

الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية
وزارة التعليم العالي و البحث العلمي



BADJI MOKHTAR -ANNABA UNIVERSITY
UNIVERSITE BADJI MOKHTAR - ANNABA

جامعة باجي مختار - عنابة

Année 2016

Faculté des sciences de l'ingénieur
Département d'électrotechnique

THESE

Présentée en vue de l'obtention du diplôme de DOCTORAT

**Caractérisation de l'environnement électromagnétique au voisinage des
lignes électriques haute tension**

**Option
Réseaux Electriques
Par
TOURAB Wafa**

DIRECTEUR DE THESE : Pr Mohamed Nemamcha

UNIVERSITE DE GUELMA

DEVANT LE JURY

Président :	Pr. LABAR Hocine	Prof.	Université d'Annaba
Rapporteur :	Pr. NEMAMCHA Mohamed	Prof.	Université de Guelma
Co encadreur	Dr. BABOURI Abdesselam	MCA.	Université de Guelma
Examineurs :	Pr. OMEIRI Amar	Prof.	Université d'Annaba
	Pr. LEMZADMI Ahcene	Prof.	Université de Guelma
	Dr. AZZEG El Bahi	MCA.	Université d'Annaba

Avant-propos

Ces travaux de recherches se sont déroulés au laboratoire LGEG (Laboratoire de génie électrique de Guelma), sous la direction de Monsieur le professeur Mohamed Nemamcha. Notre étude s'inscrit dans le cadre d'une collaboration avec SONALGAZ (société Régionale d'électricité et du gaz).

Je tiens à exprimer d'abord toute ma reconnaissance à Monsieur le professeur Mohamed Nemamcha, qui m'a proposé ce sujet de recherche à la fois d'actualité et pluridisciplinaire, de par ses compétences, sa notoriété, sa rigueur et son encouragement pour le travail, notre recherche à été réalisée dans les meilleures conditions. En tant qu'élève et en tant qu'encadreur nous avons eu le privilège d'apprécier et de profiter de votre savoir et compétence merci Monsieur.

Ma reconnaissance va aussi à Monsieur Babouri Abdesselam Directeur de Recherche au laboratoire LGEG, qui est à l'origine de ce travail de thèse. Qu'il trouve ici l'expression de notre vive gratitude pour tout le temps que vous nous avez consacré et pour tous les efforts et encouragements. Votre esprit d'analyse nous a permis de résoudre tant de difficultés dans la réalisation de ce travail. Merci aussi d'avoir accepté de rapporter cette thèse

Je suis très honorés que Monsieur Labar Hocine professeur à l'université d'Annaba, préside le jury au quel je soumis ce mémoire. Mes remerciements vont aussi à Messieurs : Azzag El Bahi Omeiri Amar et Lemzadmi Ahcen Professeurs à d'Annaba et Guelma, qui ont bien voulu accepter d'évaluer mon travail. Leurs compétences et savoir sont des éléments qui apportent un plus value à ma thèse. Qu'ils trouvent tous ici l'expression de mes remerciements et ma reconnaissance

Je tiens à remercier Monsieur le directeur générale GRTE d'Annaba et Monsieur Boulahbel Aref, ingénieur projet et chef divisions d'exploitation de GRTE d'Annaba, pour leurs esprits scientifiques et leur collaboration dans la réalisation de la partie expérimentale de ce travail de thèse. Qu'ils, veuillent bien trouver ici l'expression de notre gratitude. Votre encadrement technique et votre disponibilité nous ont été d'une grande importance pour le déroulement de cette thèse. Je garde en mémoire vos qualités humaines et techniques et votre disponibilité merci infiniment.

Je tiens à exprimer mes remerciements à tous les ingénieurs du bureau d'étude de SONELGAZ, pour leur aide dans la collecte des données expérimentales. Et que les ingénieurs et les techniciens du poste 90kv d'El -Hadjar, veuillent bien trouver l'expression de nos sincères remerciements, pour leur accueil et leur contribution dans le bon déroulement de la procédure expérimentale.

Ma reconnaissance va aussi à Monsieur Dafri Mourad ingénieur au laboratoire LGEG, pour son aide dans la préparation et l'installation de l'appareil de mesure et le suivi des résultats expérimentaux.

Mon remerciement affectif va à ma famille qui a été en permanence à mes côtés. Particulièrement mes parents, mon mari et mes enfants pour leurs conseils avisés et leurs encouragements continus.

A toutes ces personnes et à bien d'autres, un grand merci.

Principales Notations

CEM	Champ Electromagnétique
Electro smog	Pollution Electromagnétique
BF	Basse Fréquence
HT	Haute Fréquence
EBF	Extrême basse fréquence
ICNIRP	Commission internationale de protection contre le rayonnement non ionisant
OMS	Organisation mondiale de la santé
IEEE	Institut d'ingénieurs en électrotechnique et électronique
GRTE	Gestion du réseau de transport électrique
LGEG	Laboratoire de Génie Electrique Guelma
MLPS	Multi-line power system
CE	Champ électrique
CB	Champ magnétique
RI	Rayonnement ionisant
RNI	Rayonnement non ionisant
THT	Très haute fréquence
Z0	Impédance du vide
λ	Longueur d'onde
OE	Onde électrique
OM	Onde Magnétique
OEM	Onde électromagnétique
f	Fréquence en Hertz
HF	Haute fréquence
SAR	Taux d'absorbation spécifique
$J(A/m^2)$	Densité de courant induit
DAS	Densité de courant surfacique
$\epsilon_0(F/m)$	Permittivité du vide
$\epsilon_r(F/m)$	Permittivité relative du milieu
σ (S/m)	Conductivité électrique
μ (H/m)	Perméabilité magnétique
μ_0 (H/m)	Perméabilité magnétique du vide
μ_r (H/m)	Perméabilité relative
EPRI	Institut de recherche en énergie électrique
Kahramaa	Société d'électricité à Katar
PPM840	Mesureur de champ électromagnétique
EMI	Electromagnétique interférence
EMS	Susceptibilité électromagnétique

