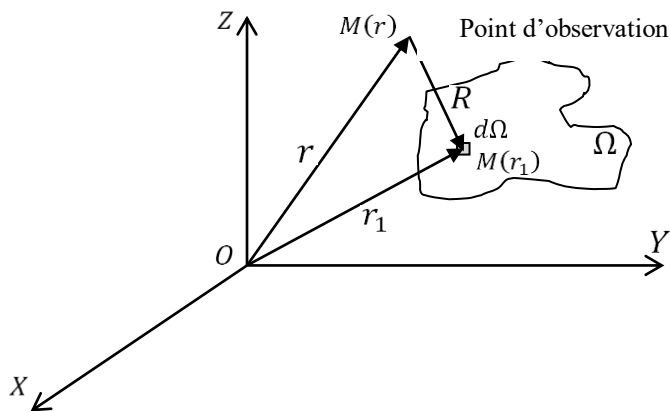


Figure 3.1 : Disposition du calcul du champ électromagnétique.

D'après la figure 3.1, la solution en un point $M(r)$, de cette équation est sous forme :

$$A(\mathbf{r}) = \frac{\mu_0}{4\pi} \int_{\Omega} J(\mathbf{r}_1) \frac{e^{-j\beta R}}{R} d\Omega \dots\dots\dots 3.10$$

Où Ω est le volume ou cercle le courant J , $R=(r-r_1)$ est la distance entre le point d'observation $M(r)$ et le point $M(r_1)$ ou cercle le courant figure 3.1, $\beta = \frac{2\pi}{\lambda}$ est le nombre d'onde, $\lambda = \frac{c}{f}$ est la longueur d'onde, c est la vitesse de la lumière et f la fréquence d'excitation. Le potentiel scalaire électrique ϕ est alors égale a :

$$\phi = \frac{1}{4\pi\epsilon} \int_S \rho \frac{e^{-j\beta R}}{R} dS \dots\dots\dots 3.11$$

Le terme $e^{-j\beta R}$ traduit l'effet de propagation. Lors du calcul en champ proche, ce terme est souvent pris égal à 1. En effet, en champ proche, la distance R entre le point d'observation et le point ou cercle le courant est négligeable comparée a la longueur d'onde ($R \ll \lambda$).

3.3- Calcul analytique du champ électrique rayonné

3.3.1- Grandeurs de l'électrostatique

Dans ce chapitre, nous allons présenter de manière démonstrative les grandeurs essentielles de l'électrostatique. Pour plus amples informations, il existe une abondante littérature.

3.3.1.1- Force électrique

Il a expérimentalement été établi, par Coulomb, qu'une particule témoin subit une force d'une intensité \vec{F} proportionnelle à sa charge q , lorsqu'elle est placée au voisinage d'une ou plusieurs charges électriques Q_i , dans un milieu de permittivité ϵ (permittivité au champ électrique) donnée par :

$$\vec{F} = q \left(\frac{1}{4\pi\epsilon} \sum_i \frac{Q_i}{\|\vec{r} - \vec{r}_i\|^3} (\vec{r} - \vec{r}_i) \right) \dots \dots \dots 3.12$$

Où \vec{r}_i est le vecteur position d'une charge témoin.

En d'autres termes, deux corps chargés s'attirent ou se repoussent selon une force directement proportionnelle à leur charge et inversement proportionnelle au carré de la distance qui les sépare. Dans le cas d'un système à deux particules séparées par une distance r , nous avons la même relation simplifiée et nous retrouvons la forme plus commune de la force électrique ou "force de Coulomb" telle qu'elle est donnée dans la plupart des ouvrages (sous forme scalaire):

$$F = \frac{1}{4\pi\epsilon} \frac{q Q}{r^2} \dots \dots \dots 3.13$$

3.3.1.2- Potentiel électrique

➤ **Potentiel électrique du à une charge ponctuelle.**

Soit deux point A et B dans une région de l'espace où il existe un champ électrique $\vec{E}(x, y, z)$ et soit un chemin Γ reliant ces deux points, alors dans le cas particulier où la source d'un champ est une sphère ou un corps ponctuel et que nous posons une charge à son voisinage, nous avons la formule suivante exprimant le travail effectué par la force pour déplacer la charge du point A au point B :

$$dW_{A,B} = \vec{F} \circ d\vec{r} \Rightarrow \int_A^B \vec{F} \circ d\vec{r} = q \int_A^B \vec{E} \circ d\vec{r} = q \int_A^B E \cos\alpha dr = q \int_A^B E dr$$

$$= q \frac{Q}{4\pi\epsilon} \int_B^A \frac{1}{r^2} dr = q \frac{Q}{4\pi\epsilon} \left(\frac{1}{r_B} + \frac{1}{r_A} \right) = q \frac{Q}{4\pi\epsilon} \left(\frac{1}{r_A} - \frac{1}{r_B} \right) \dots\dots\dots 3.14$$

Par ailleurs, ce travail est, comme nous le verrons plus loin, assimilable à l'énergie potentielle.

Nous définissons ainsi la "différence de potentiel" ou simplement le "potentiel" donné par :

$$-\Delta U = \frac{Q}{4\pi\epsilon} \left(\frac{1}{r_A} - \frac{1}{r_B} \right) = U_B - U_A \dots\dots\dots 3.15$$

➤ **Potentiel électrique du à une charge linéaire porté par un fil rectiligne infini**

Soit le vecteur unitaire:

$$\vec{u}_r = \frac{\vec{r}}{\|\vec{r}\|} \dots\dots\dots 3.16$$

Chapitre 3: Modelisation theorique des champs electromagnetiques sous une ligne électrique haute tension

Nous avons :

$$d\vec{E} = \frac{1}{4\pi\epsilon} \frac{dq}{r^2} \vec{u}_r \dots\dots\dots 3.17$$

En faisant usage du concept de densité linéique, nous avons :

$$\vec{E} = \frac{1}{4\pi\epsilon} \int \frac{\gamma dl}{r^2} \vec{u}_r \dots\dots\dots 3.18$$

Considérons une ligne infinie de section négligeable, et portant une charge linéique continue. Le but est le calcul du champ électrique et le potentiel en tout point M de l'espace extérieur à cette ligne afin de connaître les influences des charges de cette ligne sur son environnement en ne considérant que l'influence du champ électrique (si les charges étaient en mouvement il faudrait également prendre en compte l'influence du champ magnétique).

Pour cela, la méthode consiste à découper la ligne en de petits éléments de ligne dl , chacun de ces éléments portant une charge dq . Le champ créé par la charge en P au point M à distance x et de projection orthogonale H sur la ligne est :

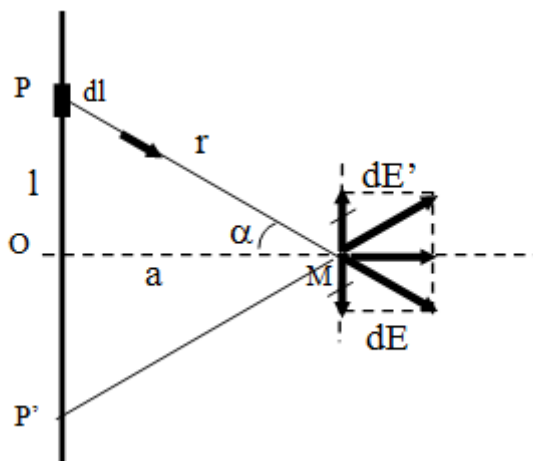


Figure 3.2 : champ électrique créé par un fil infiniment long

Chapitre 3: Modelisation theorique des champs electromagnetiques sous une ligne électrique haute tension

$$\overrightarrow{dE}_p = \frac{1}{4\pi\epsilon} \frac{\gamma dl}{x^2} \overrightarrow{u}_x \dots \dots \dots 3.19$$

En prenant le symétrique P' de P par rapport à H (la projection orthogonale de M sur le fil) pour lequel nous avons identiquement :

$$\overrightarrow{dE}_{p'} = \frac{1}{4\pi\epsilon} \frac{\gamma dl}{x'^2} \overrightarrow{u}_{x'} \dots \dots \dots 3.20$$

Le champ total est donc :

$$\overrightarrow{dE}(M) = \overrightarrow{dE}_p(M) + \overrightarrow{dE}_{p'}(M) = \frac{1}{4\pi\epsilon} \frac{\gamma dl}{x^2} \overrightarrow{u}_x + \frac{1}{4\pi\epsilon} \frac{\gamma dl}{x'^2} \overrightarrow{u}_{x'} \dots \dots \dots (3.21)$$

Or, nous avons :

$$x = x', \quad dl = dl', \quad \overrightarrow{u}_x = \frac{\overrightarrow{PM}}{PM}, \quad \overrightarrow{u}_{x'} = \frac{\overrightarrow{P'M}}{P'M} \dots \dots \dots (3.22)$$

Donc :

$$\overrightarrow{dE}(M) = \frac{1}{4\pi\epsilon} \frac{\gamma dl}{x^2} \left(\frac{\overrightarrow{PM}}{PM} + \frac{\overrightarrow{P'M}}{P'M} \right) = \frac{1}{4\pi\epsilon} \frac{\gamma dl}{x^3} (\overrightarrow{PM} + \overrightarrow{P'M}) = \frac{2}{4\pi\epsilon} \frac{\gamma dl}{x^3} \overrightarrow{HM} \dots \dots (3.23)$$

Cette dernière relation montre bien que le champ est orthogonal à la ligne (au fil).

La norme de $\overrightarrow{dE}(M)$ est :

$$dE(M) = \frac{2}{4\pi\epsilon} \frac{\gamma dl}{x^3} \|\overrightarrow{HM}\| = \frac{2}{4\pi\epsilon} \frac{\gamma dl}{x^3} r \dots \dots \dots (3.24)$$

Cette relation comporte trois variables dépendantes r, dl, x . La norme du champ total en un point est donc la somme des normes sur l'ensemble de la longueur du fil puisque tous les vecteurs $\overrightarrow{dE}(M)$ ont la même direction.

Pour effectuer ce calcul, nous allons introduire un changement de variable, et mettre r, dl, x en fonction de l'angle entre la ligne et le vecteur \overrightarrow{PM} .

Chapitre 3: Modelisation theorique des champs electromagnetiques sous une ligne électrique haute tension

Dans le triangle rectangle HMP :

$$\cos \alpha = \frac{\overline{HM}}{\overline{PM}} = \frac{z}{r} \dots \dots \dots 3.25$$

Si nous prenons l'origine des z en H . Nous avons aussi :

$$\sin \alpha = \frac{\overline{HM}}{\overline{PM}} = \frac{r}{z} \qquad \tan \alpha = \frac{\overline{HM}}{\overline{HP}} = \frac{r}{z} \dots \dots \dots 3.26$$

Et :

$$dl = dz = -r \frac{(1 + \tan^2 \alpha)}{\tan^2 \alpha} d\alpha = -r \frac{(1 + \sin^2 \alpha)}{\frac{\cos^2 \alpha}{\sin^2 \alpha}} d\alpha =$$

$$-r \frac{(\sin^2 \alpha + \cos^2 \alpha)}{\sin^2 \alpha} d\alpha = \frac{-r}{\sin^2 \alpha} d\alpha \dots \dots \dots 3.27$$

$$E = \frac{\gamma}{2\pi\epsilon r} \cos \alpha \Big|_0^{\pi/2} \dots \dots \dots 3.28$$

D'où :

$$dE = - \frac{\gamma}{2\pi\epsilon} \frac{r}{\sin^2 \alpha} d\alpha \frac{\sin^3 \alpha}{r^3} r = - \frac{\gamma}{2\pi\epsilon r} \sin \alpha d\alpha \dots \dots \dots 3.29$$

L'intégration est facile, mais il faut faire attention aux bornes. Nous devons intégrer sur une moitié de ligne, donc entre 0 et $\pi/2$:

Et donc :

$$\vec{E} = \frac{\gamma}{2\pi\epsilon r} \vec{u}_r \dots \dots \dots 3.30$$

Le potentiel se déduit aisément en prenant la primitive de E :

$$U = \frac{\gamma}{2\pi\epsilon} \ln(r) + c^{te} \dots\dots\dots 3.31$$

La constante est indéterminée lorsque r tend vers l'infini, U tendant vers zéro, conduit à une constante infinie. Cette indétermination est due essentiellement à l'approximation de la ligne infinie. Ce problème est éliminé par le calcul de la différence de potentiel analogiquement à la démarche de l'équation 3.14 et 3.15.

3.3.2- 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. (Les théorèmes de Thevenin et Norton's sont aussi des cas spécifiques du théorème de l'équivalence). Le concept fondamental derrière ce théorème est le suivant :

Il existe un nombre infini de sources qui peuvent être placées à l'intérieur d'une région de l'espace, tel qu'il se produit les mêmes champs en dehors de cette région. Par exemple, le champ extérieur d'un nuage de charge, de symétrie sphérique, de rayon a , et de charge totale Q est le même que celui due à une charge ponctuelle Q en son centre, ou à une surface uniforme de charge Q sur toute la surface d'une sphère de rayon inférieur ou égal à a .

Ces trois sources sont décrites dans la figure 3.3 (elles) sont équivalentes à l'égard de la région qui nous intéresse, dans ce cas, l'extérieur de la sphère. (Notons qu'à l'intérieur des trois sphères le champ est différent). Il est possible de trouver des sources qui sont beaucoup plus simples que celle-ci. La méthode des images de charges au-dessus d'un plan conducteur est un exemple d'une grande utilité pratique.

Chapitre 3: Modelisation theorique des champs electromagnetiques sous une ligne electrique haute tension

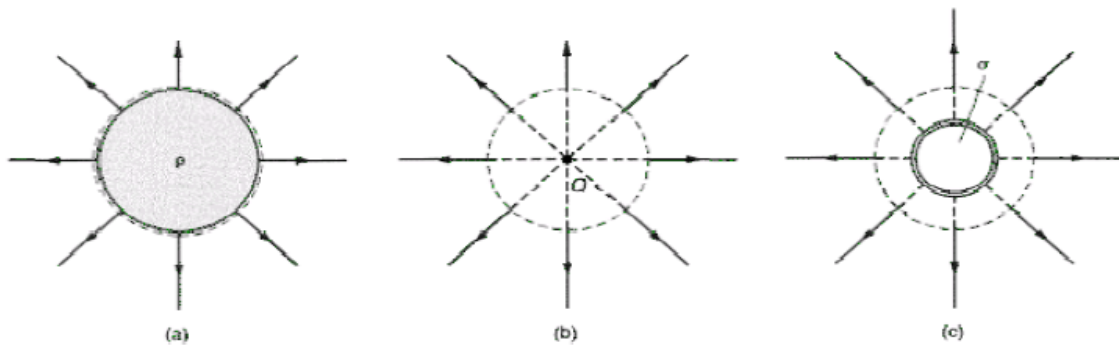


Figure 3.3 : Distribution de Charges équivalentes pour: (a) sphère chargée en volume de rayon a , (b) charge ponctuelle, et (c) charge surfacique de la sphère de rayon $r < a$.

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 3.3 (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 a une façon beaucoup plus simple de le faire : Deux charges de mêmes valeurs et de signe opposé génèrent un champ électrique tangentiel nul sur le plan de la symétrie de ces deux charges.

Chapitre 3: Modelisation theorique des champs electromagnetiques sous une ligne electrique haute tension

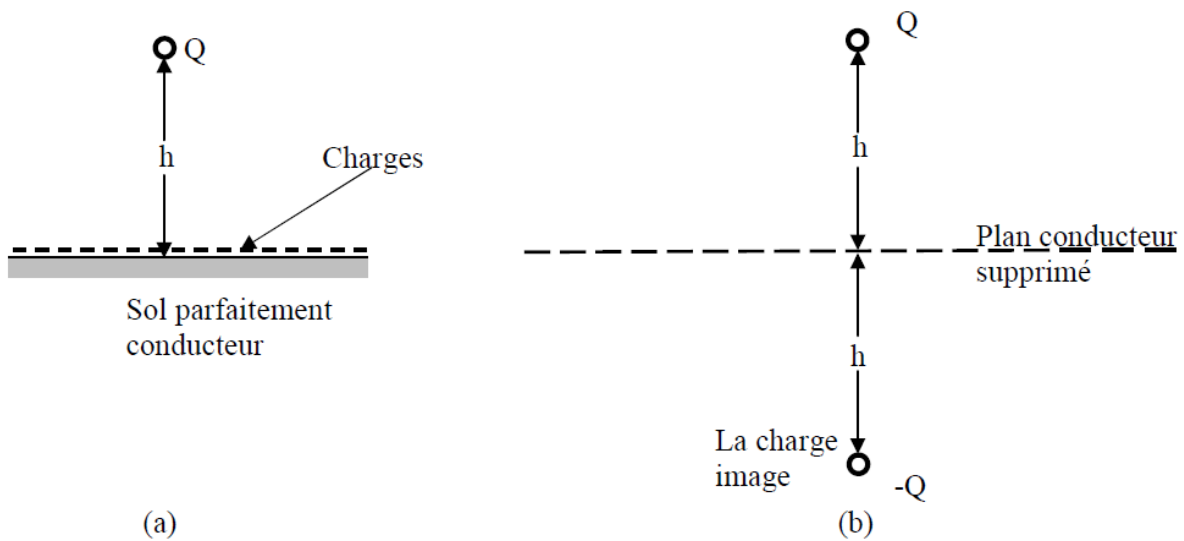


Figure 3.4_: (a) Charge au-dessus d'un sol parfaitement conducteur, et (b) charges induites sur le sol remplacée par une charge équivalente

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 (3.4.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.

Dans un souci de clarté, nous avons noté la charge linéique Q . Dans ce qui suit Nous la noterons q et Q désignera la charge totale.

3.3.3- Méthodes de calcul du champ électrique

L'étude de ces champs repose sur le modèle macroscopique de Maxwell qui conduit à des équations différentielles simples pour les champs statiques ou quasi-statiques. Les champs magnétique et électrique sont découplés. Grâce à cette hypothèse simplificatrice, on obtient deux types de problèmes indépendants: électrostatique ou magnétostatique.