LISTE DES FIGURES

Figure I.1 Spectre de fréquence.....	17
Figure I.2 Champ électromagnétique terrestre assimilable a celui d'un dipôle	19
Figure I.3 Propagation du CEM en fonction de la longueur d'onde de la source [24].....	21
Figure I.4 Onde électromagnétique basse fréquence	23
Figure II.1 Modes de couplages électromagnétiques [8]	43
Figure II.2 Dipôles électrique et magnétique oscillants [25]......	45
Figure II.3 Variations relative des termes de rayonnement, D'induction et quasi stationnaire	46
Figure II.4 Impédance d'onde normalisée en fonction de la distance par rapport à la source.....	48
Figure II.5 Distance correspondant la limite de champ proche en fonction de la fréquence.....	49
Figure II.6 Mécanismes d'interaction champs électromagnétique et corps humain.....	51
Figure II.7.a Corps humain plongé dans un champ électrique	54
Figure II.7.b Corps humain plongé dans un champ magnétique	54
Figure II.8 Méthodologie de recherche sur les effets CEM 50 Hz	58
Figure II.9 Dosimétrie en basse fréquence [79].....	65
Figure II.10.a Modélisation de l'exposition a un champ électrique	69
Figure II.10.b Modélisation de l'exposition a un champ magnétique	69
Figure III.1 Disposition du calcul du champ électromagnétique.....	75
Figure III.2 Champ électrique généré par une droite infinie chargée	76
Figure III.3 Méthode des images pour le calcul du champ électrique résultant.....	79
Figure III.4 CB rayonné par un fil de longueur infinie.....	82
Figure III.5 CB émis par les trois phases d'une ligne électrique en un point M.....	83
Figure III.6 Algorithme pour le calcul du CEM rayonné par une ligne HT	88
Figure III.7.a Champ magnétique généré par une ligne 330Kv, avec une charge de 240A.....	89
Figure III.7.b Champ magnétique généré par une ligne 10Kv, avec une charge de 105 A.....	89
Figure III.7.c Champ magnétique généré par une ligne 110 KV, avec une charge de 52 A	89
Figure III.8 Application de la méthode DF en 2D et 3D	91
Figure III.9 Application de la méthode FDTD- maillage de Yee	92
Figure III.10 Représentation 2D de la méthode des impédances.....	95
Figure III.11 Méthode- résolution d'un système physique par éléments finis.....	96
Figure III.12 Les différents cas du maillage	98
Figure VI.1 Illustration du phénomène de propagation du champ électromagnétique.....	102
Figure VI.2 Algorithme de réduction du champ électrique au voisinage des lignes HT.....	107
Figure VI.3 Champ électrique pour les trois configurations de lignes.....	110
Figure VI.4 Champ électrique pour différentes gardes au sol.....	110

Figure VI.5 Distance critique (L_c), pour la variation du champ CE avec la hauteur H	111
Figure VI.6 Effet de la distance entre phases sur le profil du champ électrique.....	111
Figure VI.7.a Zone de servitude du champ magnétique pour $B = 100\mu\text{T}$ [93].....	116
Figure VI.7.b Zone de servitude du champ magnétique pour $B = 0.4\mu\text{T}$ [93].....	116
Figure VI.8 Champ magnétique pour les trois configurations de lignes	118
Figure VI.9 Champ magnétique calculé pour différentes hauteurs de la ligne	118
Figure VI.10 Champ magnétique calculé pour différents espacement entre phases	120
Figure VI.11 Effet de la variation de la charge sur l'intensité du champ magnétique	120
Figure V.1 Composantes E_x et E_y du champ électrique rayonné.....	126
Figure V.2 Composantes du champ à polarisation elliptique.....	130
Figure V.3 Polarisation du champ électrique a un mètre du sol.....	131
Figure V.4 polarisation du champ magnétique a un mètre du sol	131
Figure V.5 Profil latéral du champ électrique standard [94].....	133
Figure V.6 Profil longitudinale pour la mesure du champ électrique [94]	134
Figure V.7 Circuit de lignes étudié.....	137
Figure V.8 Niveaux Sensible du corps humain [97]	138
Figure V.9 Protocole de Mesure [98]	138
Figure V.10 Modèle Analytique pour le calcul du champ électromagnétique	150
Figure V.11 Distribution de la CE pour les hauteurs (0 m, 1 m, 1.5m et 1.8m).....	155
Figure V.12 Distribution du champ électrique dans le plan X-Y, pour les 4 niveaux.....	156
Figure V.13 Distribution du CB pour les hauteurs (0m, 1m, 1.5m et 1.8m)	157
Figure V.14 Distribution du champ magnétique dans le plan X-Y, pour les 4 niveaux.....	158
Figure V.15 Profil du champ électrique pour des niveaux entre 0 m and 10 m.....	161
Figure V.16 Profil du champ électrique pour des niveaux entre 11 m and 16 m.....	161
Figure V.17 Profil du champ électrique pour des niveaux entre 17 m et 20 m.....	162
Figure V.18 Simulation du champ électrique pour les hauteurs 0 m à 20 m.....	162
Figure V.19 Profil du champ magnétique pour des niveaux entre 0 m and 10 m.....	163
Figure V.20 Profil du champ magnétique pour des niveaux entre 11 m and 16 m.....	163
Figure V.21 Profil du champ magnétique pour des niveaux entre 17 m et 20 m.....	164
Figure V.22 Simulation du champ magnétique pour les hauteurs 0 m à 20 m.....	164

LISTE DES TABLEAUX

Tableau I.1 Niveaux de CEM rayonnés par les lignes aériennes [23].....	26
Tableau I.2 Niveaux de CEM rayonnés par des appareils domestiques [31].....	27
Tableau I.3 Limites d'exposition maximales [3].....	31
Tableau I.4 Restrictions de base [4].....	32
Tableau 2.1 Le seuil de perception du champ magnétique [21].....	56
Tableau 3.1 Valeurs des paramètres normalisées des lignes 330 ,110 et 10 KV.....	88
Tableau 4.1 Influence des paramètres géométriques sur les CE et CB d'une ligne HT.....	105
Tableau 5.1 Comportement du champ électrique	139
Tableau 5.2 Comportement du champ magnétique.....	140
Tableau 5.3 Champs électrique et magnétique mesurés (cas1).....	144
Tableau 5.4 Champs électrique et magnétique mesurés (cas 2 et 3).....	145
Tableau 5.5 Champs électrique et magnétique mesurés (cas4).....	146
Tableau 5.6 Champs électrique et magnétique mesurés (cas 5).....	147
Tableau 5.7 Champs électrique et magnétique mesurés (cas6).....	148

ملخص

ان هذه الدراسة عبارة عن وصف تجريبي و تحليلي للبيئة الكهرومغناطيسية حول دارة متكونة من خطين كهربائيين ذوي فلوطينة عالية 220 ك ف تعمل بطريقة متوازية. ينقسم هذا التحليل الى قسمين رئيسيين الجزء الاول منه عبارة عن دراسة تجريبية لسلوك الحقلين الكهربائي والمغناطيسي المولدين على مستوى سطح الارض (0م) من قبل النظام المزدوج الخطوط. في حين ان الجزء الثاني يمثل محاكاة تحليلية للملامح الجانبية للحقول الكهرومغناطيسية في مستويات مختلفة عن الارض ابتداء من 0 الى 20 م على مقربة من اطوار برج الأسلاك الكهربائية. لقد تم استخدام لهذا الهدف الوحدات ناقشنا في الاخير الاثار المترتبة عن النتائج المتحصل عليها و لاحظنا multi-physics الكهربائية والمغناطيسية لبرنامج انها تبقى ضمن المعايير التي توصي بها المنظمة العالمية للحماية من الاشعاع الغير مؤين المطبقة في الوسطين المهني والعام

كلمات مفتاحية

المجالات الكهرومغناطيسية ذات التردد , اقتران / شقراى و سيعوي , التوافق الكهرومغناطيسي , خطوط الطاقة الكهربائية المنخفض

Abstract

This paper consists on an experimental and analytical characterization of the electromagnetic environment in the in the medium surrounding a circuit of two 220Kv power lines running in parallel. The analysis presented in this paper is divided into two main parts. The first part concerns the experimental study of the behavior of the electric field and magnetic field generated by the selected double -circuit at ground level (0 m). While the second part simulate and calculate the fields profiles generated by the both lines at different levels above the ground, from (0 m)to the level close to the line conductors (20 m above the ground) using the electrostatic and magneto-static modules of the COMSOL multi-physics software. The implications of the results are discussed and are compared with the ICNIRP reference levels for occupational and non occupational exposures.