Si les équations sont simples, leur solution analytique ne peut être obtenue que dans de rares et dans de simples configurations. Dans la plupart des cas pratiques, l'emploi de méthode numérique de résolution s'impose, chose que le progrès rapide des technologies des ordinateurs, durant ces dernières années, a permis. Deux catégories de méthodes ont été successivement développées. D'une part les méthodes des éléments finis, et d'autre part la méthode des intégrales de frontière. La plus connue est la méthode des éléments de frontières : Boundary Element Method (BEM). Cependant, il y a quelques autres méthodes moins populaires comme la méthode des multi pôles (MPM) ou la méthode des charges fictives : Charge Simulation Méthode (CSM), qui peuvent être considérées comme des techniques de frontière. Cette dernière (CSM) a été fréquemment utilisée pour modéliser des problèmes de haute tension.

3.3.3.1- Formulation mathématique du champ électrique en deux dimensions

Le calcul du champ électrique, près d'une ligne de transport d'énergie, se fait en supposant qu'il n'y a pas de charge d'espace libre. Le sol est supposé parfaitement conducteur, car le temps nécessaire aux charges à la surface du sol pour se redistribuer sous l'action du champ électrique (temps de relaxation) est extrêmement petit (0.1 à 10 nanosecondes) comparé à la période de la fréquence industriel. La permittivité de l'air est quasiment indépendante des conditions climatiques et est égale à la permittivité du vide.

$$\epsilon_0 = (1/36\pi \cdot 10^9) \text{ F} \cdot \text{m}^{-1}$$

Tous les conducteurs de la ligne sont caractérisés par une tension complexe $V = V_r + jV_i$, et un rayon. Pour les faisceaux de conducteurs symétriques, et loin de la surface des conducteurs, il convient de considérer le faisceau comme un conducteur unique au rayon équivalent :

$$r_{eq} = R \sqrt{\frac{nR}{R}}$$

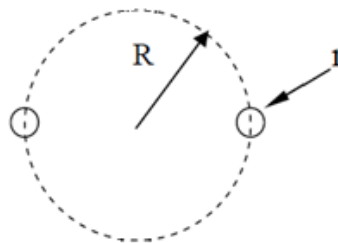


Figure 3.5 : Constitution d'un faisceau de deux conducteurs $n=2$.

Chapitre 3: Modelisation theorique des champs electromagnetiques sous une ligne électrique haute tension

Où R (est le) rayon du cercle circonscrit au faisceau (cercle passant par les centres de tous les conducteurs). n est le nombre de conducteurs élémentaires par faisceau, et r le rayon des conducteurs élémentaires du faisceau. Cette approximation reste valable si le rayon du faisceau est petit devant la distance entre les phases. La relation générale que l'on emploie pour calculer les charges portées par les conducteurs d'une ligne multifilaire est l'équation matricielle suivante :

$$[\gamma] = [C][V]$$

Où $[\gamma]$ et $[V]$ sont respectivement les matrices uni-colonnes des charges et des potentiels des conducteurs (le sol étant au potentiel nul). On commence d'abord par calculer les coefficients de potentiel de la ligne $[P]$. Ces coefficients sont obtenus par application directe de la théorie des images; on remplace le sol, considéré comme un plan de potentiel nul, par l'image des conducteurs par rapport à ce plan. Désignons par i, j, \dots Les conducteurs parallèles au-dessus du sol, et par i', j', \dots leurs images respectives.

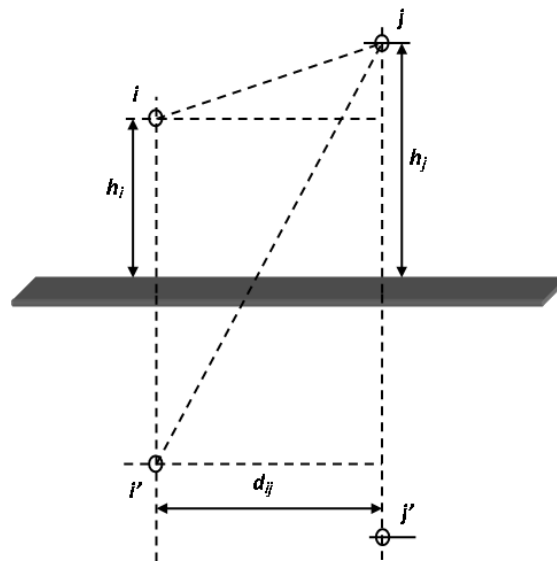


Figure 3.6 : Détermination des coefficients de potentiel d'une ligne.

➤ **Coefficients de potentiel**

Les charges au sol étant toujours supposées concentrées à sa surface, on calcule les coefficients de potentiel λ_{ii} et λ_{ij} par la théorie des images électriques On a :

$$\lambda_{ii} = \frac{1}{2\pi\epsilon_0} \ln \left[\frac{2h_i}{R_i} \right] \dots\dots\dots(3.31)$$

$$\lambda_{ij} = \frac{1}{2\pi\epsilon_0} \ln \left[\frac{\sqrt{(h_i+h_j)^2 + d_{ij}^2}}{\sqrt{(h_i-h_j)^2 + d_{ij}^2}} \right] \dots\dots\dots(3.32)$$

Avec :

d_{ij} : distance horizontale de ces deux conducteurs (distance qui sépare leurs projections sur le sol),

h_i, h_j : hauteur moyenne des conducteurs au-dessus du sol.

$\epsilon_0 = (1/36\pi \cdot 10^9) \text{ F} \cdot \text{m}^{-1}$ étant la permittivité du vide.

En pratique, la hauteur des conducteurs varie le long d'une portée, ainsi que d'une portée à l'autre. Les hauteurs à introduire dans les calculs du champ sont les hauteurs moyennes définies par :

h = hauteur d'accrochage.

A l'aide des coefficients de potentiel ainsi obtenus, on forme la matrice carrée :

$$[\lambda] = \begin{bmatrix} \lambda_{11} & \dots & \lambda_{1i} & \dots & \lambda_{1n} \\ \lambda_{j1} & \dots & \lambda_{ij} & \dots & \lambda_{jn} \\ \lambda_{n1} & \dots & \lambda_{ni} & \dots & \lambda_{nn} \end{bmatrix} \dots\dots\dots 3.33$$

Chapitre 3: Modelisation theorique des champs electromagnetiques sous une ligne electrique haute tension

Par inversion on en déduit enfin la matrice des capacités :

$$[c] = [\lambda]^{-1} \dots \dots \dots 3.34$$

La matrice [C] permet de calculer les charges linéiques portées par chaque conducteur en fonction de leurs potentiels respectifs, conformément à l'équation

$$\gamma_r = [C][V_r] \text{ et } \gamma_i = [C][V_i] \dots \dots \dots 3.35$$

Dans le cas des lignes triphasées de transport d'énergie, la charge d'un conducteur, et par conséquent ses champs superficiels, ne sont pas nécessairement maximaux en même temps que la tension du conducteur lui-même. Ce phénomène est dû au déphasage entre les tensions du système triphasé.

Soit un conducteur (phase) de charge Q on va calculer le champ électrique \vec{E} généré par ce conducteur a un point M(x,y) avec la méthode des image figure

Chapitre 3: Modelisation theorique des champs electromagnetiques sous une ligne electrique haute tension

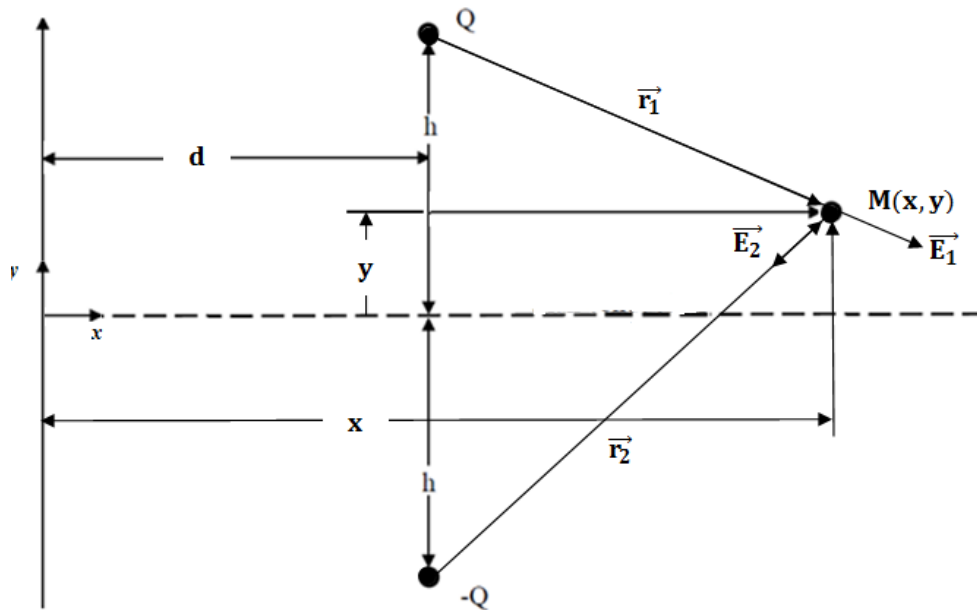


Figure 3.7 : Détermination le champ électrique pour une phase.

$$\vec{E} = \vec{E}_1 + \vec{E}_2 \dots \dots \dots 3.36$$

$$\vec{E}_1 = \frac{q}{2\pi\epsilon_0 r_1^2} \cdot \vec{r}_1 \quad , \quad \vec{E}_2 = \frac{q}{2\pi\epsilon_0 r_2^2} \cdot \vec{r}_2 \dots \dots \dots 3.37$$

$$\vec{r}_1 = (x - d)\vec{i} + (h - y)\vec{j} \quad , \quad \vec{r}_2 = -(x - d)\vec{i} - (h + y)\vec{j} \dots \dots \dots 3.38$$

$$r_1^2 = (x - d)^2 + (h - y)^2 \quad , \quad r_2^2 = (x - d)^2 + (h + y)^2 \dots \dots \dots 3.39$$

De même façon ce fait le calcul du champ électrique des deux phases de la ligne.

Chapitre 3: Modelisation theorique des champs electromagnetiques sous une ligne electrique haute tension

D'après les équations 3.36 à 3.39 le champ électrique d'une charge électrique en coordonnées cartésiennes est :

$$\hat{E}_{x,i} = \frac{\gamma_i}{2\pi\epsilon_0} \left[\frac{(x_i - d_i)}{[(x_i - d_i)^2 + (h_i - y_i)^2]} - \frac{(x_i - d_i)}{[(x_i - d_i)^2 + (h_i + d_i)^2]} \right] \dots\dots\dots 3.40$$

$$\hat{E}_{y,i} = \frac{\gamma_i}{2\pi\epsilon_0} \left[\frac{(y_i - h_i)}{[(x_i - d_i)^2 + (h_i - y_i)^2]} - \frac{(h_i + y_i)}{[(x_i - d_i)^2 + (h_i + y_i)^2]} \right] \dots\dots\dots 3.41$$

Les composantes du champ électrique Horizontales $\hat{E}_{x,i}$ et verticales $\hat{E}_{y,i}$ sont calculées par la somme des contributions de tous les conducteurs.

$$\hat{E}_x = \sum_{i=1}^n \hat{E}_{x,i} \dots\dots\dots 3.42$$

$$\hat{E}_y = \sum_{i=1}^n \hat{E}_{y,i} \dots\dots\dots 3.43$$

3.4- Calcul analytique du champ magnétique rayonné par une ligne HT

3.4.1- Champ magnétique génère par un fil rectiligne

Les composantes dans l'espace du vecteur potentiel magnétique généré par un fil rectiligne de longueur infinie représenté sur la figure 3.8, sont données par :

$$\mathbf{A}_x = 0; \quad \mathbf{A}_y = 0 \text{ et } \mathbf{A}_z = -\frac{\mu_0 I}{2\pi} \cdot \ln r' \dots\dots\dots 3.44$$

L'induction magnétique correspondante est :

$$B_x = -\frac{\mu_0 I}{2\pi} \cdot \frac{y}{r'^2}; \quad B_y = \frac{\mu_0 I}{2\pi} \cdot \frac{x}{r'^2} \quad \text{et} \quad B_z = 0 \dots \dots \dots 3.45$$

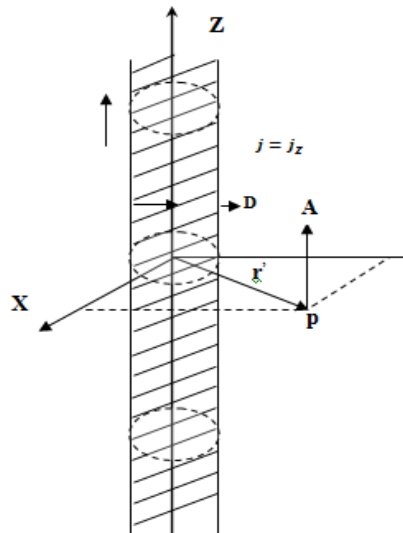


Figure 3.8 : Champ magnétique rayonné par un fil de longueur infinie

3.4.2- Méthode vectorielle pour le calcul du champ magnétique

Le champ magnétique émis par une ligne triphasée aérienne en un point M situé à une certaine distance par rapport à l'axe du pylône figure 3.9 peut être calculé comme étant la résultante des trois champs émis par chaque phase séparément. Dans ce contexte un code mathématique basé sur le calcul vectoriel a été développé, pour le calcul de la densité de distribution magnétique d'une ligne de puissance électrique haute tension.

Chapitre 3: Modelisation theorique des champs electromagnetiques sous une ligne électrique haute tension

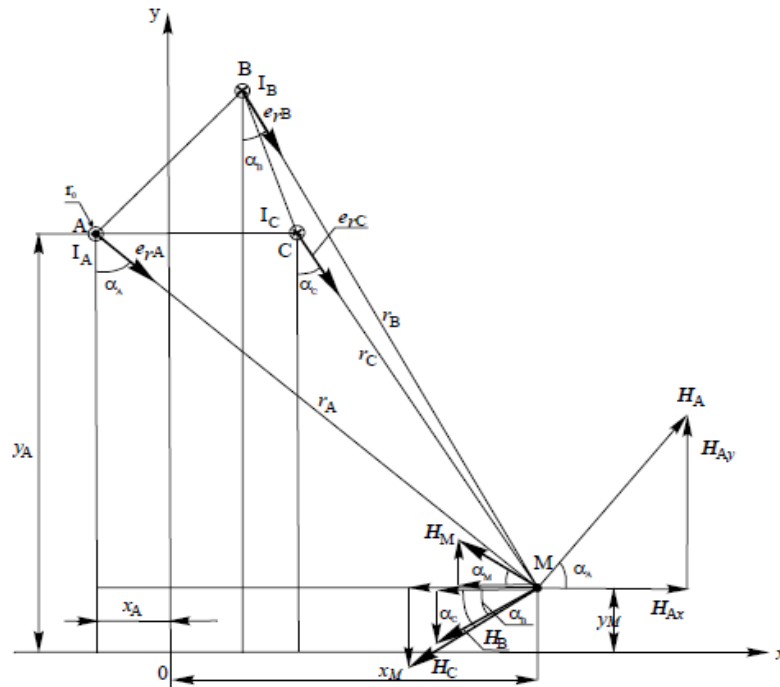


Figure 3.9 : Champ magnétique émis par les trois phases d'une ligne électrique en un point M

En se référant à la figure 3.9, les coordonnées des trois phases A,B,C dans le repère cartésien formé par l'axe du pylône et l'axe des distances sont respectivement $(X_A, Y_A), (X_B, Y_B), (X_C, Y_C)$; elles sont parcourues par un système de courants triphasés :

$$\begin{aligned} i_A &= I_m \sin \omega t \\ i_B &= I_m \sin(\omega t - 120^\circ) \\ i_C &= I_m \sin(\omega t + 120^\circ) \end{aligned}$$

Le champ magnétique sera calculé au moment où le courant qui circule dans la phase A est maximal pour $\omega t = \omega t_1 = 90^\circ$ Ainsi le système de courant triphasé prend la forme :

Chapitre 3: Modelisation theorique des champs electromagnetiques sous une ligne électrique haute tension

$$\begin{aligned} i_A &= (\omega t) = I \\ i_B &= (\omega t) = -0.5I \\ i_C &= (\omega t) = -0.5I \end{aligned}$$

Les courants des phases sont notés positifs lorsqu'ils se dirigent vers l'observateur, dans le cas contraire ils sont notés négatifs, dans ce cas l'intensité du champ magnétique émise par la ligne aérienne triphasée est la somme vectorielle des intensités de champ émises par les trois courants.

$$H_m = H_A + H_B + H_C \dots\dots\dots 3.46$$

Le champ magnétique rayonné par un fil rectiligne infini parcouru par un courant I situé à une distance r peut être exprimé comme suit :

$$H = \frac{I}{2\pi r}$$

L'expression du champ magnétique dû à la contribution des trois courants de phases est

$$H_m = \frac{1}{2\pi} \left[\frac{I_A}{r_A} e_{rA} + \frac{I_B}{r_B} e_{rB} + \frac{I_C}{r_C} e_{rC} \right] \dots\dots\dots 3.47$$

Avec (r_A, r_B et r_C) représentent les distances du point M aux phases A, B, C, et ($\vec{r}_A, \vec{r}_B, \vec{r}_C$) représentent les vecteurs unitaires des distances, calculées d'après la dépendance géométrique suivante :

Chapitre 3: Modelisation theorique des champs electromagnetiques sous une ligne électrique haute tension

$$r_A = \sqrt{(x_m - x_A)^2 + (y_m - y_A)^2}$$

$$r_B = \sqrt{(x_m - x_B)^2 + (y_m - y_B)^2}$$

$$r_C = \sqrt{(x_m - x_C)^2 + (y_m - y_C)^2}$$

Les angles formés par les vecteurs unitaires e_{rA} , e_{rB} , e_{rC} et l'axe des coordonnées sont calculés d'après la formule suivante :

$$\alpha_A = \arctan \frac{x_m - x_A}{y_m - y_A}$$

$$\alpha_B = \arctan \frac{x_m - x_B}{y_m - y_B}$$

$$\alpha_C = \arctan \frac{x_m - x_C}{y_m - y_C}$$

Les projections des vecteurs champs magnétiques dans les coordonnées x et y sont calculées selon les formules suivantes :

$$y_m - y_i < 0: \begin{cases} -H_{ix} = -H_i \cos \alpha_i \\ -H_{iy} = -H_i \sin \alpha_i \end{cases}$$

$$y_m - y_i > 0: \begin{cases} -H_{ix} = H_i \cos \alpha_i \\ -H_{iy} = -H_i \sin \alpha_i \end{cases}$$

Les projections du vecteur champ magnétique résultant dans les mêmes coordonnées, suivant l'axe des abscisses et des ordonnées sont respectivement :

$$\begin{cases} H_x = H_{Ax} + H_{Bx} + H_{Cx} \\ H_y = H_{Ay} + H_{By} + H_{Cy} \end{cases} \dots\dots\dots 3.48$$

$$\alpha_M = \arctan \frac{H_y}{H_x}$$

La densité du flux magnétique (B) est donnée par :

$$B = \mu_r \mu_0 H \dots\dots\dots 3.49$$

Avec μ_r : permittivité magnétique relative (=1.00000038).