Keywords: *power lines; Low Frequency Electromagnetic Fields; Finite Element Method; Electromagnetic compatibility; inductive and capacitive coupling, Standards.*

Résumé

Cette étude a consisté en une caractérisation expérimentale et analytique de l'environnement électromagnétique au voisinage d'un circuit de deux lignes haute tension 220 kV fonctionnant dans des couloirs parallèles. L'analyse présentée est divisé en deux parties. La première concerne l'étude expérimentale du comportement des champs électrique et magnétique générés au niveau du sol (0 m) par le circuit de lignes double sélectionné. Tandis que la seconde partie est une simulation analytique des profils latéraux des champs générés par les deux lignes voisines à des niveaux différents de 0 à 20 m au-dessus du sol à proximité des phases des lignes en utilisant les modules : électrostatique et magnétostatique du logiciel COMSOL multi-physics. Les implications de ces résultats sont discutées et sont compatibles avec les recommandations ICNIRP sur les seuils d'exposition professionnelle et publique.

La mise à jour réglementaire concernant l'exposition professionnelle et publique de basse fréquence publiée par la Commission internationale de protection contre les rayonnements non ionisants (ICNIRP) en 2010 est largement reconnue et constitue la base de la réglementation nationale en Algérie; ce qui exige la vérification de la conformité avec les recommandations internationales qui en découle. Dans cet article, l'exposition professionnelle à l'intérieure du poste électrique El Hadjar 220 kV qui assure l'interconnexion entre l'Algérie et la Tunisie est étudiée. Ce poste est catégorisé vu son emplacement dans une zone urbaine et la grande gamme de tensions qu'il couvre [220 kV-90 kV et 60 kV]. Le but de ce travail est de réaliser une caractérisation expérimentale de l'environnement électromagnétique sous un circuit de deux lignes électriques 220 kV implantées à l'intérieur du poste nécessitant souvent des travaux de maintenance. Une modélisation analytique et numérique basées sur les dimensions physiques réelles des pylônes est proposée afin d'accomplir cette étude ; les profils latéraux des champs électrique et magnétique ont été simulés pour des hauteurs élevées de la garde au sol. Une conclusion résultant de la comparaison des résultats obtenus avec les seuils de référence imposés pour l'exposition professionnelle ainsi que des recommandations à titre préventif pour assurer la sécurité des ouvriers du post sont finalement donnés.

Mots clés : *lignes électriques ; champs électromagnétiques basse fréquences ; Méthode des Eléments Finis ; compatibilité Electromagnétique ; couplages inductif et capacitif ; Normes Internationales*

SOMMAIRE

Avant Propos	1
Principales Notations	2
Liste des Figures	3
Liste des tableaux	5
Abstract	6
Sommaire	8
Introduction générale	11
1. Etat de l'art: Champs Electromagnétiques et Exposition	15
1.1 Introduction	16
1.2 Champs électromagnétiques définitions	16
I.2.1 Spectre électromagnétique.....	16
I.2.2. Sources de champs électromagnétiques.....	17
I.2.2.1 Sources de champs électromagnétiques naturels.....	18
I.2.2.2 Sources des champs électromagnétiques artificiels.....	19
I.2.3 Propriétés des champs électromagnétiques.....	21
1.3 Champs électromagnétiques de basses fréquences	22
I.3.1 Les champs électromagnétiques générés par les lignes HT.....	23
I. 3.1.1 Rappel sur les lignes électriques HT.....	23
I. 3.1.2 Champ électrique Rayonné.....	24
I. 3.1.3 Champ magnétique Rayonné.....	25
I.3.2 Niveaux de champs rayonnés.....	26
I.4 Contexte normatif	27
I.4.1 Normes des champs électromagnétiques de basses fréquences.....	28
I.4.1.1 Restrictions de base.....	28
I.4.1.2 Niveaux de référence.....	29
I.4.2 Le standard IEEE C95.1-1999.....	30
I.4.3 Les recommandations ICNIRP.....	31
I.5 Problématique de l'étude et bibliographie récente	32
1.6 Conclusion	38
II. Problématique des interférences des CEM BF avec l'environnement	39
2.1 Introduction	40
2.2 Compatibilité électromagnétique	40
2.2.1 Mécanisme d'action des perturbations électromagnétiques.....	41
2.2.2 Modes de couplages.....	42
2.2.3 Comportement des sources électromagnétiques.....	43
2.3 Mécanismes d'interaction CEM basse fréquences corps humain	49
2.3.1 Mécanismes de couplage direct.....	49
2.3.1.1 Couplage avec un champ électrique.....	51
2.3.1.2 Couplage avec un champ magnétique.....	51
2.3.1.3 Absorption de l'énergie électrique.....	52
2.3.2 Mécanisme de couplage indirect.....	54

2.4 Effets des champs électromagnétiques basse fréquence sur la santé humaine	55
2.4.1 Les effets avérés.....	56
2.4.2 Les effets potentiels.....	57
2.4.2.1 Etudes épidémiologiques.....	58
2.4.2.2 Etudes expérimentales.....	62
2.5 Dosimétrie et formulations quasi-statique	63
2.5.1 Dosimétrie en basse fréquence.....	64
2.5.2 Formulations quasi-statique en basse fréquence.....	65
2.5.2.1 Formulations diélectrique pour la simulation de l'exposition à un CE.....	66
2.5.2.2 Formulations diélectrique pour la simulation de l'exposition à un CB.....	67
2.6 Conclusion	69
III. Modélisation théorique du champ électromagnétique 50 Hz	70
3.1 Introduction	71
3.2 Modélisation analytique des champs électromagnétiques 50 Hz	71
3.2.1 Equations de Maxwell.....	72
3.2.2 Détermination du vecteur potentiel magnétique.....	73
3.3 Calcul analytique du champ électrique rayonné par une ligne haute tension	75
3.3.1 Champ électrique engendré par une ligne de longueur infinie.....	75
3.3.2 Champ électrique engendré par une ligne triphasé.....	78
3.4 Calcul analytique du champ magnétique rayonné par une ligne haute tension	81
3.4.1 Champ magnétique généré par un fil rectiligne.....	81
3.4.2 Méthode vectorielle pour le calcul du champ magnétique.....	82
3.4.2.1 Programmation sous l'environnement Matlab.....	86
3.4.2.2 Exploitation du programme de calcul.....	88
3.4.2.3 Résultats et discussion.....	88
3.5 Modélisation numérique des champs électromagnétiques 50 Hz	90
3.5.1 Méthode des différences finis.....	91
3.5.2 Méthode des différences finis dans le domaine temporel.....	92
3.5.3 Méthode des impédances.....	94
3.5.4 Méthodes des éléments finis.....	95
3.6 Conclusion	99
VI. Analyse de l'environnement électromagnétique au voisinage des LHT	100
4.1 Introduction	101
4.2 Equations de propagation du champ électromagnétique	101
4.3 Méthodes de réduction du champ électromagnétique sous les LHT	104
4.3.1 Méthode de réduction du champ électrique.....	106
4.3.1.1 Effet de changement de la géométrie de la ligne.....	107
A. Effet de la configuration de la ligne.....	108
B. Effet de la garde au sol.....	109
4.3.1.2 Effet de la distance entre phases.....	112
4.3.1.3 Effet du nombre de conducteurs par phase.....	112
4.3.1.4 Effet de la flèche et des câbles de garde.....	113
4.3.2 Méthode de réduction du champ magnétique.....	114
4.3.2.1 Effet de changement de la géométrie de la ligne.....	117