3.5- Programmation sous l'environnement Matlab

Après avoir énumérer les méthodes analytiques de calcul des champs électromagnétiques des lignes haute tension, l'étape suivante consiste à implémenté sous l'environnement Matlab un code de calcul qui va nous permettre de déterminer la répartition des quantités de charges électriques et magnétiques au voisinage des lignes haute tension. Ce code de calcul est réalisé à partir des sous modules effectuant chacun une tache différente.

La figure (3.10)présente l'organigramme du code utilisé pour le calcul du champ électrique et celui magnétique en fonction de la distance à l'axe du pylône. Cet organigramme est constitué de trois blocs principaux ; bloc d'entré, bloc de résolution et le bloc de sortie.

Chapitre 3: Modelisation theorique des champs electromagnetiques sous une ligne electrique haute tension

- Bloc d'entrée (pré processeur) : il consiste à préparer les données nécessaires.

Pour le bloc de résolution, ces données concernant la description de la géométrie de la ligne (configuration et disposition géométrique des conducteurs), l'introduction de ses propriétés physiques et le calcul des quantités de charges électriques à la surface des conducteurs.

- Bloc de résolution (processeur) : ce bloque est constitué par l'expression analytiques du champ électrique et magnétique, il procède au calcul de leur distribution en fonction de l'éloignement a l'axe du pylône.

- Bloc de sortie (post processeur) : il représente la partie exploitation des résultats de calcul et permet leur interprétation graphique.

Chapitre 3: Modelisation theorique des champs electromagnetiques sous une ligne électrique haute tension

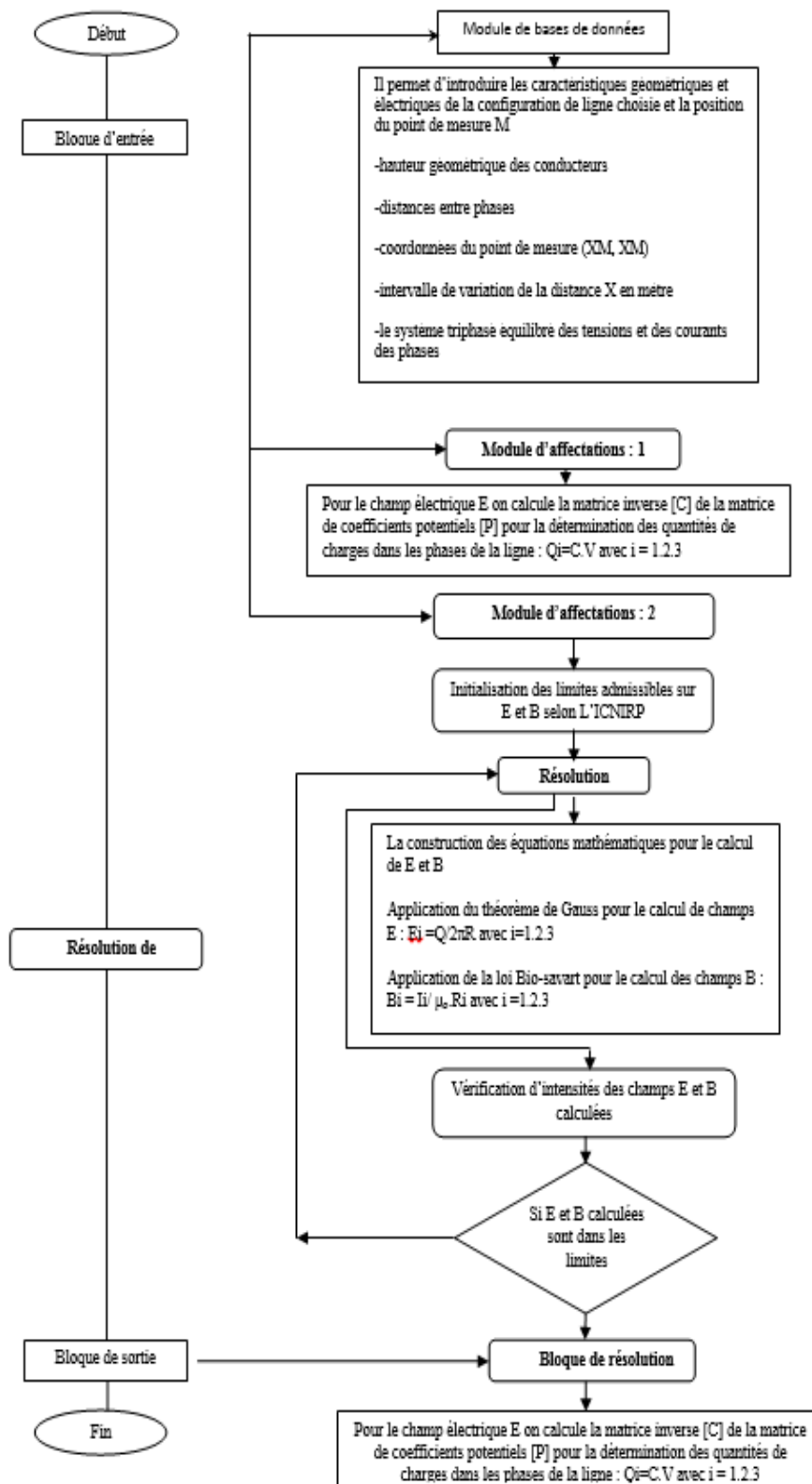


Figure 3.10 : Algorithme pour le calcul du champ électromagnétique rayonné par une ligne HT

3.5.1-Exploitation du programme de calcul

Le code de calcul développé précédemment a été exploité dans la validation du calcul analytique de la répartition du champ électrique et celui magnétique au voisinage de la ligne haute tensions effectué pour la ligne 400 kV avec la disposition géométrique donnée dans la figure 3.11 et le tableau 3.1.

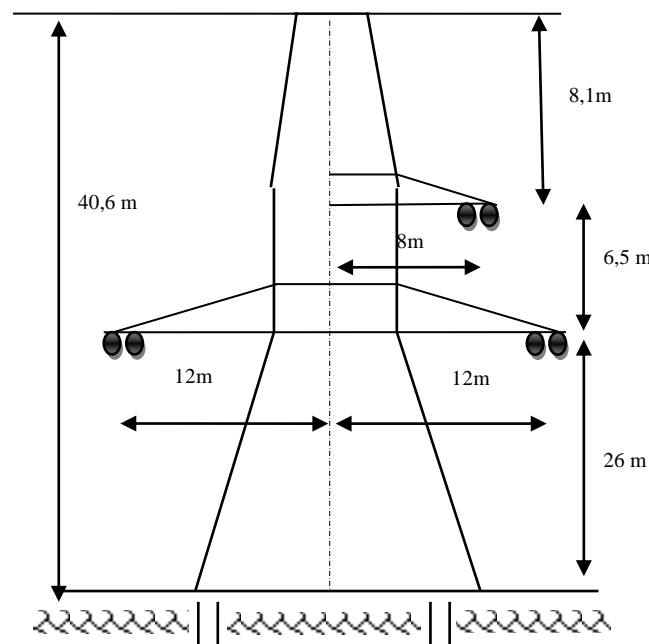


Figure 3.11 : Dimension de la ligne 400 kV (Drouech – Ramdan Djamel)

U [kV]	XA (m)	XB (m)	XC (m)	YA (m)	YB (m)	YC (m)	YM (m)
400	8	12	-12	32.5	26	26	1

Tableau 3.1 : Valeurs des paramètres normalisés de la ligne 400 kV

3.5.2 - Résultats et Discussions

3.5.2.1- Comportement du champ électrique

Les figures 3.12 et 3.13, représentent l'interprétation graphique des résultats de calcul analytiques des intensités de champ électrique rayonnées par la ligne 400 kV. La densité du champ électrique des lignes électriques aériennes triphasé 400 kV n'excède pas la valeur 0.4 kV/m à 60 m du pylône. La valeur maximale 1.83 kV/m sous la phase c figures (3.13).

La Figure (3.12,) représente les profils du champ électrique horizontal E_x , vertical E_y et total E . La composante vertical du champ électrique E_y est très importante comparée a celle horizontale E_x .

Le profil latéral du champ électrique résultant E approche celui de la composante vertical E_y .

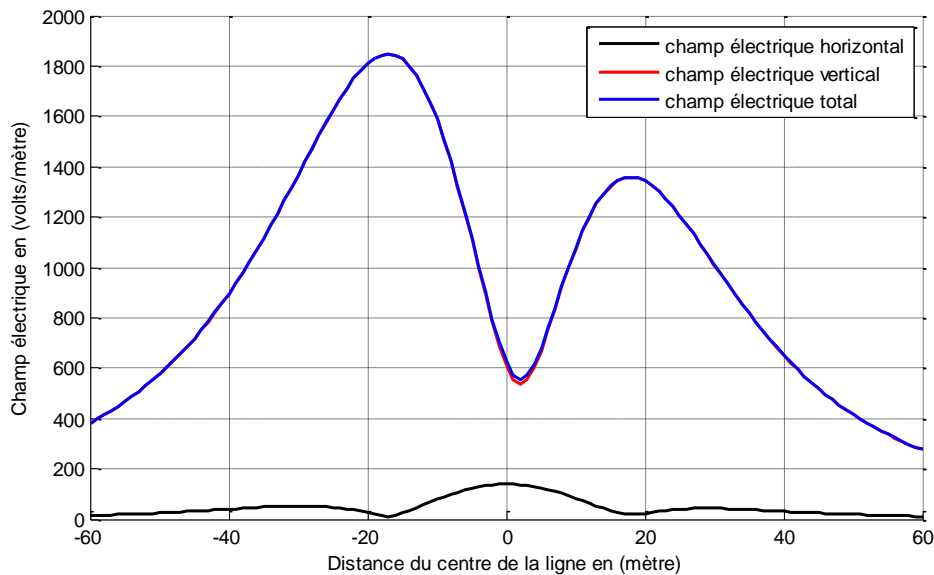


Figure 3.12 : Profils du Champs électrique à 1m du sol ; Champ horizontal vertical et total

Chapitre 3: Modelisation theorique des champs electromagnetiques sous une ligne électrique haute tension

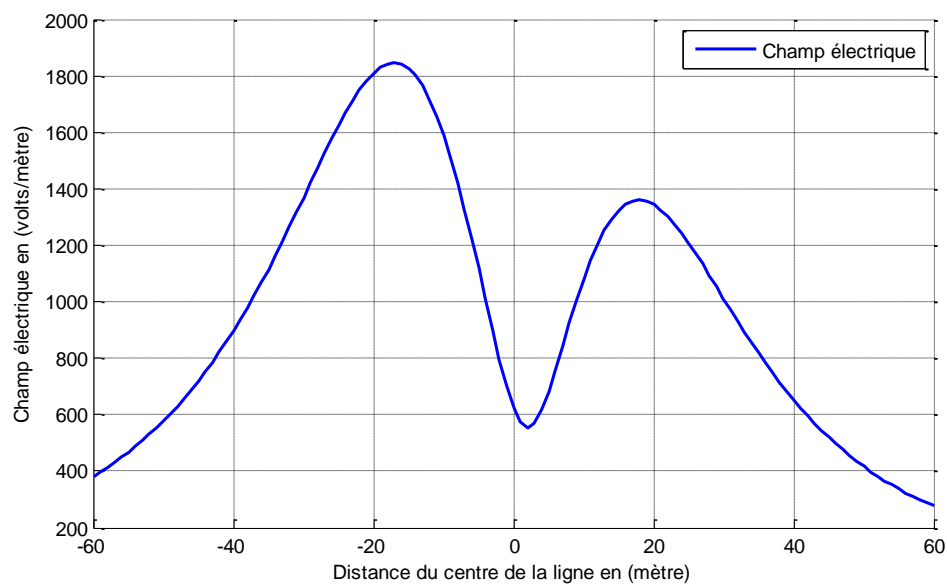


Figure 3.13 : Champ électrique généré par une ligne 400 kV à 1m du sol.

3.5.2.2 - Comportement du champ magnétique

La Figure (3.14) représente les profils du champ magnétique horizontal B_x , vertical B_y et total B .

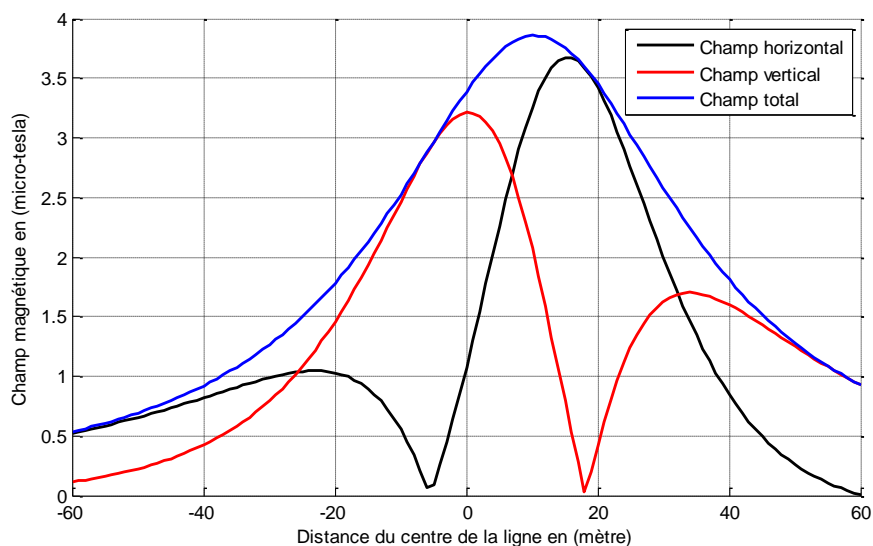


Figure 3.14 : Profils du Champs magnétiques à 1m du sol ; Champ horizontal et vertical

Chapitre 3: Modelisation theorique des champs electromagnetiques sous une ligne électrique haute tension

D'après la figures (3.15), la densité du champ magnétique de la ligne électriques aériennes triphasé 400 kV maximale et de $3.94 \mu\text{T}$ à 12m du centre du pylône, et n'excède pas la valeur $0,6 \mu\text{T}$, ceci sur une distance pas moins de 60 m. Le code de calcul développé peut ainsi donc être utilisé dans le contrôle de la pollution électromagnétique émise au voisinage des lignes haute tension de façon générale.

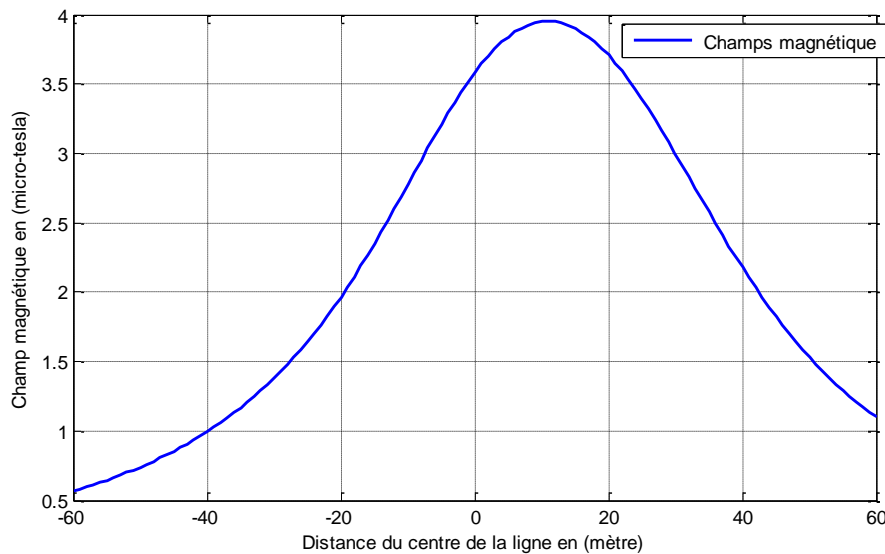


Figure 3.15 : Profil du champ magnétique pour la ligne étudié 400 kV à 1m du sol.

3.6 – Effets de la géométrie de la ligne sur le champ électromagnétique

Une ligne aérienne est caractérisée par sa tension entre phases. Cette tension définit l'isolement de la ligne qui est obtenu en maintenant, en toutes circonstances, entre les conducteurs et les objets au potentiel de la terre et entre les conducteurs eux-mêmes des intervalles d'air de longueur suffisante. Ces intervalles sont soumis en permanence à la tension de la ligne, mais ils subissent également des contraintes exceptionnelles, les plus gênantes étant les surtensions provoquées par la foudre.

Chapitre 3: Modelisation theorique des champs electromagnetiques sous une ligne électrique haute tension

Ils peuvent, varier en fonction des conditions climatiques (température ambiante, vitesse du vent, surcharge de givre ou de neige) ou sous l'effet d'efforts électrodynamiques provoqués par un défaut.

La détermination de la géométrie de la ligne est essentiellement régie par le souci isolement est de ce fait doit satisfaire à la condition suivant:

- ✓ Distances verticales au-dessus du sol des constructions et des voies de circulation ;
- ✓ Distances aux obstacles latéraux ;
- ✓ Distances aux autres lignes aériennes.

La géométrie des faisceaux et le nombre de conducteurs et leurs diamètres liée à:

- ✓ La puissance transportée ;
- ✓ Les pertes couronne et bruits radioélectriques.

La figure (3.16) montre quatre différentes configurations de lignes de transmission, en nappe vertical, en delta et en delta inversé. Pour une comparaison rigoureuse du champ électrique, les lignes ont le même degré de compactage, la même tension, le même courant par conducteur.

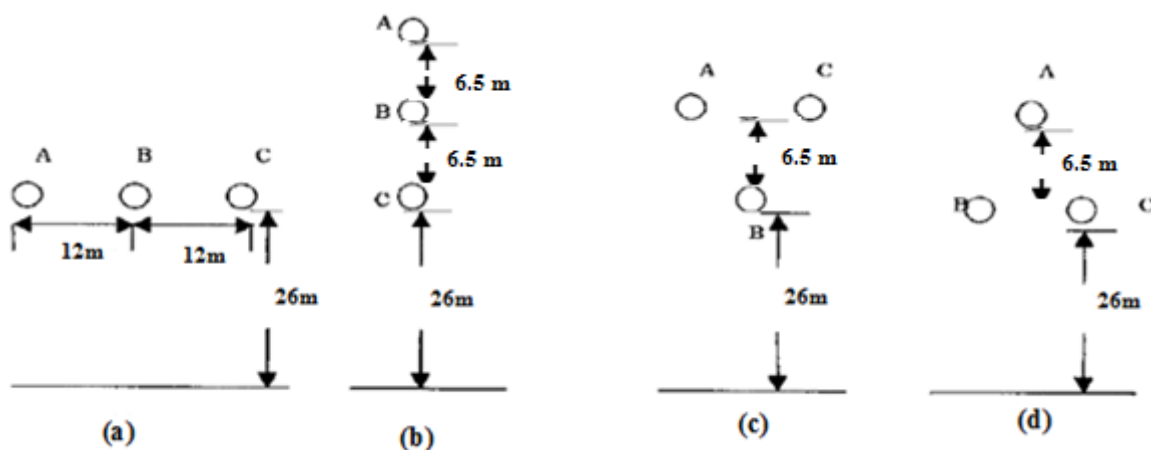


Figure 3.16 : Configurations de lignes de transmission; (a) en nappe horizontale, (b) en nappe verticale, (d) en delta et (c) en delta Inversé.

3.6.1 - Effets de la géométrie de la ligne sur le champ électrique

Les profils latéraux du champ électrique des quatre systèmes, calculés à 1 m de hauteur au-dessus du sol, sont présentés dans la figure 3.17. Il ressort clairement de cette figure que la configuration en delta cause la plus grande valeur du champ électrique tandis que la configuration en nappe vertical a la plus faible valeur avec une valeur maximale de 0.99 kv/m au centre de la ligne. Les valeurs maximales du champ électrique pour la configuration en delta, en nappe horizontale, en delta inversé et en nappe verticales sont respectivement 1.6, 1.52, 1.09 et 0.98kv/m.

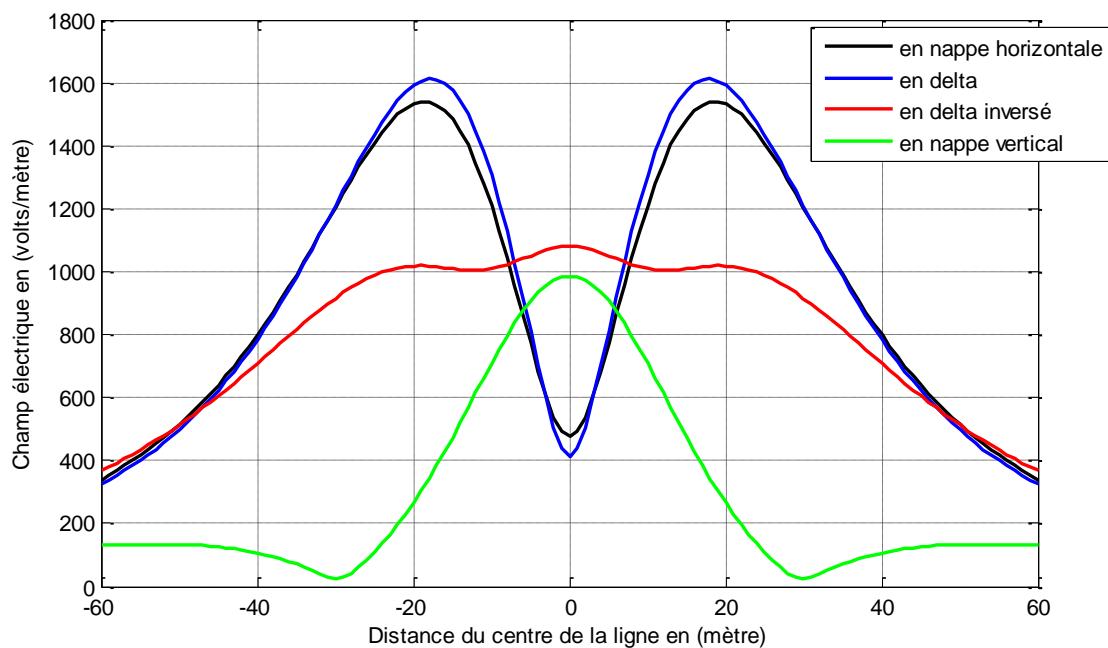


Figure 3.17 : Champ électrique pour les quatre configurations

3.6.2 - Effets de la géométrie de la ligne sur le champ magnétique

Les profils latéraux du champ magnétique des quatre systèmes, calculés à 1 m de hauteur au-dessus du sol, sont présentés dans la Figure (3.18). Plus grande valeur du champ magnétique tandis que la configuration en nappe vertical a la plus faible valeur avec une valeur maximale de 1.66 μT au centre de la ligne qui correspond à un courant de 700 ampères. Les valeurs maximales du champ sous le centre de la ligne pour la configuration en nappe horizontale, en delta, en delta inversé et en nappe verticales sont respectivement : 3.9, 3.7, 3.1 et 1.66 μT .

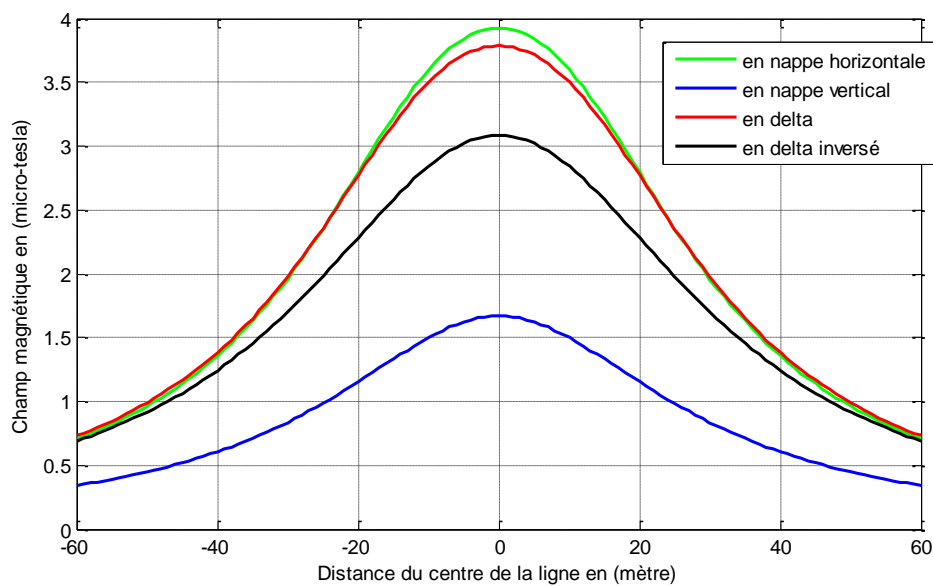


Figure 3.18 : Profils du champ magnétique pour les configurations de lignes : en nappe, vertical, en delta et en delta inversé

3.7 - Estimation de l'exposition aux champs électromagnétiques 50 Hz

Une modélisation analytique a été effectuée sur plusieurs niveaux les plus sensibles du corps humain figure 3.19, niveau 0m, niveau 1m, niveau 1.5m et niveau 1.8m représentant respectivement les contacts des pieds avec le sol, l'endroit de la sexualité et le fœtus d'une femme enceinte, le système cardiaque et des implants médicaux (stimulateurs cardiaques, défibrillateurs ... etc.), le dernier niveau est le cerveau et les implants cochléaires.

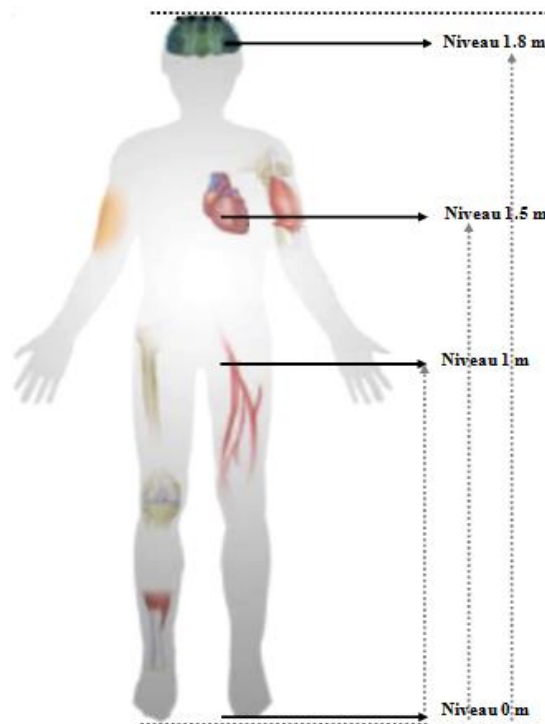


Figure 3.19 : niveaux sensibles du corps humain

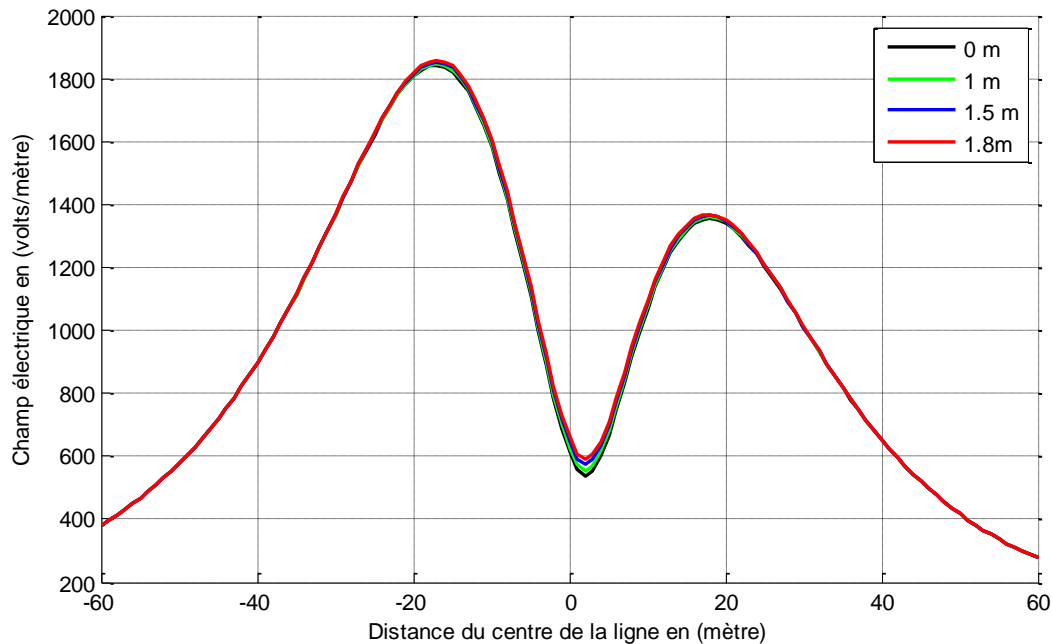


Figure 3.20 : Profils du Champs électrique généré par une ligne 400 kV aux quatre niveaux les plus sensibles du corps humain

3.7.1 Méthodes numériques en électromagnétisme

De nos jours, la grande utilisation de systèmes électriques et électroniques rend impérative la compréhension des phénomènes relatifs aux interactions électromagnétiques mutuelles de tels systèmes.

Ces dernières années, les outils de simulation numérique sont utilisés intensivement dans la résolution des problèmes en compatibilité électromagnétique. Pour les applications en régime transitoire, la technique la plus répandue est la méthode des différences finies dans le domaine du temps FDTD. Cependant, sous sa forme conventionnelle, la FDTD utilise une grille de discrétisation spatiale cartésienne et uniforme par nature, avec l'inconvénient de représenter les frontières en marches d'escalier.

Cela entraîne un alourdissement du traitement numérique si la méthode doit être appliquée à des géométries courbes ou possédantes des détails fins. La méthode des éléments finis EF, par contre, permet la modélisation des structures de géométries complexes et pouvant inclure des milieux hétérogènes. Plusieurs méthodes de simulation numérique existent; parmi ces méthodes les plus utilisées dans le monde de la simulation et de la modélisation des systèmes en électromagnétisme on trouve:

- La méthode des éléments finis.
- La méthode des différences finies dans le domaine temporel.
- La méthode des impédances.
- La méthode des différences finies.

3.7.2.Méthode des éléments finis (FEM)

La méthode des éléments finis [DTL, 2005] est un outil de résolution numérique des systèmes physiques. Elle nécessite l'utilisation intensive de l'ordinateur. C'est une méthode à multi-usages, elle peut résoudre la majorité des problèmes rencontrés dans la modélisation des systèmes quelconques: linéaires ou non linéaires, stationnaires ou non stationnaires et elle peut résoudre les problèmes en une dimension, deux dimensions ou trois dimensions. En plus la méthode des éléments finis est l'une des méthodes pouvant résoudre les problèmes compliqués comme par exemple les simulations sur les milieux hétérogènes, l'application du maillage dépend de la taille de chaque élément constituant le système. La figure3.10 résume une résolution numérique d'un système physique par la méthode EF.

Chapitre 3: Modelisation theorique des champs electromagnetiques sous une ligne électrique haute tension

La méthode des éléments finis consiste à utiliser une approximation simple des variables inconnues pour transformer les équations aux dérivées partielles en équation algébriques. Elle fait appel aux trois domaines suivants:

- Sciences de l'ingénieur pour construire les équations aux dérivées partielles.
- Méthodes numériques pour construire et résoudre les équations algébriques.
- Programmation et information pour exécuter efficacement les calculs sur l'ordinateur.

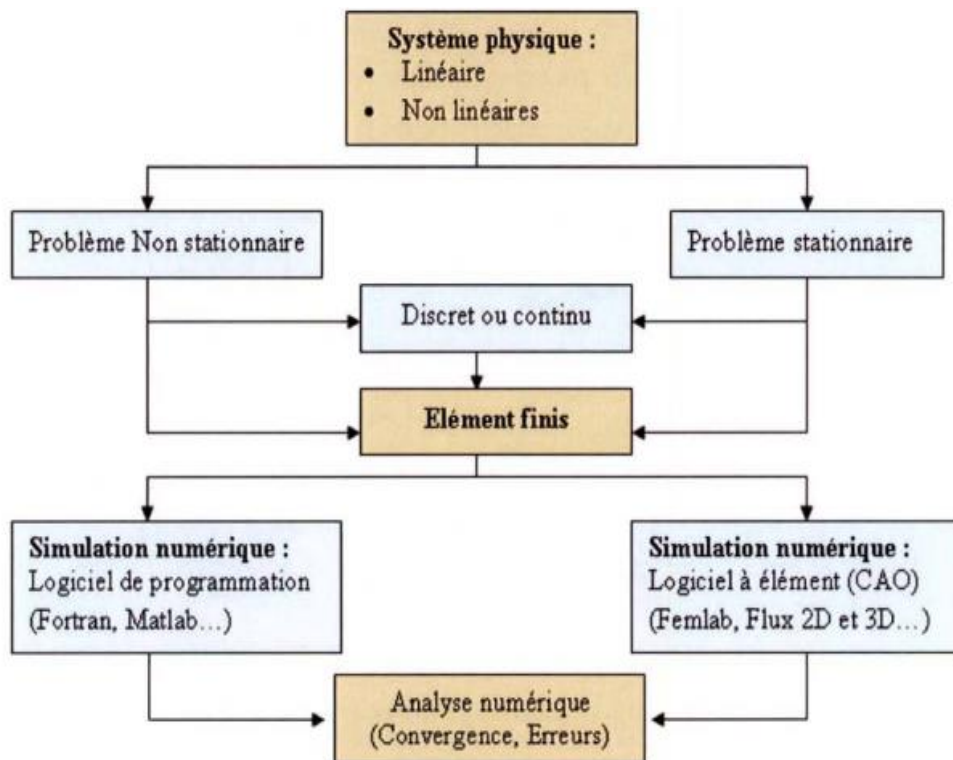


Figure 3.11 Description de la méthode- résolution d'un système physique par EF.