A .Effet de la configuration de la ligne.....	117
B. Effet de la garde au sol.....	118
4..3.2.2 Effet de la distance entre phases.....	119
4.3.2.3 Effet de la variation de la charge.....	120
4.4 Conclusion.....	121
5. Caractérisation expérimentale et théorique de l’environnement électromagnétique au voisinage des lignes haute tension.....	122
5.1 Métrologie en matière CEM1.....	123
5.2 Mesure du champ électromagnétique sous une ligne HT.....	124
5.2.1 Description du mesureur de champ électromagnétique.....	124
5.2.1.1. Caractéristiques opérationnelles du mesureur de CEM.....	125
5.2.1.2. Calibration.....	127
5.2.1.3. Précautions à prendre lors des mesures.....	128
5.2.2 Procédure de mesure du champ électromagnétique sous une ligne HT.....	129
5.2.2.1. Polarisation des champs électrique et magnétique.....	130
5.2.2.2. Techniques de mesure du champ électrique.....	132
a. Profil latéral.....	133
b. Profil longitudinale.....	134
5.2.2.3. Techniques de mesure du champ magnétique.....	135
5.3 Etude expérimentale.....	136
5.3.1 Description du circuit de lignes étudié.....	136
5.3.2 Protocole de mesure.....	137
5.4 Résultats expérimentaux.....	139
4.1 Comportement du champ électrique.....	139
5.4.2 Comportement du champ magnétique.....	140
5.4.3 Discussion des résultats.....	141
5.4.4 Configurations de lignes incluses dans les mesures.....	142
5.4.5 Analyse et évaluation.....	149
5.5 Validation des résultats expérimentaux.....	150
5.5.1 Modélisation Analytique.....	150
5.5.1.1 Calcul du champ électrique.....	151
5.5.1.2 Calcul du champ magnétique.....	153
5.5.1.3 Résultats analytiques.....	154
5.5.2 Simulation Numérique.....	159
5.5.2.1 logiciel de simulation.....	159
5.5.2.2 Résultats de simulation numérique.....	160
5.6Conclusion.....	165
6. Conclusion générale et perspective.....	167
BIBLIOGRAPHIE.....	168

INTRODUCTION GENERALE :

Les progrès rapides de la technologie électrique et des télécommunications continuent à bouleverser la vie de nos sociétés, générant des champs électromagnétiques (CEM) dans lesquels nous sommes littéralement submergés. L'utilisation croissante de l'énergie électrique de part le monde (a augmenté de 20 fois aux USA entre 1940 et 1992) [1], a engendré des préoccupations concernant les éventuels effets négatifs des expositions aux CEM sur les systèmes biologiques et en particulier sur la santé humaine [2].

De part leurs utilités dans le transport et la distribution de l'énergie électrique, les lignes électriques sont les sources d'« Electrosmog », les plus abondantes dans l'environnement. Les quantités de champs qu'elles génèrent lors de leur fonctionnement dépendent du niveau de tension et de la charge qu'elles transportent. A fin d'éviter les problèmes d'interférence avec leur environnement, ces champs électromagnétiques doivent être maintenus dans des limites de références fixées par des organisations de protection contre les rayonnements non ionisants [3] et [4].

Depuis plus de 30 ans de nombreux travaux de recherche portant sur les effets de l'exposition aux champs électromagnétiques générés par les lignes de transport de l'énergie électrique et les stations de communication mobiles [5] ont été publiés. Ces études sont caractérisées par la diversité des méthodes utilisées pour la caractérisation de ces champs et la définition des mécanismes de leur couplage avec les tissus biologiques et l'appareillage électrique [6].

L'enquête Eurobaromètre de 2007 a montré une forte préoccupation de la population européenne envers les effets néfastes des champs électromagnétiques émanant des lignes électriques haute tension sur la santé humaine [7]. La polémique scientifique sur les effets délétères des CEM sur la santé humaine est toujours d'actualité et sur les effets qui pourraient découler de l'exposition aux champs électromagnétiques, tel que : les chocs électriques, les brûlures des tissus et les interférences avec les implants médicaux [8] et [9].

Certaines corrélations cliniques sont très significatives (augmentation de certains cancers chez les enfants). Cependant pour d'autres hypothèses cliniques la relation entre l'exposition aux CEM et l'apparition des maladies présumées n'a pas encore été prouvée.

Néanmoins la tendance des opinions des chercheurs scientifiques est de privilégier « *le principe de précaution* ». Il s'agit d'une approche basée sur le principe : qu'en l'absence de preuves de l'innocuité des CEM la précaution doit être la règle [15] et [16].

Dans ce débat l'analyse de la littérature portant sur l'état des connaissances et des controverses à propos des effets des CEM basse fréquence (BF) 50-60Hz sur la santé humaine montre que les premiers effets des lignes électrique haute tension (HT) ont d'abord été relevés chez les travailleurs de l'électricité, en 1972 par les épidémiologistes russes qui notaient : céphalées, fatigue, et troubles du sommeil [10] chez les personnes exposées , puis plus tard aux Etats-Unis, on étés notifiés : leucémies, tumeurs cérébrales et mélanomes.

Sur la population générale, les travaux de **Werpheimer** en 1979 aux Etats Unis furent le point de départ d'une controverse sur les leucémies infantiles [11]. La corrélation statistique entre ces leucémies infantiles et les CEM à partir de 0,4 μ T est la seule aujourd'hui quasiment consensuelle, et qui a conduit l'OMS à classer ces champs dans la catégorie IIA, soit potentiellement cancérigènes.

Une étude chez les travailleurs de l'électricité vient conforter l'augmentation des infarctus du myocarde et des arythmies sous exposition chronique aux CEM d'extrême basse fréquence [12]. De nombreuses données expérimentales appuient la génotoxicité des CEM EBF: ils provoqueraient des lésions d'ADN par stress oxydatif, entraînant des anomalies de réparation de l'ADN, et du cycle cellulaire [13]. De plus, l'« effet couronne » est encore évoqué pour expliquer le sur risque de cancer du poumon: l'ionisation par le champ électrique de la ligne THT des particules polluantes, tels les hydrocarbures aromatiques cancérigènes présents sous forme d'aérosol dans l'air, favoriserait leur déposition bronchique [14].

Par mesures préventives, diverses institutions législatives (Parlement européen..), et sociétés savantes, ont établi des limites d'exposition aux CEM pour le public et les travailleurs. Parmi ces organisations : l'ICNIRP, l'OMS et la norme IEEE directive. Ces recommandations définissent une restriction de base sur la densité du courant électrique induit dans l'organisme par les champs ELF (d'extrême basse fréquence) [4], [21]et [3].

Pour la caractérisation des CEM au voisinage des lignes HT, certains auteurs ont

développé des modèles mathématiques basés sur la résolution des équations de Maxwell et de Laplace pour des géométries simples. En terme pratique, pour des systèmes énergétiques de taille physique importante, ces modèles ne sont pas les plus appropriés, en raison de leurs mathématiques complexes et de leur imprécision dans les calculs. Ce qui justifie le choix de la technique expérimentale avec des conditions d'exposition bien définies pour la détermination des champs de fuites au voisinage des lignes HT et qui est la plus utilisée dans les travaux de recherche les plus récents [17], [18], [19] et [20].