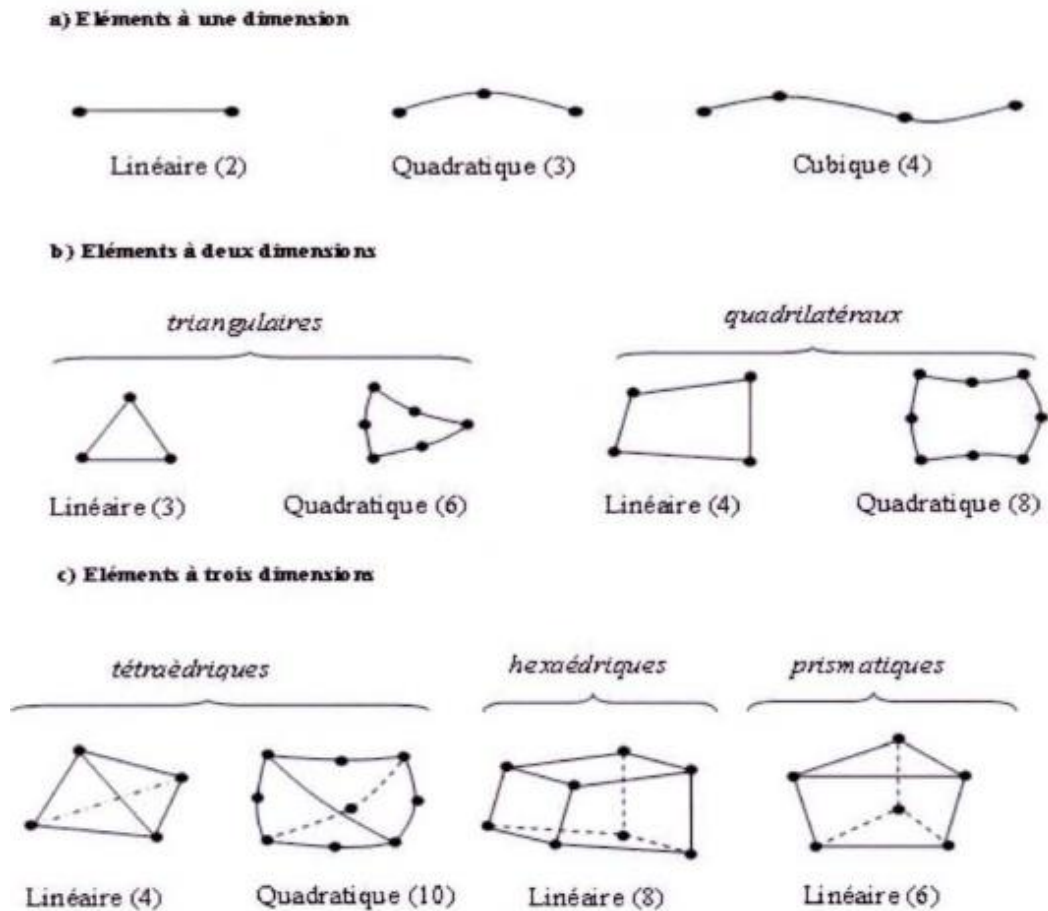
➤ Le maillage

L'opération de maillage consiste à discrétiser le domaine Q en sous domaines Q_i et chaque sous domaine en maille élémentaire. Actuellement avec le développement électronique, le maillage ou la discrétisation du domaine se fait par des logiciels très performants appliquant la méthode des éléments finis, parmi eux: Flux 3D, COMSOL-MULTIPHYSICS. Etc. Ces logiciels disposent de 3 sortes de mailles :

- **Les mailles linéiques :** Elles servent à mailler une courbe qui peut représenter le domaine linéique Ω ou une section méridienne d'un domaine surfacique Ω axisymétrique.
- **Les mailles surfaciques :** Elles servent à mailler une surface qui peut représenter le domaine surfacique Ω ou une section méridienne d'un domaine volumique Ω .
- **Les mailles volumiques:** Dans ce cas les mailles sont des volumes.

La Figure (3.11) ci-dessous présente les différents cas du maillage.

Chapitre 3: Modelisation theorique des champs electromagnetiques sous une ligne électrique haute tension



Figur3.11 Différents igcas du maillage.

➤ Logiciel d'éléments finis :

Dans notre étude le logiciel de simulation utilisé est COMSOL-MULTIPHYSICS, ce logiciel permet de faire des simulations en ID, 2D et 3D, avec une grande facilité d'utilisation, une bonne précision et un usage dans de nombreux domaines, dans la mécanique l'électronique et l'électrotechnique, la chimie, l'électromagnétisme. Etc. Il faut choisir le module dès le début (dans notre cas Electrostatique et magnétostatique module) (Figure3.10).

Chapitre 3: Modelisation theorique des champs electromagnetiques sous une ligne électrique haute tension

Après avoir tracé le modèle sous forme d'un domaine, le maillage appliqué par ce logiciel se fait automatiquement, il prend en compte les dimensions de différents sous-domaines du modèle. En plus il est possible d'augmenter le nombre des mailles globalement ou bien pour chaque sous-domaine constituant le modèle. Il est possible aussi de choisir la dimension de la maille pour chaque sous-domaine.

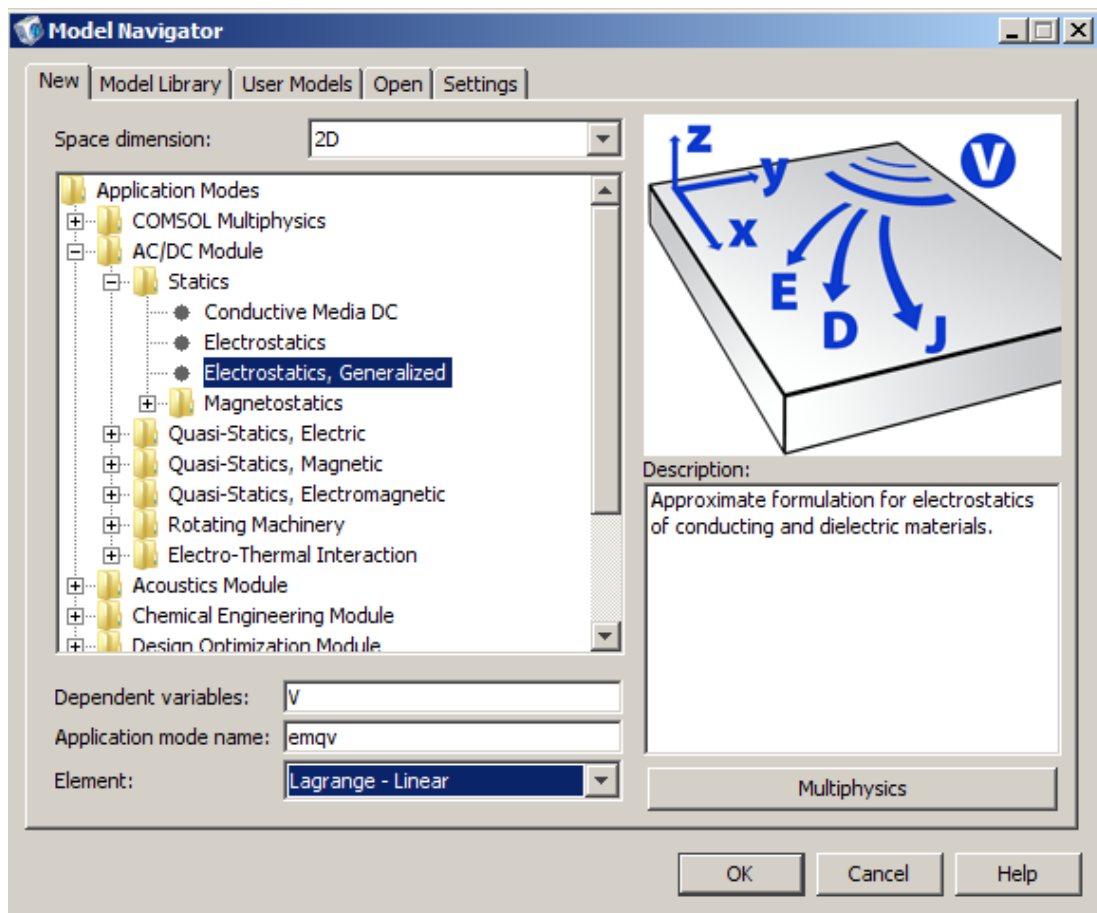


Figure 3.12 logiciel d'éléments finis.

➤ Interface graphique et visualisation :

COMSOL- MULTIPHYSICS intègre des outils de visualisation pour développer la présentation d'un modèle sous tous les angles avec possibilité de rotation à l'écran directement. D'autres outils d'aide comme la sélection de domaines pour des zooms. etc.

COMSOL- MULTIPHYSICS permet de représenter graphiquement de plusieurs manières (par des vecteurs proportionnels, contour, répartition surfacique en 2D et 3D, courbes etc.). Il est également possible de faire des animations qui permettent de visualiser les phénomènes des différentes variables: champ électrique, champ magnétique, la densité de courant...etc. Nous présentons dans la figure 3.13 ci-dessous quelques illustrations d'une simulation par le logiciel COMSOL-MULTOPHYSICS [Prado, 2006].

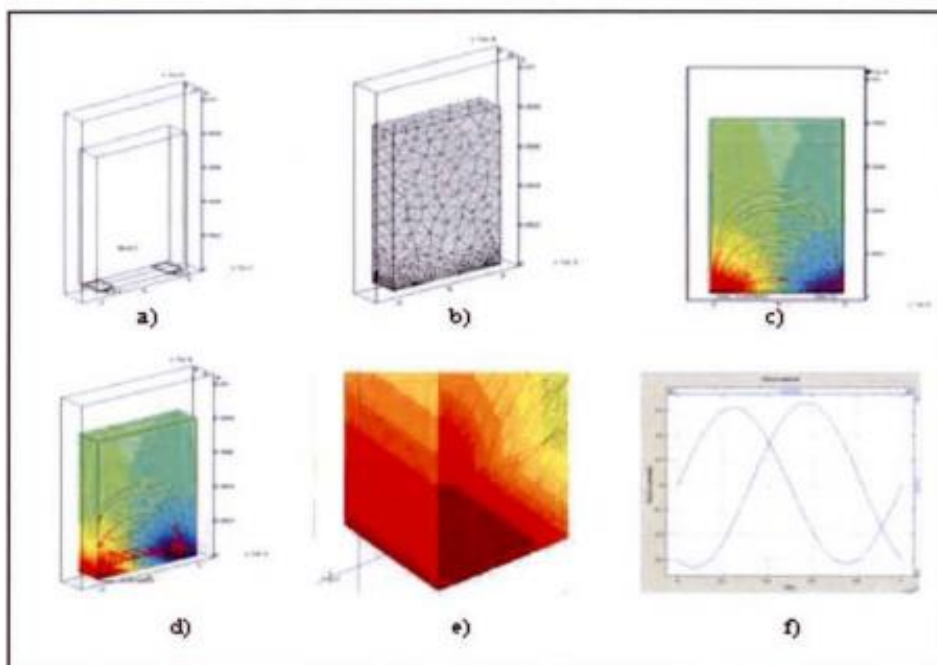


Figure3.13 Présentation du logiciel: a) Géométrie du modèle, b) Application du Maillage, c) simulation en 2D, d) simulation en 3D, e) Application Zoom, t) Résultat sous forme de courbe.

3.8. Formulation numérique (Élément finis)

L'analyse des équations de Maxwell dans le régime stationnaire révèle que le champ électrique et le champ magnétique sont presque mutuellement indépendants. Cela veut dire que le couplage peut être considéré séparément, de sorte que :

$$\nabla \times \mathbf{E} = \mathbf{0} \quad (3.13)$$

$$\nabla \times \mathbf{H} = \mathbf{J} \quad (3.14)$$

Où E, H et J sont respectivement le champ électrique, le champ magnétique et la densité du courant.

Les étapes de calculs sont décrit dans l'organigramme suivant:

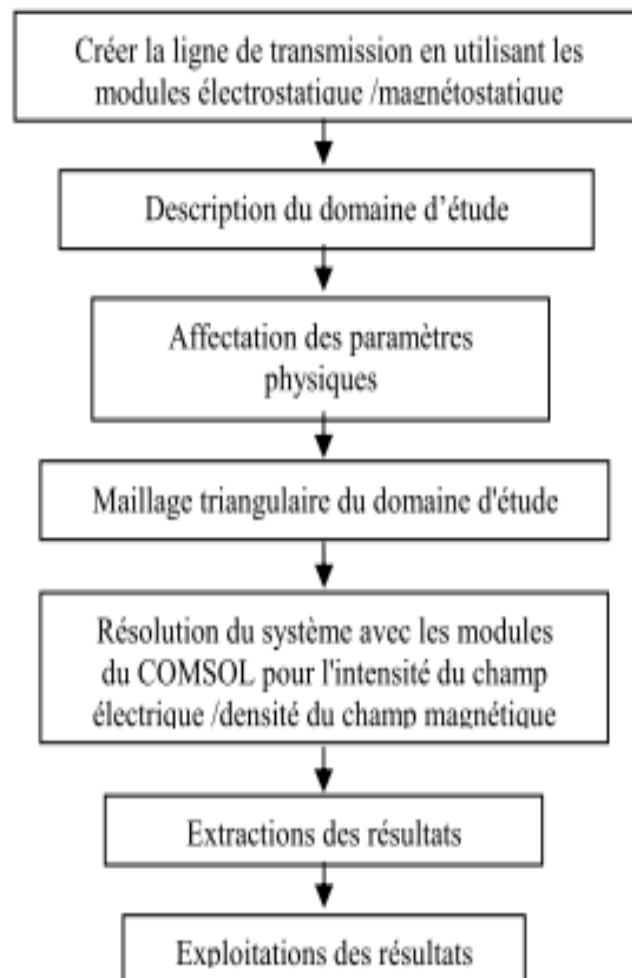


Figure3.14 Organigramme de calcul.

Pour valider ce code, une étude comparative entre les résultats expérimentaux et les résultats obtenus on utilisant la méthode de calcul développé a été effectué.

3.9..Simulation numérique

3.9 .1. Procédé de calcul du champ électrique à l'aide des éléments finis

La structure géométrique qui fera l'objet d'études est représentée par le domaine de résolution de la figure (3.22).

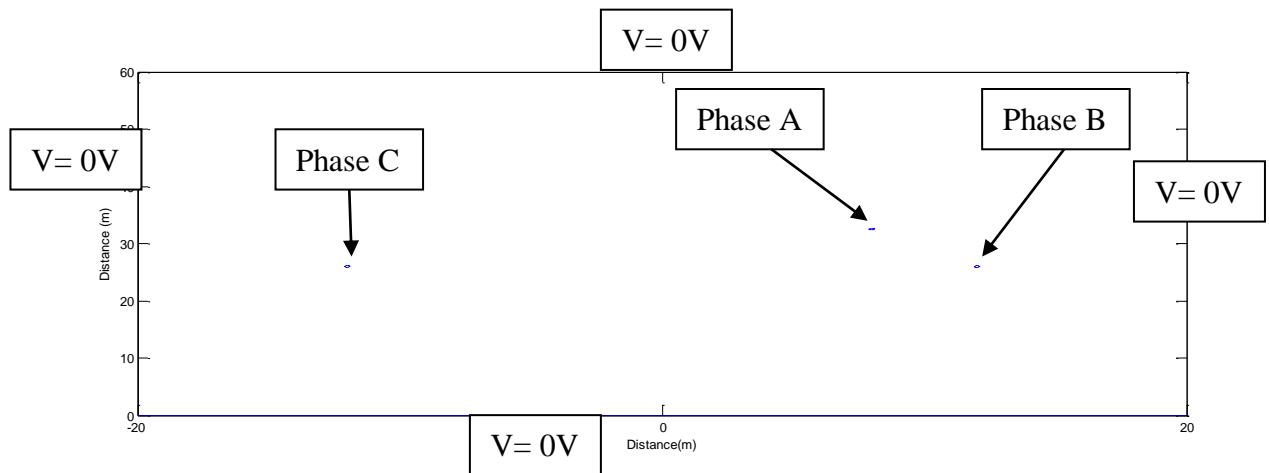


Figure 3.22 : Zoom du domaine d'étude

➤ **Définition des conditions aux limites**

Les conditions aux limite associées au domaine d'étude son telles que :

- Condition Dirichlet $V= 0V$ sur l'infini
- Condition Dirichlet $V= 400 KV$ sur la phase A
- Condition Dirichlet $V= 400(-0.5+j\frac{\sqrt{3}}{2}) KV$ sur la phase B
- Condition Dirichlet $V= 400(-0.5-j\frac{\sqrt{3}}{2}) KV$ sur la phase C

➤ 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 3.23.

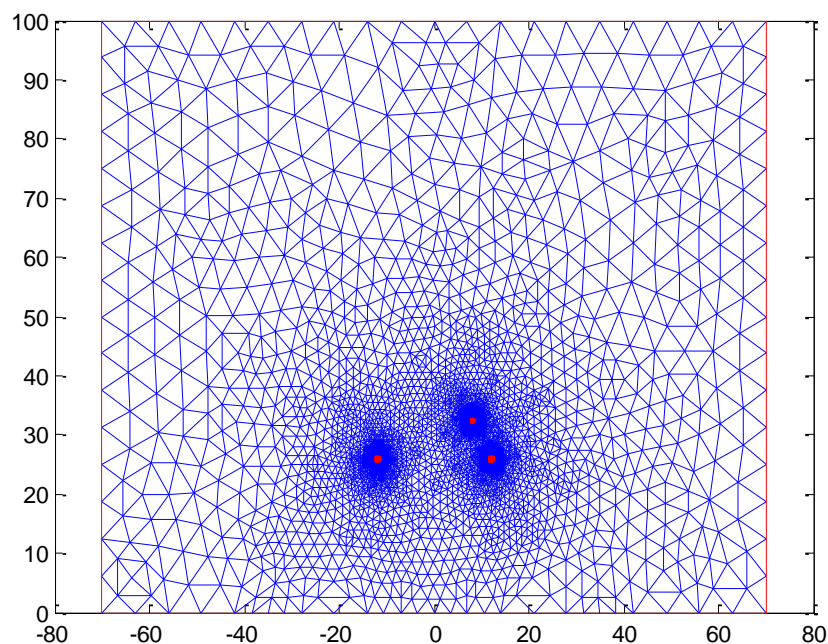


Figure 3.23 : Maillage du domaine d'études

3.9.1.2 Cas d'une seule ligne 220 kV

Nous avons appliqué le code sur la ligne 220 kV étudié précédemment d'une façon analytique. Les champs électromagnétiques ont été calculés à plusieurs niveaux au-dessus de sol. Les Figures 3.23, 2.24, 3.25 et 3.26 montrent les profils de champ électrique et magnétique au voisinage de cette ligne.