La maîtrise des techniques de mesure des CEM rayonnés par les lignes électriques et l'étude de leur impact sur les milieux biologiques en général et sur la santé humaine en particulier, constituent le cadre de recherche de notre travail. Dans ce contexte, nous avons mené une investigation expérimentale en collaboration avec GRTE d'Annaba à l'intérieur du poste électrique El -Hadjar qui assure l'interconnexion entre la région de l'Extrême-Est de l'Algérie et la Tunisie ,ce poste couvre des gamme de tension de 220 kV, 90 kV et 60 kV et présente un intérêt particulier vu son emplacement dans une zone urbaine .

La méthodologie suivie est progressive : elle consiste dans un premier lieu à développer un protocole de mesure permettant d'étudier le comportement des champs électrique et magnétique générés par des lignes HT fonctionnant dans des couloirs parallèles et posant des problèmes de parasitage par diaphonie inductive et capacitive. Ceci dans le but de créer une base de données concernant la caractérisation expérimentale des champs électromagnétiques 50Hz dans notre laboratoire qui sera mise à la disposition des partenaires Concernés. Dans la deuxième étape les résultats expérimentaux ont été validés par une modélisation analytique et comparés aux normes internationales imposés par l'ICNIRP [22].

Ce document comporte cinq chapitres. Le premier chapitre du manuscrit évoque l'état de l'art dans le domaine des champs électromagnétiques basse fréquence. Il a permis de nous éclairer sur les différents types de rayonnement électromagnétiques basse fréquence d'origine naturelle et artificielle et d'évoquer le contexte normatif relatif. Nous avons passé en revue la bibliographie existante sur le thème "caractérisation de l'environnement électromagnétique au voisinage des lignes haute tension.

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 électrique et magnétique 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 capacitives et inductives émises par les lignes de transmissions énergétiques.

Le contrôle de la pollution électromagnétique émanant des lignes électriques HT est présenté dans le quatrième chapitre, différentes techniques de réduction des champs électriques et magnétiques émanant de ces lignes sont présentées à fin de faire ressortir l'influence de leur caractéristiques géométriques sur les profils latéraux des CEM relevés à leur voisinage.

Dans le dernier chapitre, et dans le cadre d'une collaboration entre notre laboratoire de recherche LGEG et la compagnie régionale d'électricité GRTE d'Annaba, une investigation expérimentale a été conduite au sein du poste électrique d'interconnexion El-Hadjar sous un circuit de ligne double 220Kv dans le but de mesurer l'exposition professionnelles basse fréquence aux champs électromagnétiques émanant des systèmes énergétiques (MLPS) et d'établir conformément aux normes internationales des niveaux de références pour prédire la sécurité des ouvriers des postes électriques durant leurs tâches de travail. Ce chapitre s'achève par une validation numérique des résultats expérimentaux relevés.

A la fin, une référence bibliographique a été colligée et répertoriée par ordre d'apparition dans le manuscrit ainsi qu'une Webographie des organisations de protection contre le rayonnement non ionisant est fournie.

Chapitre I

ETAT DE L'ART : Champs Electromagnétiques et Exposition

Sommaire

1. Etat de l'art: Champs Electromagnétiques et Exposition

1.1 Introduction

1.2 Champs électromagnétiques définitions

I.2.1 Spectre électromagnétique

I.2.2 Sources de champs électromagnétiques

I.2.2.1 Sources de champs électromagnétiques naturels

I.2.2.2 Sources des champs électromagnétiques artificiels

I.2.3 Propriétés des champs électromagnétiques

1.3 Champs électromagnétiques de basses fréquences

I.3.1 Les champs électromagnétiques générés par les lignes HT

I. 3.1.1 Rappel sur les lignes électriques HT

I. 3.1.2 Champ électrique Rayonné

I. 3.1.3 Champ magnétique Rayonné

I.3.2 Niveaux de champs rayonnés

I.4 Contexte normatif

I.4.1 Normes des champs électromagnétiques de basses fréquences

I.4.1.1 Restrictions de base

I.4.1.2 Niveaux de référence

I.4.2 Le standard IEEE C95.1-1999

I.4.3 Les recommandations ICNIRP

I.5 Problématique de l'étude et bibliographie récente

1.6 Conclusion

I.1 Introduction

Ce chapitre est consacré à la mise en place du contexte. Il porte sur des définitions et classement des CEM présents dans notre environnement ainsi que divers rappels théoriques indispensables.

I.2 Champ électromagnétique définition

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

$$\vec{F} = q(\vec{E} + \vec{v} \wedge \vec{B})$$

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

I.2.1 Spectre électromagnétique

Le spectre électromagnétique englobe les sources naturelles et artificielles des champs électromagnétiques [21]. Ces champs sont classés en fonction de leurs fréquences, l'ensemble de ces fréquences forme le spectre électromagnétique. Dans la figure (I-1) la plupart des champs électriques ou magnétiques produits par l'homme varient de façon rapide et régulière. Ce sont des champs alternatifs, caractérisés par leurs intensités et leurs fréquences. Ils sont aussi caractérisés en plus de la bande de fréquence, par leur longueur d'ondes et par leurs natures. Les CEM de haute fréquence ou de radiofréquence se situent entre 10 MHz et 300 GHz. Dans cette partie du spectre électromagnétique, de larges plages de fréquences sont utilisées pour les applications de télécommunication. Les téléphones mobiles et les antennes relais émettent ainsi des champs dits de haute fréquence de 900 MHz ou 1,8 GHz

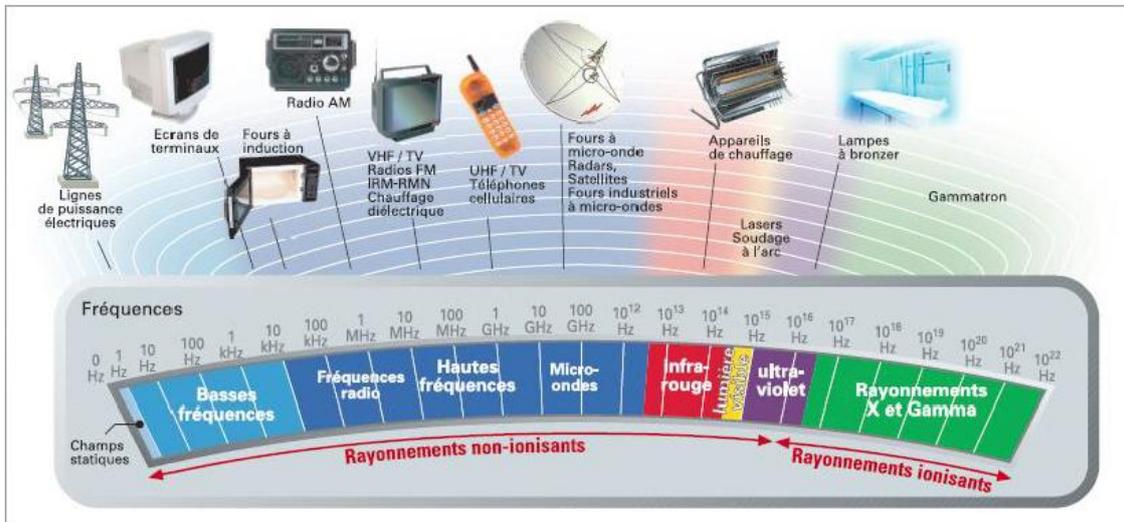


Fig. I. 1 Spectre de fréquences [23]

Ceux de 0 à 300 Hz sont dits d'extrême basse fréquence (ELF), les lignes de transport de l'énergie électrique et tous les équipements qui consomment ou acheminent de l'électricité émettent des champs à 50 Hz. Toutefois, certains appareils électriques et installations industrielles transforment cette électricité à 50 Hz soit en courant continu, (comme dans les applications Industrielles de l'électrochimie par exemple), soit en fréquences plus élevées, comme dans (les applications industrielles et domestiques de chauffage par induction ou de four à micro-ondes) [23].