Chapitre 3: Modelisation theorique des champs electromagnetiques sous une ligne electrique haute tension

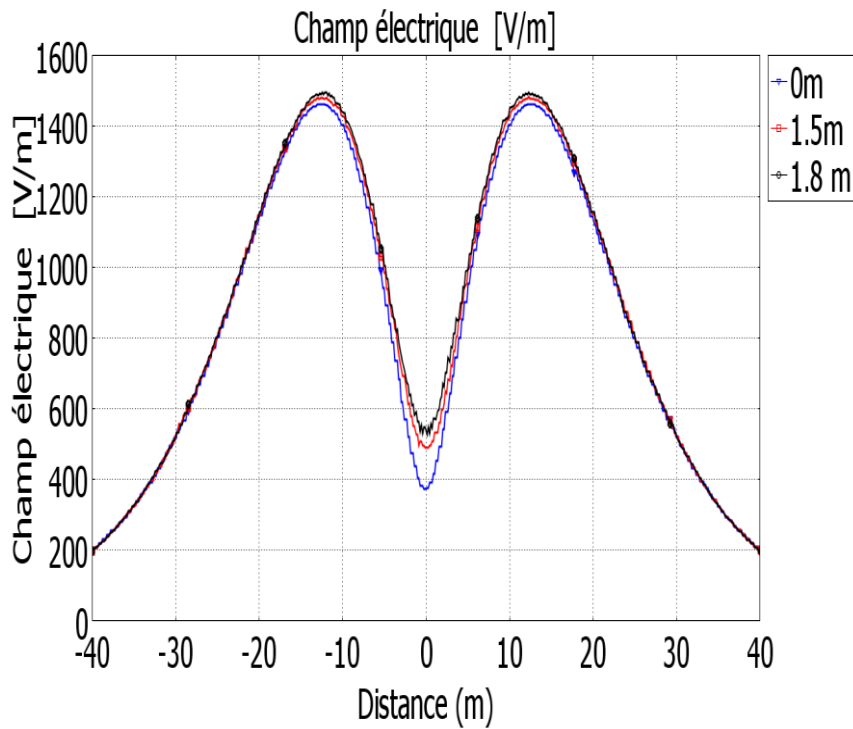


Figure3.23 Profils de champ électrique à 0m, 1.5m et 1.8m au-dessus de sol

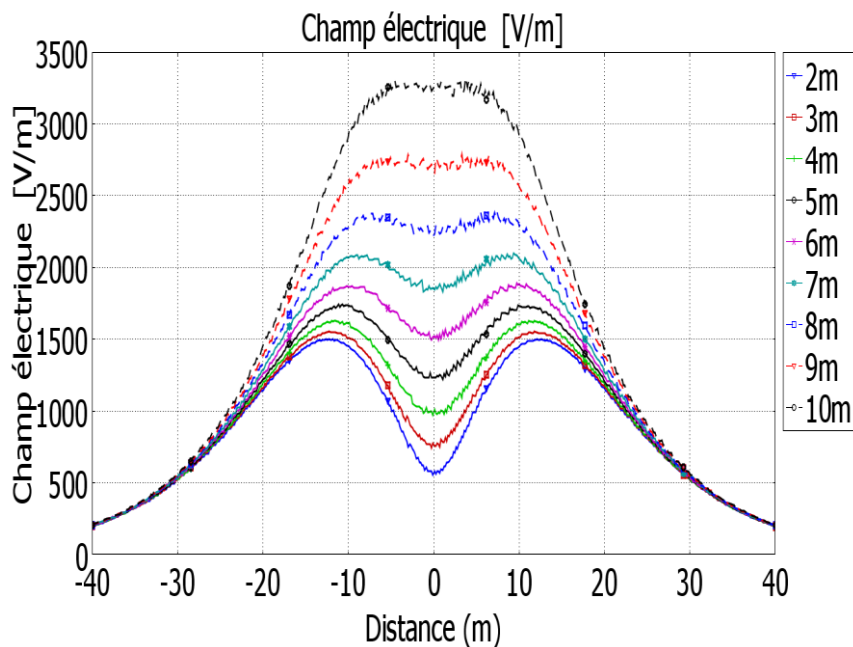


Figure3.24 Profils de champ électrique entre 2 à 10m au-dessus de sol

Chapitre 3: Modelisation theorique des champs electromagnetiques sous une ligne electrique haute tension

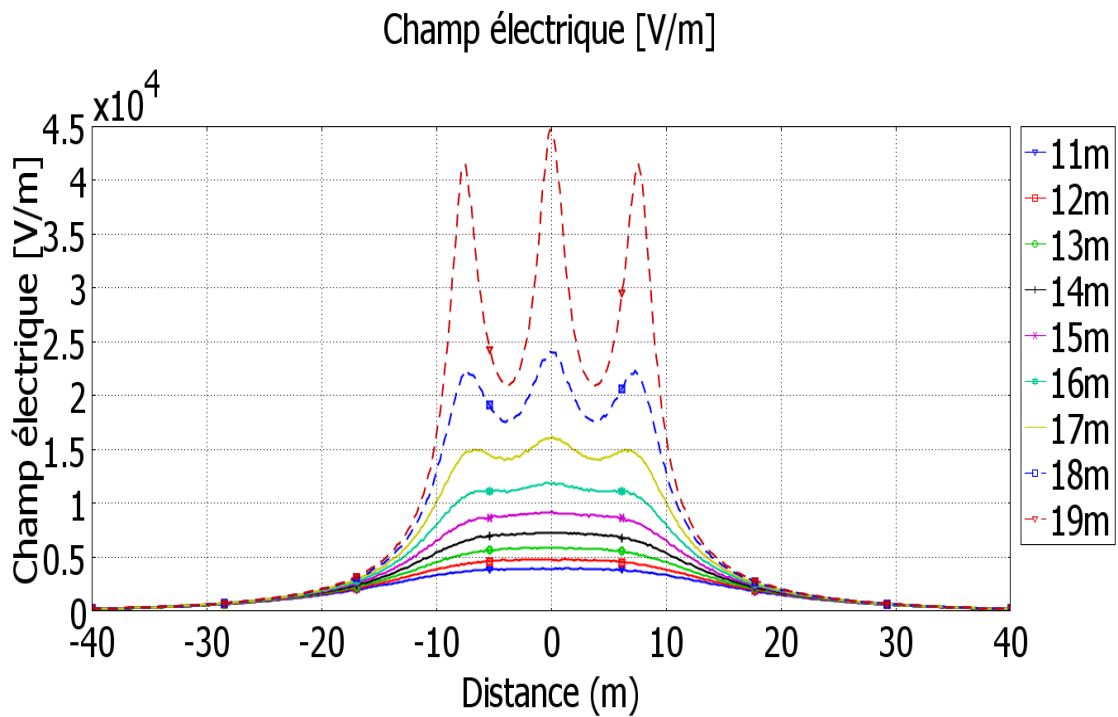


Figure 3.25 Profils de champ électrique entre 11 à 19m au-dessus de sol

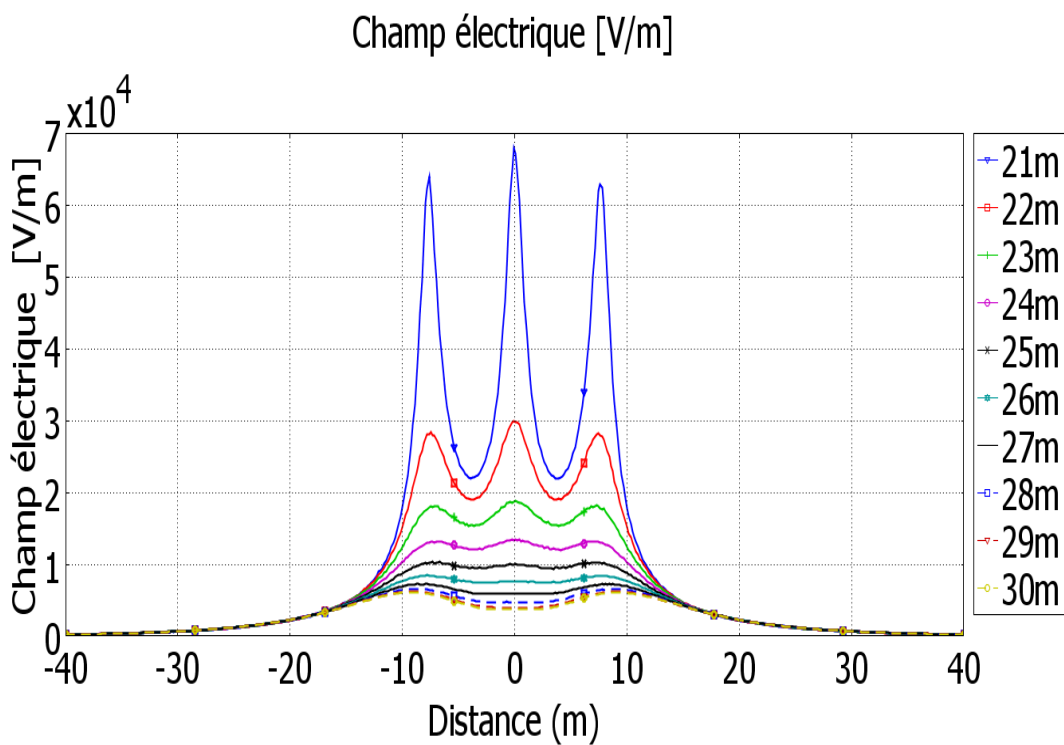


Figure 3.26 Profils de champ électrique entre 21 à 30m au-dessus de sol

Chapitre 3: Modelisation theorique des champs electromagnetiques sous une ligne électrique haute tension

D'après ces courbes nous pouvons remarquer que le champ électrique augmente au fur et à mesure qu'on s'approche des conducteurs de la ligne et diminue lorsque on s'éloigne de ces derniers. Les valeurs du champ au voisinage du sol sont suffisamment inférieures aux limites établies, par contre et pour les autres niveaux au-dessus du sol, les intensités des champs sont très importantes. Ces valeurs ont un sens dans le cas d'exposition d'un ouvrier travaillant sur une ligne aérienne sous tension ainsi que dans le cas des lignes qui se trouvent à proximité des bâtiments. La même stratégie a été faite pour évaluer le champ magnétique généré par cette ligne.

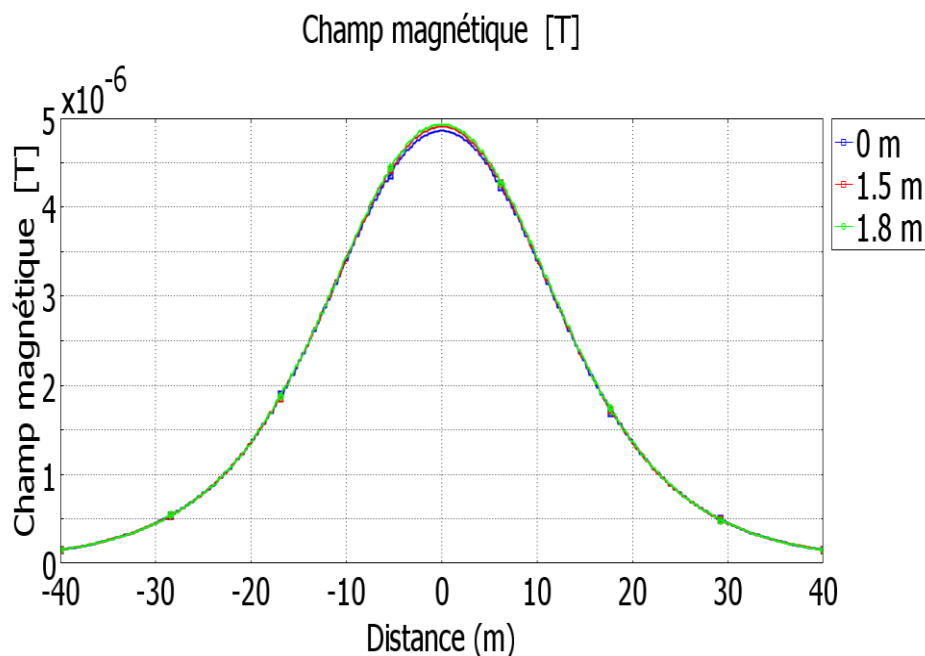


Figure 3.27 Profils de champ magnétique à 0m, 1.5m et 1.8m au-dessus du sol

Chapitre 3: Modelisation theorique des champs electromagnetiques sous une ligne electrique haute tension

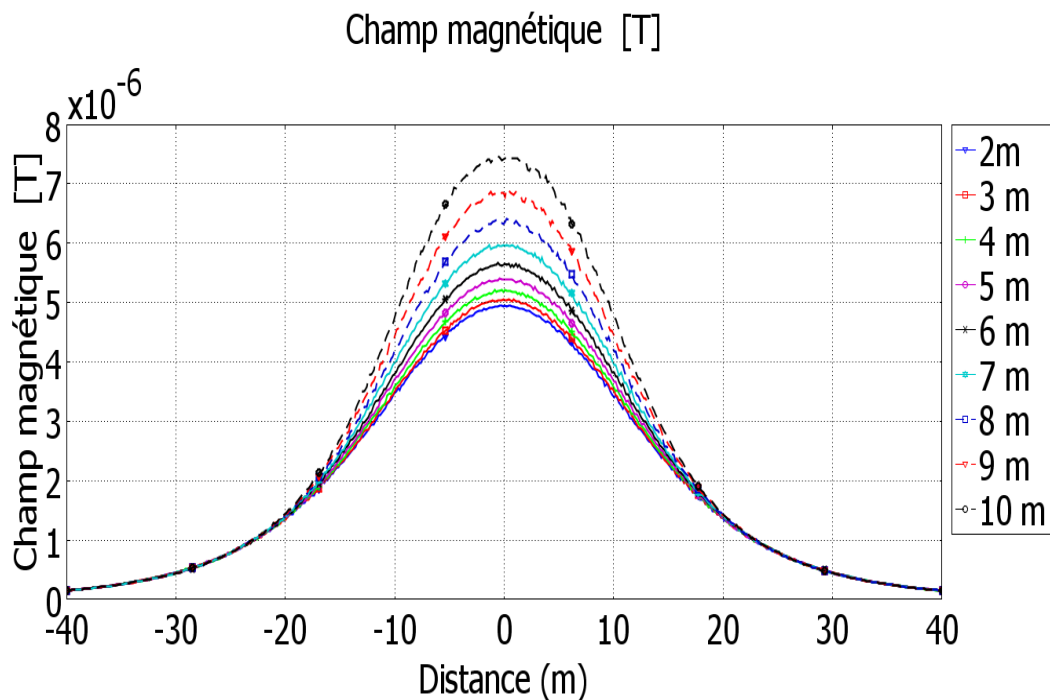


Figure3.28 Profils de champ magnétique de 2 à 10m au-dessus de sol

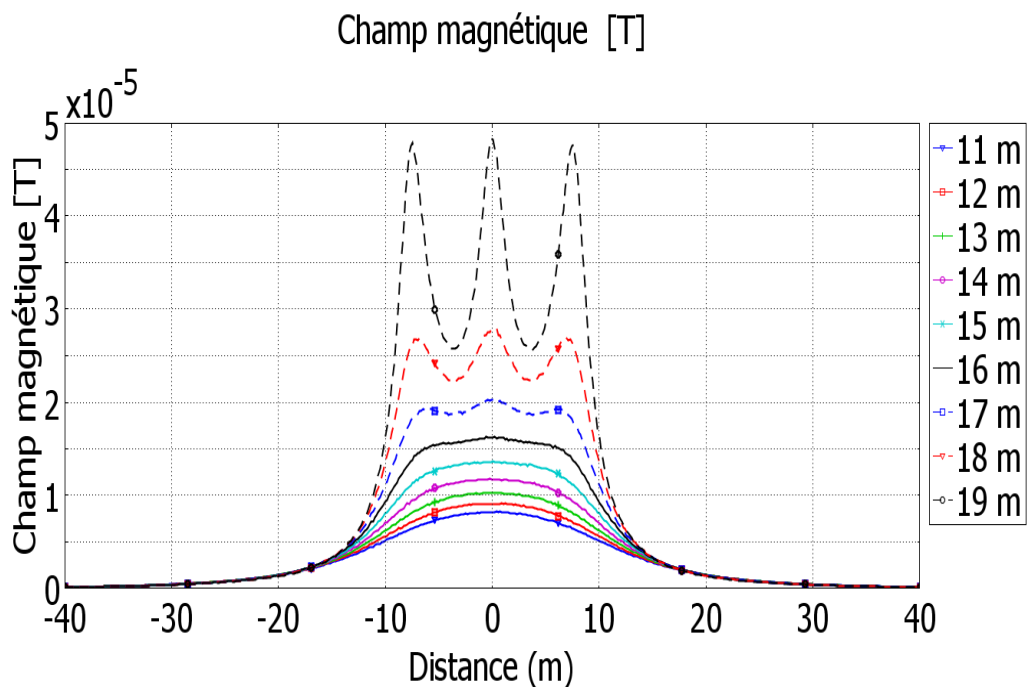


Figure3.29 Profils de champ magnétique de 11 à 19m au-dessus de sol

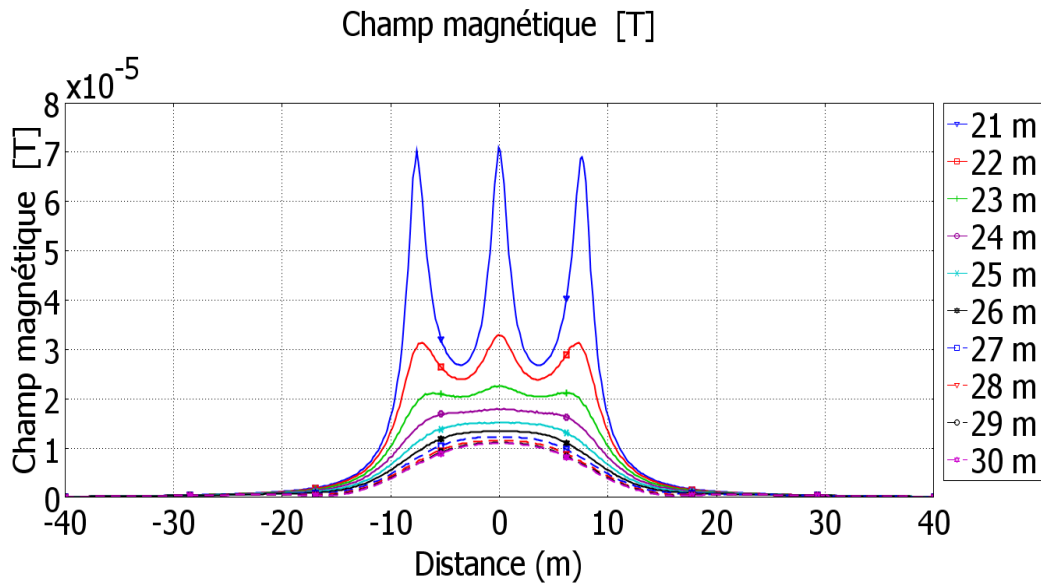


Figure3.30 Profils de champ magnétique de 21 à 30m au-dessus de sol

Les valeurs du champ magnétique augmentent aussi lorsqu'on s'approche des conducteurs de la ligne. Les intensités de champ magnétique (pour un courant $I=270$ A) au-dessus du sol sont presque négligeables par rapport aux limites établies. Nous avons enregistré des valeurs plus sévères pour les autres niveaux au-dessus du sol.