I.2.2 Sources de champs électromagnétiques

Les champs électromagnétiques ou rayonnements électromagnétiques sont d'une manière générale une forme de transport d'énergie sans support matériel. L'utilisation de ces rayonnements couvre de nombreuses applications dans une très large gamme de fréquence.

On peut distinguer deux types de rayonnements électromagnétiques : rayonnements ionisants et non ionisants.

Un rayonnement est ionisant s'il transporte une énergie suffisante pour arracher un électron à une molécule, notamment une molécule d'eau (énergie ≥ 14 eV). Cette énergie est capable d'avoir des effets biologiques majeurs, car elle va par des mécanismes physiques et chimiques, léser les molécules d'ADN qui sont sa cible principale. Ce type de rayonnement

est de très hautes fréquences plus de $3 \cdot 10^{15}$, ou de longueur d'onde inférieure de $0,1\mu\text{m}$. Pour les fréquences inférieures, les énergies mises en jeu sont trop faibles pour modifier les structures atomiques et on observe des effets thermiques et athermiques. Les effets thermiques sont la conséquence du chauffage diélectrique des tissus et sont connus et utilisés depuis plusieurs décennies dans le domaine de la thérapie.

Dans les radiofréquences ces effets thermiques sont importants. Par contre la partie basse fréquence (ELF) les effets thermiques est dans la plupart des cas négligeables pour les sources fréquemment rencontrées et les effets observés sont dit athermiques [AS10]. Ces effets athermiques sont très complexes à étudier et ne se traduisent pas par un échauffement des tissus mais sont liés à une modification du potentiel de membrane et au transfert d'ions au travers de la membrane cellulaire. Ces effets sont également présents dans la gamme des radiofréquences. Dans la nature on distingue deux types de sources de champs électromagnétiques :

I.2.2.1 Sources d'origine naturelle

La plupart des champs électromagnétiques naturels ont une fréquence de 0 Hz : ce sont des champs statiques, tels que le champ magnétique terrestre qui oriente l'aiguille aimantée de la boussole, et le champ électrique atmosphérique, qui peut atteindre des valeurs très élevées sous les nuages orageux et aux niveaux des pôles terrestres. Toutefois, d'autres sources naturelles produisent, quant à elles, des champs électromagnétiques qui varient dans le temps et dont certains ont une fréquence très élevée. On peut citer : l'électricité statique, la foudre et les rayonnements électromagnétiques à très haute fréquence THT.

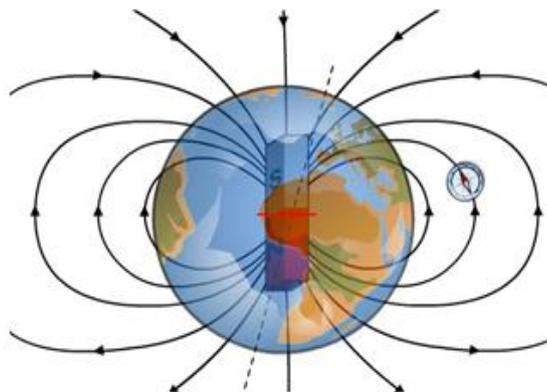


Fig.1.2 Champ électromagnétique terrestre assimilable a celui d'un dipôle

I.2 .2.1 Sources d'origine artificielle

Dans l'environnement électromagnétique de basse fréquence : Ce sont les réseaux de haute tension qui constituent la principale source de champ électrique, les appareils industriels et domestiques sont les principales sources des champs magnétiques comme le montre le (tableau I) ,qui représente les sources et les limites supérieures des champs ELF qu'on rencontre souvent dans l'environnement général, domestique et sur les lieux de travail [21] .

- **Dans l'environnement général** : L'énergie électrique en provenance des centrales est transportée jusqu'aux agglomérations par des lignes à haute tension. La tension est ensuite abaissée par des transformateurs auxquels se rattachent les lignes de distribution locale. Les CE et CB au-dessous des lignes aériennes peuvent atteindre respectivement 12 kV/m et 30 μ T. A proximité des centrales et des sous-stations, les champs électriques peuvent atteindre 16 kV/m et les champs magnétiques 270 μ T.
- **Dans l'environnement domestique** : Les intensités des champs électriques et magnétiques dans les habitations dépendent de nombreux facteurs ; de la distance aux lignes de transport, du nombre et du type d'appareils électriques utilisés, ou encore de la position et de la configuration des conducteurs électriques intérieurs. Les champs électriques au voisinage de la plupart des appareils domestiques ne dépassent pas 500 V/m et le champ magnétique est généralement inférieur à 150 μ T. Dans les deux cas, le champ peut être nettement plus élevé à proximité immédiate de l'appareil, mais il diminue rapidement avec la distance.
- **Dans l'environnement général Sur le lieu de travail** : les champs électriques et magnétiques existent autour du matériel électrique et des fils conducteurs dans tous les établissements industriels. Les travailleurs chargés de l'entretien des lignes de transport et de distribution de courant peuvent être exposés à des champs très importants. A l'intérieur des centrales et des sous-stations, les champs électriques peuvent dépasser 25 kV/m et les champs magnétiques 2 mt. Les

soudeurs peuvent être exposés à des champs magnétiques atteignant 130 mT. Près des fours à induction et des cuves d'électrolyse, les champs magnétiques peuvent atteindre 50 mT. Les employés de bureau sont exposés à des champs beaucoup moins intenses lorsqu'ils utilisent des photocopieuses, des écrans vidéo ou d'autres matériels analogues.

I.2.3 Propriétés du champ électromagnétique

De façon générale, les propriétés du champ électromagnétique diffèrent beaucoup en fonction de la distance à la source de rayonnement, de la longueur d'onde, des caractéristiques de la structure rayonnante et de l'environnement. On distingue trois zones autour d'une source d'émission ou d'une structure rayonnante [24] et [25].