3.9.1.3. Influences des paramètres électriques et géométriques sur la distribution de champ électromagnétique:

A. Influence de paramètres physique :

➤ Impact de la tension sur la distribution de champ électrique :

Nous avons gardé la même géométrie de la ligne étudiée précédemment en variant la tension. La figure 3.25 montre les profils de champ électrique au niveau du sol pour trois différents niveaux de tension (220 kV, 90 kV, 60 kV).

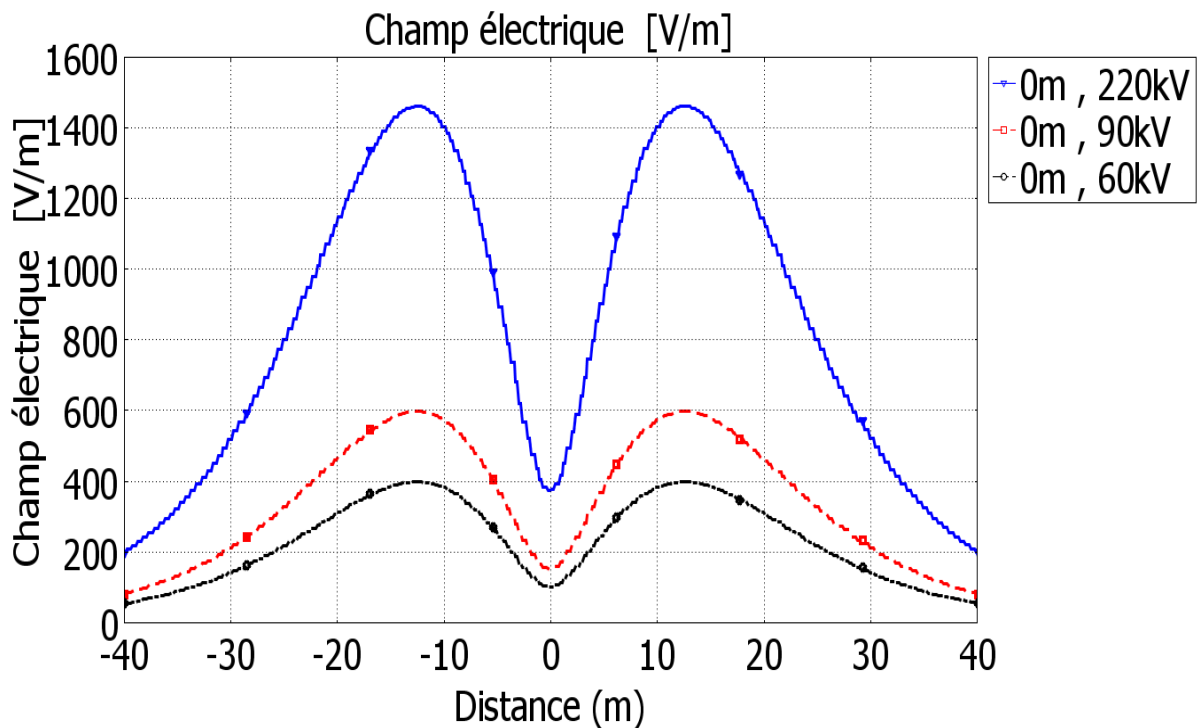


Figure 3.31 Influence de la tension sur la distribution du champ électrique.

Les valeurs du champ électrique augmentent avec l'augmentation de la tension de la ligne. A partir de ces résultats, la différence entre la valeur maximale de champ électrique entre une ligne de 220 kV et celle de 60 kV qui possèdent la même géométrie est de 56 %.

➤ **Impact de courant sur la distribution de champ magnétique :**

Les courants dans les lignes hautes tension sont variables au-cour des temps car ils dépendent de la charge. Généralement, les valeurs maximales des courants ont obtenu dans les heures de pointes. la relation entre le courant et le champ magnétique est connue à partir de la loi d'ampère (le champ magnétique augmente avec l'augmentation de courant)[]. nous avons confirmé cette relation on variant les niveaux des courants de la ligne (Fig3.32).

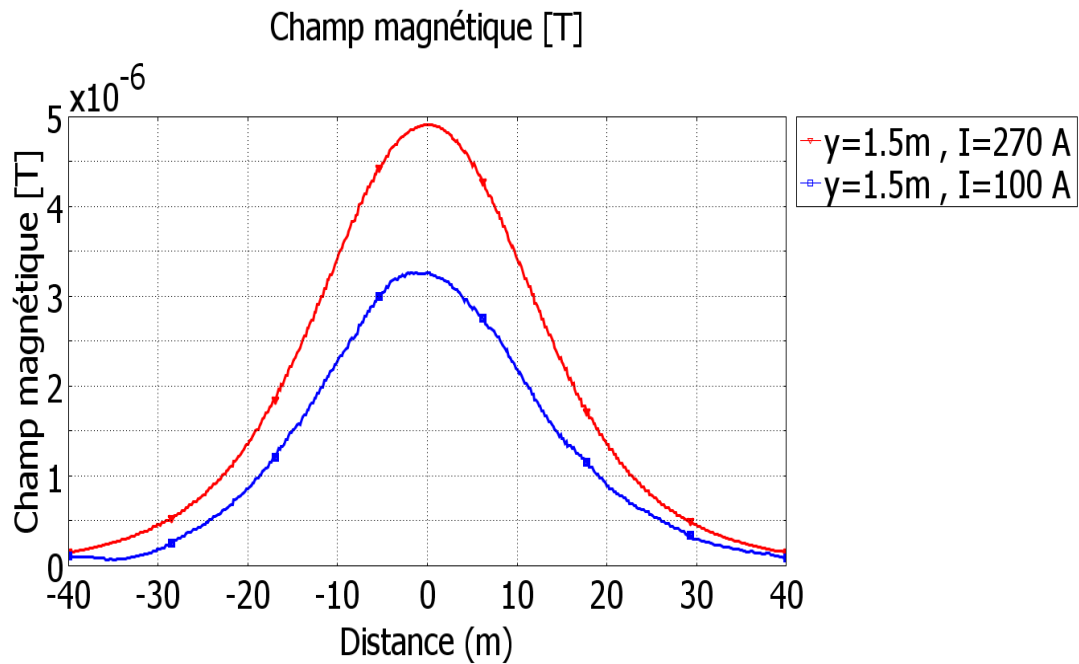


Figure3.32 Influence des courants dans les phases sur distribution du champ magnétique.

Pour les deux cas étudié ($I=270\text{ A}$, $I=100\text{ A}$), l'augmentation de champ magnétique généré par la ligne est de l'ordre de 30 %.

3.9.2.4 Influence de la géométrie de la ligne

➤ configuration de phase

La Figure (3. 33) présente les profils des champs électriques obtenus au niveau des sols pour trois configurations différents des lignes qui possèdent la même tension (220 kV).Les lignes étudié sont des modèles réels utilisé par SONELGAZ.

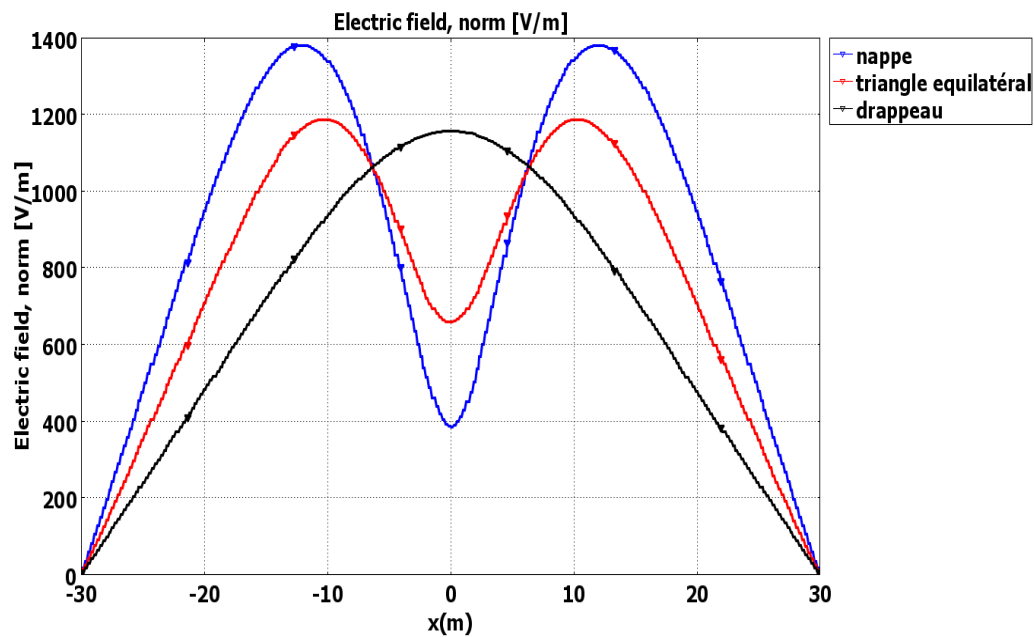


Figure 3.33 Influence de la disposition de phases sur la distribution du champ électrique.

La valeur maximale (1,4 kV /m) de champ électrique est générée par la ligne dont la configuration est en nappe, au fur et à mesure qu'on s'éloigne de la ligne le champ électrique de la ligne en drapeaux diminue plus rapidement que ce des deux autres configurations.

3.10. Cas de deux lignes 220 kV parallèles :

La même stratégie a été utilisée pour calculer les champs générés par un modèle de deux lignes 220 kV parallèles (Fig 3.34) qui possèdent la même géométrie. Les deux lignes ont été assemblées dans le même domaine d'étude gardant les mêmes conditions aux limites présentées dans les figures (3.17 et 3.18.)

Chapitre 3: Modelisation theorique des champs electromagnetiques sous une ligne electrique haute tension

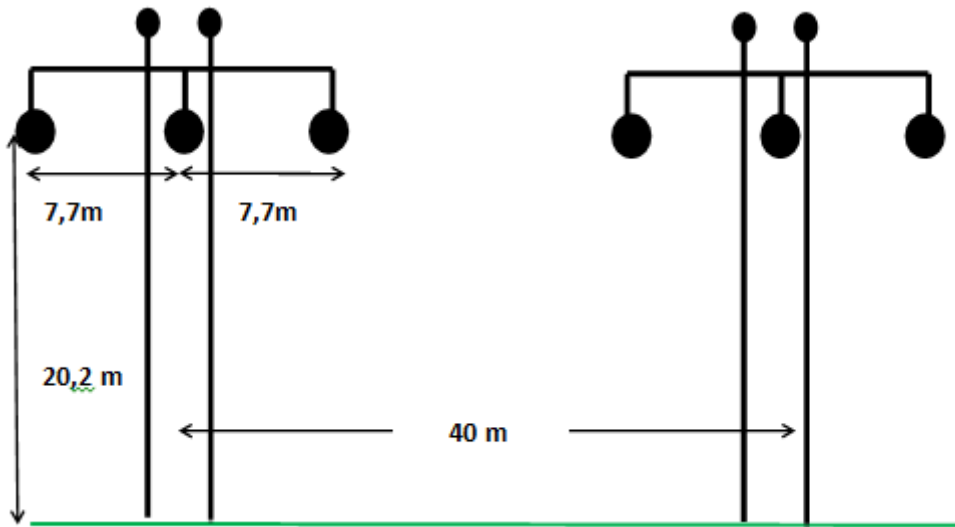


Figure 3. 34 Modèle de deux lignes haute tension 220kV parallèle

➤ Résultats de simulation :

Les Figures 3.35, 3.36, 3.37, 3.38 et 3.39, 3.40, 3.41, 3.42 présentent les profils du champ électrique et magnétique générée par ces deux lignes respectivement.

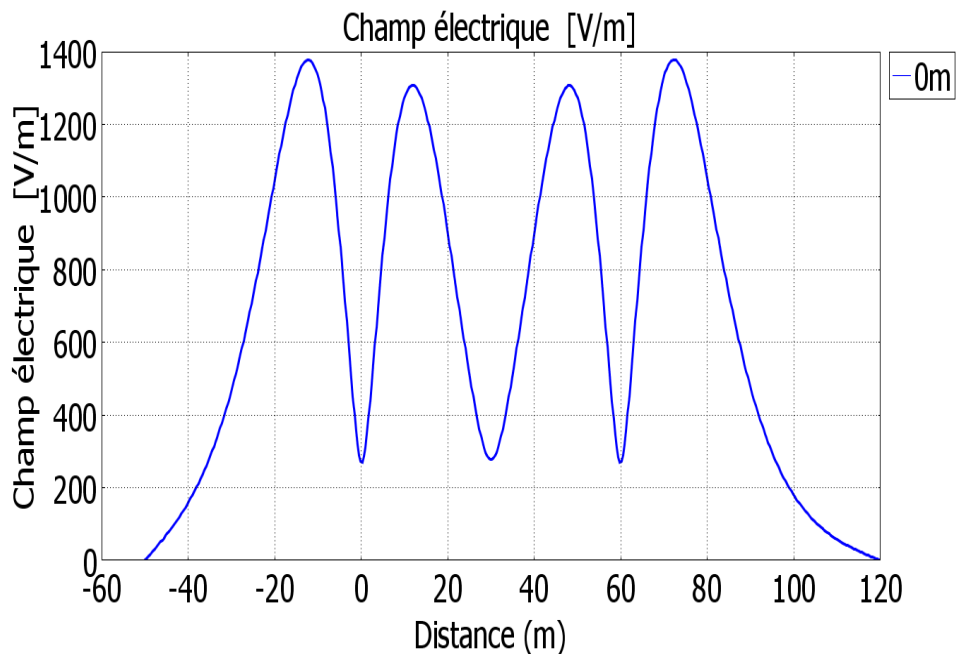


Figure3.35 Profils du champ électrique au niveau du sol

Chapitre 3: Modelisation theorique des champs electromagnetiques sous une ligne electrique haute tension

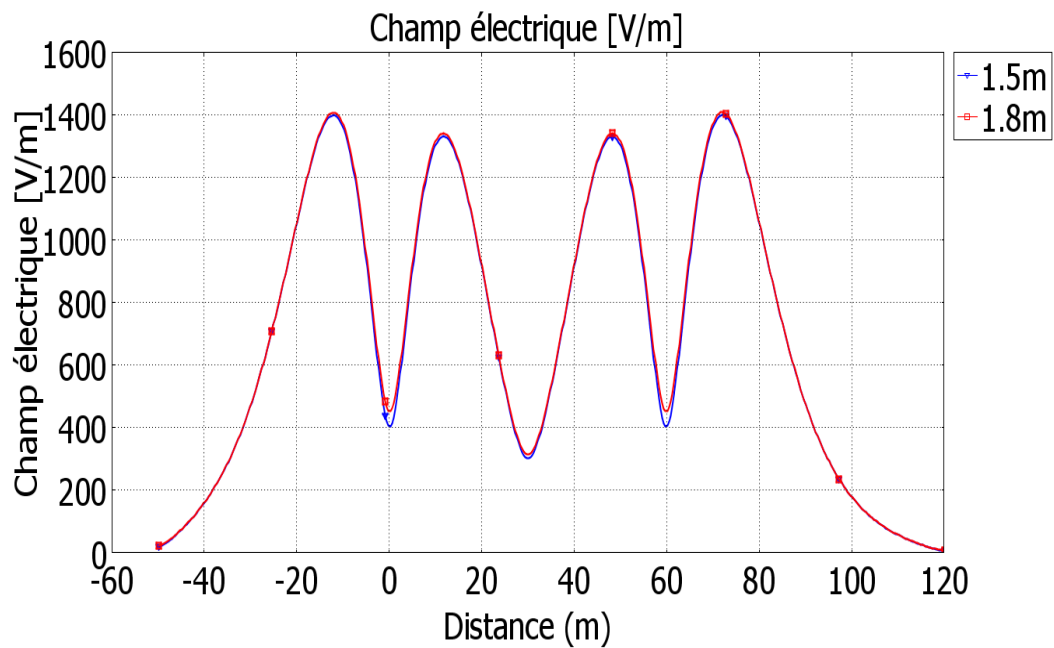


Figure 3.36 Profils du champ électrique à 1.5m et 1.8m au-dessus du sol

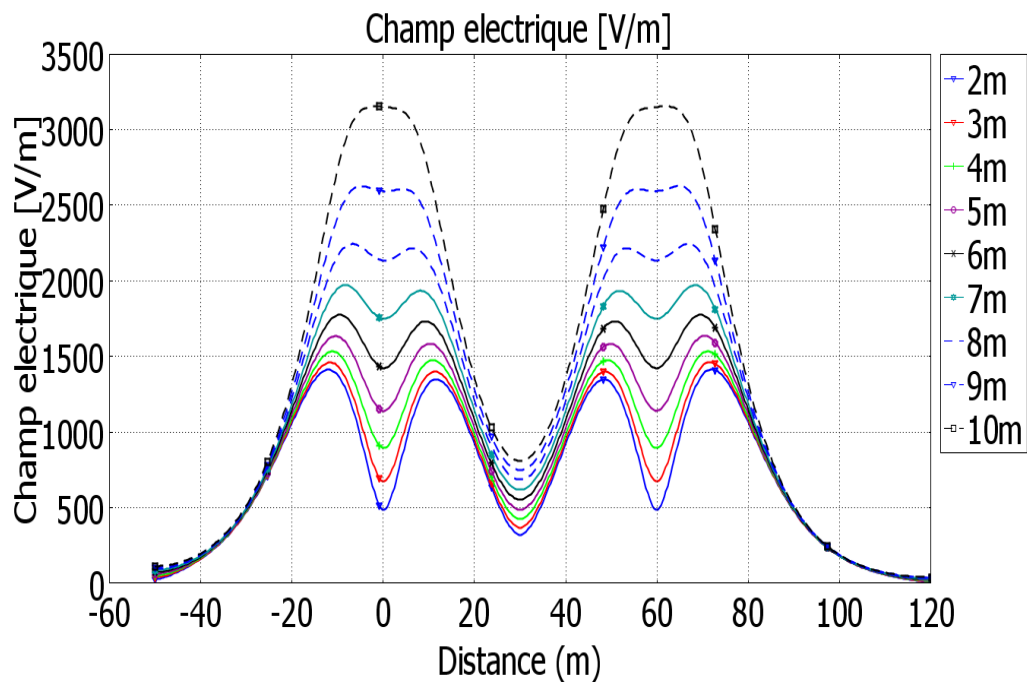


Figure 3.37 Profils du champ électrique de 2 à 10m au-dessus du sol

Chapitre 3: Modelisation theorique des champs electromagnetiques sous une ligne électrique haute tension