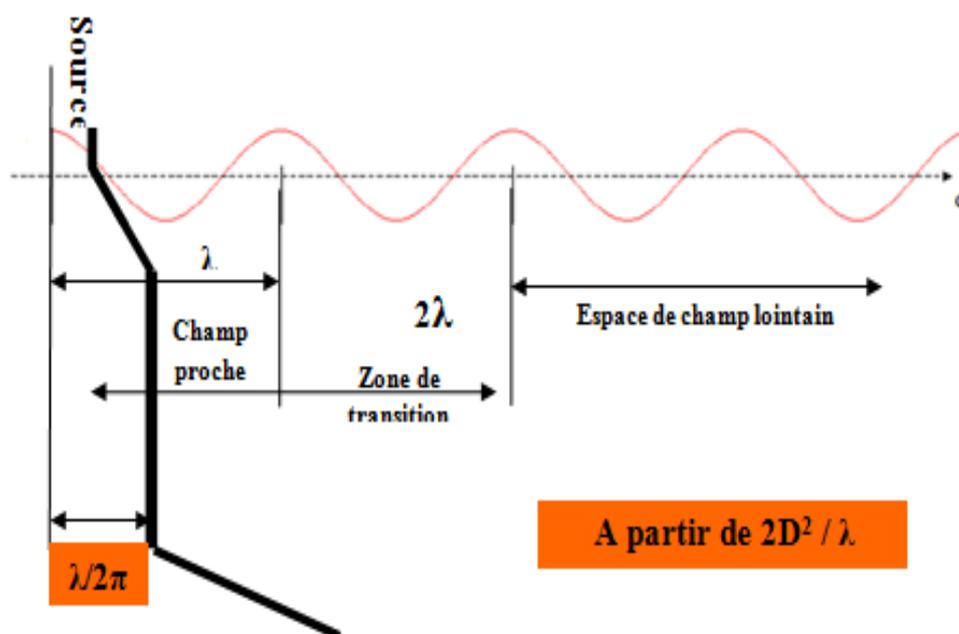


Fig. I.3 Propagation du champ électromagnétique en fonction de la longueur d'onde de la source [24]

► **La zone de champ (Rayleigh)**

Située à une fraction de la longueur d'onde de la source, généralement entourant immédiatement la source ou la structure rayonnante, appelée aussi zone d'évanescence ou de Rayleigh. Les modules des champs y sont très simplement reliés par l'impédance de l'onde dans le vide Z_0 . Seules les composantes transverses dominent. Cette zone est aussi caractérisée par la prépondérance d'une puissance active rayonnée. Le seul cas de proximité en zone de champ très proche pour les personnes est le téléphone portable où l'antenne se trouve à très faible distance de la tête ou du corps. C'est un cas où la mesure du débit d'absorption spécifique est plus pertinente que la seule mesure du Champ électrique extérieur.

► **La zone de transition, ou région de Fresnel :**

Qui assure la transition entre la zone de Rayleigh et la zone suivante, appelée zone de champ lointain. Dans cet espace, situé un peu plus loin autour de la structure rayonnante, le phénomène de propagation commence à apparaître mais on dit que l'onde n'est pas encore formée car les composantes radiales sont encore majoritaires [25] et [26].

► **La zone de champ lointain (Fraunhofer) :**

Région de Fraunhofer, où les propriétés du champ électromagnétique sont bien établies et où apparaissent les phénomènes classiques de propagation des ondes électromagnétiques. Cette région se situe généralement à plusieurs longueurs d'onde du périmètre de la structure avec un champ électromagnétique dont l'amplitude du vecteur champ électrique et magnétique diminue lorsque la distance à l'antenne augmente, et s'annule à l'infini.

I. 3 Champ électromagnétique de basse fréquence

Les champs électrique et magnétique font partie des rayonnements dits « non ionisants » : ils ne sont pas suffisamment énergétiques pour éjecter un électron d'un atome ou d'une molécule. Dès lors que des charges électriques sont en mouvement, apparaît un champ électromagnétique variable dans le temps [20] et [27]. Ce phénomène est formé de 2 ondes liées (figure I.1): une onde électrique (OE) et une onde magnétique (OH) qui se déplacent ensemble à la vitesse de la lumière et qui sont caractérisées par une fréquence et une longueur

d'onde. La fréquence f est le nombre d'oscillations de l'onde par unité de temps, mesuré en hertz (1 Hz = 1 cycle par seconde). La longueur d'onde λ est la distance parcourue par l'onde, pendant la durée d'une oscillation (ou d'un cycle). Les champs liés au transport de l'énergie électrique sont des champs d'extrême basse fréquence. Ce qui nous donne une énergie de 2.10^{-13} eV en théorie de propagation. Ce régime est atteint dans le cas du 50 Hz lorsque l'on se situe à 6000 km de la source. En pratique, ces champs se découpent en champ électrique (CE) et magnétique (CB) et agissent indépendamment l'un de l'autre et sont mesurés séparément.

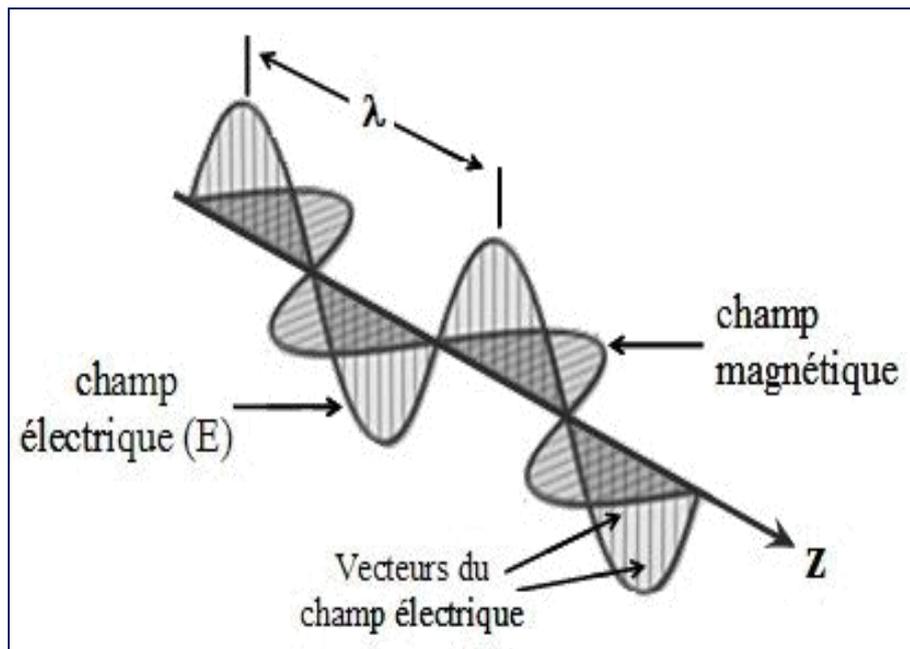


Fig. I.4. Ondes électromagnétiques basse fréquence

I.3.1 Les champs électromagnétiques générés par les lignes HT

Les lignes de transport d'énergie électrique haute tension sont des sources d'énergie électromagnétique, lors de leur fonctionnement elles produisent de l'énergie rayonnante (radiations) et de l'énergie non rayonnante (champs). La fréquence des lignes à haute tension (50 ou 60 Hz) est si faible que l'élément rayonnant est presque négligeable [28]. Par conséquent les lignes hautes tensions peuvent être considérées comme produisant des champs électrique et magnétique uniquement et qui constituent le sujet de notre travail.