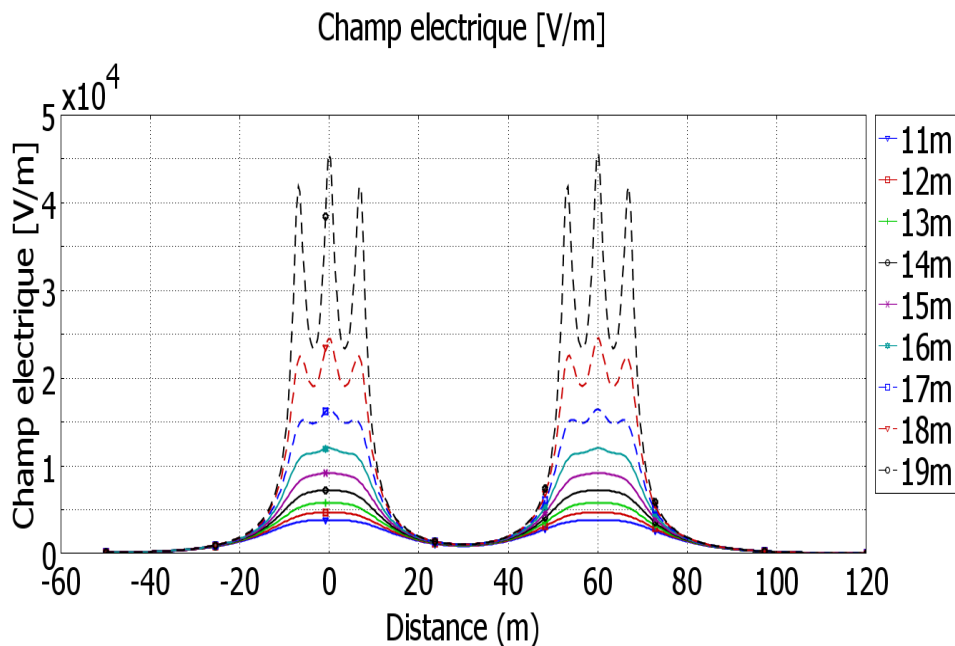


Figure3.38 Profils du champ électrique de 11 à 19m au-dessus du sol

Nous observons que les plus grandes intensités de champ électrique sont concentrées dans les zones proches des conducteurs des deux lignes et les valeurs minimales sont trouvées dans la zone entre les deux lignes parallèles. Nous pouvons considérer cette zone comme une zone de couplage entre les deux lignes voisine d'où se couplage est proportionnel à la distance par rapport à la source (les conducteurs des deux lignes haute tension). Pour l'exposition d'un être humain en contact parfait avec le sol (dans le cas où l'être humain « se promène ou de sous ou à proximité d'une ligne haute tension), les valeurs des champs sont inférieures aux limites établies par les normes (5kV/m). Cependant dans les métiers de l'électricité il peut arriver que des ouvriers se trouvent à des distances rapprochées des lignes haute tension. La même chose concernant le champ magnétique sauf que ces valeurs pour un courant de 270A restent loin des limites établies par les normes internationales pour les niveaux proches du sol. Pour les autres niveaux (proches des conducteurs) les valeurs sont énormes en comparaison avec les normes.

Chapitre 3: Modelisation theorique des champs electromagnetiques sous une ligne electrique haute tension

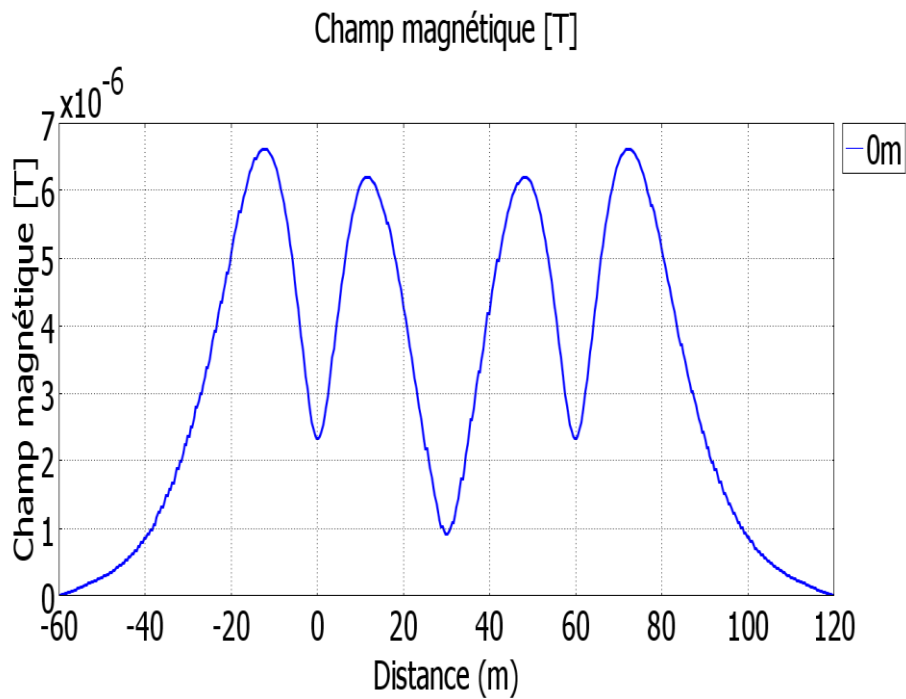


Figure3.39 Profil de champ magnetique au niveau du sol

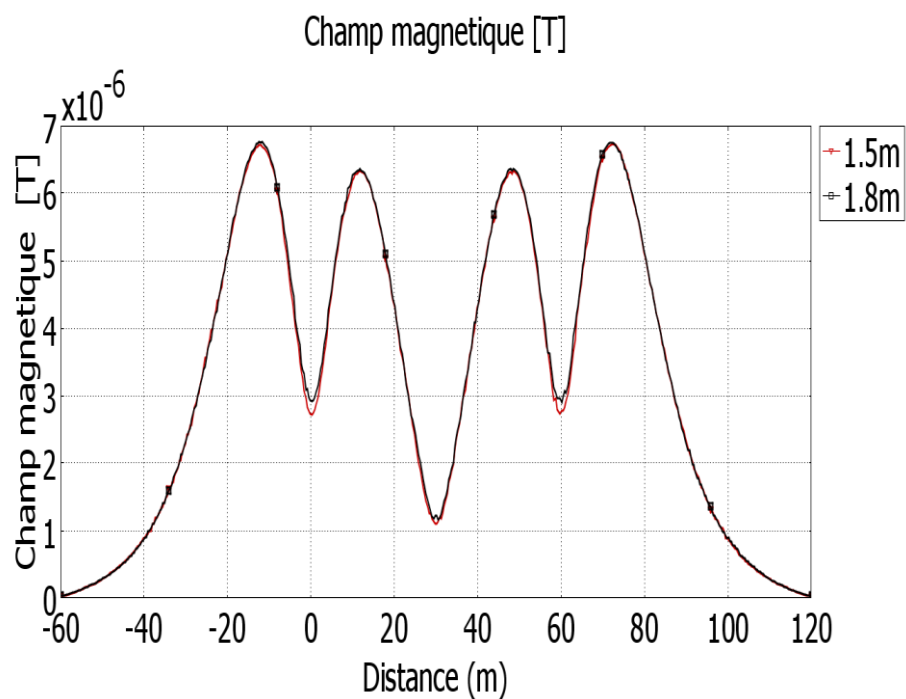


Figure3.40 Profils de champ magnetique a 1.5m et 1.8m au-dessus du sol

Chapitre 3: Modelisation theorique des champs electromagnetiques sous une ligne electrique haute tension

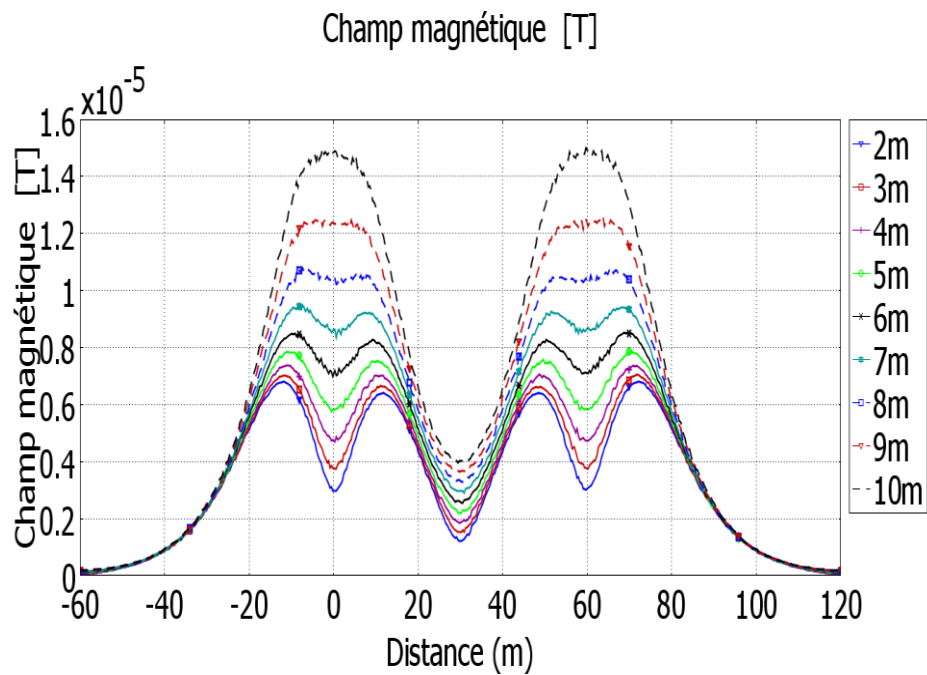


Figure3.41 Profils de champ magnétique de 2 à 10m au-dessus du sol

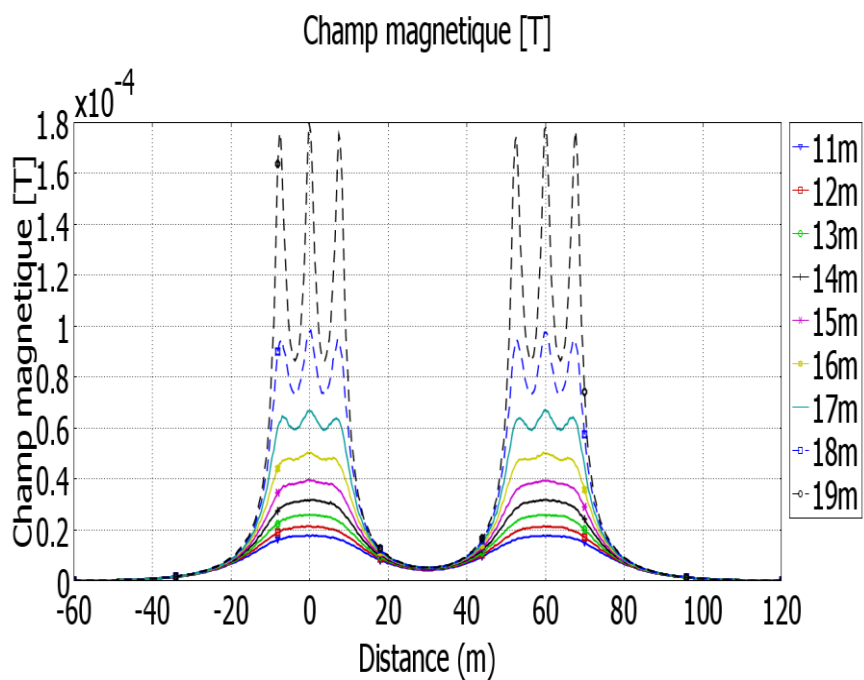


Figure3.42 Profils de champ magnétique de 11 à 19m au-dessus du sol

3.11- Conclusion

Dans ce chapitre nous avons énuméré les méthodes analytiques et numériques de calcul des champs électromagnétiques basses fréquences. Les modèles mathématiques développés pour la détermination des quantités de charges électriques et magnétique rayonnées par les systèmes énergétiques sont basés sur les lois fondamentales de l'électromagnétisme : les théorèmes d'Ampère et Gauss sont valables pour les circuits de géométrie simple.

Dans ce but, un code de calcul analytique basé sur quelques hypothèses simplificatrices du régime quasi-statique a été développé et validé dans le but de déterminer le profil latérale du champ électrique et celui magnétique rayonnés par les lignes haute tension. Les résultats de calcul théorique obtenus sont en accord avec les mesures.

Dans le cas des lignes aériennes haute tension le problème qui se pose est bien le petit rayon du conducteur par rapport a la grande taille du pylône, dans ce cas le passage a la modélisation numérique permet de limiter le domaine de résolution par un maillage et d'établir des modèles mathématiques qui traitent le problème par application des équations de Maxwell en électrostatiques et magnétostatiques, dans le régime quasi statique.

Chapitre 3: Modelisation theorique des champs electromagnetiques sous une ligne electrique haute tension

Conclusion générale :

Dans le cadre de ce travail nous avons présenté le diagnostic et le contrôle de la pollution électromagnétique au voisinage des lignes électriques hautes tensions .Le but est de systématiser les connaissances sur la répartition des quantités de champs électrique et magnétique sous les systèmes énergétiques a fin de prédire les niveaux d'exposition publique et professionnelle aux rayonnements émis par ces derniers.

Nous avons étudié le comportement des profils latéraux des champs électrique et magnétiques émis par des lignes électriques 400 kV et 220 kV en vue de leur caractérisation comme sources de perturbations électromagnétiques.

Dans un premier temps nous avons réalisé une étude bibliographique sur les différentes conceptions et architectures des réseaux électriques hautes tensions. Par la suite nous avons dévoilé la problématique des interférences des champs électromagnétique 50Hz émanant des lignes électrique HT avec l'environnement. Cette dernière relève d'un problème typique de compatibilité électromagnétique, basé sur l'explication des différents modes de couplage entre les sources de ces champs et les paramètres environnementaux pris en considération (victime).

L'évaluation de l'exposition basse fréquence publique et professionnelle nécessite la maîtrise des techniques de calcul et de simulation des quantités de charges capacitives et inductives au voisinage des systèmes énergétiques HT ; pour cela la procédure suivie dans ce travail consiste :

- A développé Un code de calcul analytique Matlab, pour la détermination des profils latéraux des champs générés par différentes configurations de lignes. Ce code a été aussi exploité dans le contrôle de la pollution électromagnétique sous les circuits de lignes électrique haute tension 400kV et 220kV. Nous avons analysé les effets des grandeurs électriques

et géométriques des lignes sur les quantités de charges électriques et magnétiques rayonnées tout en se référant aux normes internationales révisées et publiées par l'ICNIRP en 2010.

- A réalisé une simulation numérique des champs électrique et magnétique rayonnés par les circuits de lignes proposés ; ceci pour des hauteurs approchant les phases des lignes en direction des sommets des pylônes. Les résultats numériques obtenus ont montré que les intensités de champs relevées excèdent les valeurs limites imposées par l'ICNIRP ce qui représente un danger pour les ouvriers d'électricités assurant différentes tâches d'entretien et de maintenance sur les câbles électriques (Live-line-workers).

Suite au travail réalisé et d'après les résultats de modélisation analytiques des champs électromagnétiques sous les systèmes énergétiques hautes tension, nous proposons aux institutions concernées (SONELGAZ) d'établir un catalogue référence des niveaux d'exposition publique et professionnelle à la fréquence industrielle conformément aux normes internationales ICNIRP qui sera mis à la disposition des gens concernés afin d'assurer leur sécurité surtout dans les lieux de travail.

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- [1] Jacques DELABALLE, «Cahiers Techniques, La CEM : la compatibilité électromagnétique» CT 149(e) édition, décembre 2001
- [2] BEN DERRADJI Selsabil « Calcul des protections d'un départ HTA (30 KV) », mémoire (mastère académique), université « Kasdi Marbah Ouargla » année 2014.
- [3] J.C. Sabonnadere et N.Hadjasaid, «ligne et réseau électrique vol 1 », 1ère édition Lavoisier. Année 2007
- [4] M. Aguet et J-J Morf « Traité d'électricité (Energie électrique) ». Volume 12, édition de Georgi 1998
- [5] M. AGUET et M.IANOS « Traité d'électricité, d'électronique et d'électrotechnique Haute tension », Volume 22, Edition Dunod, 1997.
- [6] Abdallah Darkawi, «la compatibilité électromagnétique (Cem)», Ecole d'ingénieur, France 2016 «cl-01358003»
- [7] B.Maouche, «Cours de Cem», Université de Bejaia, site e-learning, date de mise à jour
- [8] Sylvie Rathoin,« Contribution à la caractérisation du rayonnement électromagnétique de la foudre et à sa modélisation en vue du couplage sur les câbles. Thèse de doctorat, Ecole Centrale de Lyon, 1993.
- [9] ZELLAGUI Mohamed, «étude des protections des réseaux électrique MT (30 & 10 kV) » mémoire de magistère, université « Mentouri Constantine »Année 2010
- [10] Pierre Paul Barbière « étude et justification des courant de contacte induits par les lignes à haute tension dans le parc résidentiel belge et leurs incidences sur la population ».Université de liège. Année 2014.
- [11] Journal Officiel de la République Française du 5 mai 2002, page 8626
- 4- W. Tourab, A. Babouri, M. Nemancha. "Experimental Study of Electromagnetic Environment in the Vicinity of High Voltage Lines". American journal of Engineering and Applied Science. Vol.4 (2),p. 209, 2011.
- 5- W.Tourab, A. Babouri and M. Nemancha. Characterization of the electromagnetic Environment at the vicinity of power lines.Proceeding of the

21st International Conference Exhibition on Electricity Distribution. CIRED11, 6-9 June 2011 Frankfurt , 2011.

Webographie

1- OMS (Organisation mondiale de la santé) Que sont les champs électromagnétiques ?

<http://www.who.int/peh-emd/edf-fr/about/WhatisEMF/fr/>

2- Environnemental Heath Citerai 238, Extremely low frequency fields

[http://www.doc-clic.com/reduction-du-champ-de-vision-et désorientation](http://www.doc-clic.com/reduction-du-champ-de-vision-et-désorientation)

3- ICNIRP (International Commission on Non-Ionizing Radiation Protection)

www.icnirp.de/PubEMF.htm