I.3.1.1 Rappel sur les lignes électriques HT

Ces lignes sont composées de 3 phases. Chaque phase peut être constituée d'un faisceau de plusieurs conducteurs espacés de quelques décimètres facilitant ainsi le transport de l'énergie. L'avantage du triphasé est que la somme des tensions et la somme des courants sur l'ensemble des trois phases est égale à zéro. Ceci a pour effet de diminuer le champ électrique et magnétique quand on s'écarte des phases. Le transit de l'électricité par les lignes est toujours accompagné par la présence :

- d'un champ électrique (CE) qui est lié à:
 - La tension.
 - La proximité des autres phases, du (des) câble(s) de garde, de la terre ou tout objet à proximité.
 - La configuration de la ligne (380kV, 220kV, ...).

- d'un champ magnétique (CM) qui est lié à :
 - La valeur du courant circulant dans les conducteurs.
 - La configuration de la ligne.

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

I.3.1.2 Champ Electrique Rayonné

Le champ électrique apparaît dans les lignes de transmissions s'il ya des tensions dans les phases des lignes et ne dépend pas du courant électrique qui les traversent. S'il ya des courants dans les conducteurs, en plus du champ électrique, un champ magnétique est formé autour de la ligne de transmission. L'intensité du champ électrique dépend de la disposition géométrique des conducteurs et de la valeur de la tension appliquée, elle diminue avec l'éloignement par rapport à la source. Tenant compte que le potentiel électrique à la surface du sol est nul, il est préférable de mesurer le champ électrique à une hauteur aussi élevé que possible par rapport au sol.

L'intensité du champ électrique produite par les lignes hautes tensions dépend des facteurs suivants [29]:

- La distance entre les conducteurs et le sol.
- L'espacement entre les phases si nous avons deux circuits l'un à côté de l'autre ainsi que la configuration géométrique des conducteurs.
- Par le milieu environnant (si nous avons grand objet à proximité comme les arbres, Clôtures, etc.).
- La distance tangentielle à l'axe de la ligne de transmission.
- L'altitude du point de mesure par rapport à la terre et la tension de la ligne.

I.3.1.3 Champ Magnétique Rayonné

Le champ magnétique dépend aussi des positions géométriques du point de mesure, de la distance qui sépare les phases des lignes et de leurs hauteurs géométriques par rapport au sol ; il ne dépend pas du niveau de tension mais il est directement proportionnel au courant transporté par la ligne. Le champ magnétique varie beaucoup plus avec la variation de la charge de la ligne et il est affecté par plusieurs facteurs :

- Les intensités des courants qui circulent dans les conducteurs (généralement les lignes haute tension transportent un courant moyen de 700 A).
- La garde au sol de la ligne ; nous pouvons remarquer que l'intensité du champ magnétique est maximale sous les conducteurs et diminue rapidement avec l'éloignement de la distance à l'axe du pylône.
- L'espacement des conducteurs par rapport à l'axe du pylône ainsi que la transposition des phases diminuent le champ magnétique. Par exemple, pour une ligne "non transposée" si les phases des deux côtés de la ligne sont dans le même ordre de haut en bas, nous avons un champ magnétique qui diminue avec l'inverse du carré de la distance de la ligne. Alors que pour les lignes "transposée" les permutations des phases des deux cotés de la ligne donnent

une réduction du champ magnétique qui est inversement proportionnelle au cube de la distance.

I.3.2 Niveaux de champs rayonnés

Le champ magnétique 50 Hz des réseaux électriques est proportionnel au courant parcourant les conducteurs, en s'éloignant des conducteurs il décroît rapidement de manière inversement proportionnelle avec la distance. En ce qui concerne les appareils électroménagers, leurs champs décroissent de manière similaire. Le champ électrique des réseaux électriques décroît aussi rapidement lorsque l'on s'éloigne des câbles.

Les tableaux (I-2 et I-3) donnent les ordres des grandeurs des intensités de champs rayonnés par les lignes hautes tension et certains appareils domestiques [23] et [30].

Ordres de grandeur des champs électromagnétiques des lignes aériennes		
Champs des Lignes aériennes	Champ électrique (V/m)	Champ magnétique (μT)
400 kV	(1) – 5000	(1) – 30
	(2) – 2000	(2) – 12
	(3) – 200	(3) – 1.5
225 kV	(1) – 3000	(1) – 20
	(2) – 400	(2) – 03
	(3) – 40	(3) – 0.3
90 kV	(1) – 1000	(1) – 10
	(2) – 100	(2) – 01
	(3) – 10	(3) – 0.1
20 kV	(1) – 250	(1) – 06
	(2) – 10	(2) – 0.2
	(3) – négligeable	(3) – négligeable
230 kV	(1) – 09	(1) – 0.4
	(2) – 0.3	(2) – négligeable
	(3) – négligeable	(3) – négligeable
(1)- sous la ligne ; (2)- à 30m de l'axe ; (3)- à 100m de l'axe		

Tableau 1. 1 : Niveaux de champs électromagnétiques rayonnés par les lignes aériennes [23]

Champ magnétique moyen rayonnés par certains appareils domestiques	
Source de champ magnétique	Induction magnétique
Téléviseurs	0.2 μ T à 60 cm
	0.7 μ T à 30 cm
Sèche-cheveux	0.1 μ T à 30 cm
	30 μ T à 615 cm
Fer à repasser	0.1 μ T à 30 cm
	0.8 μ T à 15 cm
Ecran de micro-ordinateur	0.5 μ T à 30 cm
	1.4 μ T à 15 cm

Tableau 1. 2 : Niveaux de champs électromagnétiques rayonnés par des appareils domestiques [31].

I.4 Contexte normatif :

Les premières recommandations pour limiter l'exposition humaine aux radiations électromagnétiques non ionisantes remontent aux années 50. Exactement en 1953 aux Etats-Unis une limitation de la densité de puissance du champ électromagnétique à 10 mW/cm². Cette limitation concernant la bande HF (10MHz -10GHz). Dans la même période, l'URSS a établi des normes beaucoup plus restrictives, la limite de la densité de puissance du champ électromagnétique est de 10 μ W/cm². Les normes américaines et russes étaient basées sur deux approches opposées (modèle thermique pour les américains et modèle non thermique pour les soviétiques)

En 1966, le premier standard ANSI C95.1-1966 a été formalisé par l'U.S.Navy et l'IEEE à partir des recommandations de 1953. Des limitations sur $\|\vec{E}\|^2$ et $\|\vec{H}\|^2$ ont été introduites en 1971 et le taux d'absorption spécifique (SAR) en 1982. La quatrième édition du standard (IEEE C95.1-1991) introduit des limitations sur les courants induits. Les éditions de 1999 et 2002 de ce standard sont : IEEE C95.1-1999 des limitations pour la bande 3KHz- 300GHz, et IEEE C95.6-2002 pour la bande 0-3KHz. Le dernier standard IEEE C95.1-2005 porte sur les

limites d'expositions humaines au champ électromagnétique de radiofréquences de 3KHz-300GHz.

I.4.1 Normes des champs électromagnétiques de basses fréquences

Les valeurs limites d'exposition adoptées par le Conseil de l'Union européenne en 1999 résultent d'un long processus qui prend son origine dans le travail de groupes d'experts. Des recommandations ont été établies par des comités de scientifiques et d'ingénieurs d'origine universitaire, industrielle et gouvernementale. Les plus connues sont celles de l'OMS, l'IEEE de 1991 et de l'ICNIRP en 1998 [21], [3] et [4].

Les risques de l'exposition aux champs électromagnétiques en général et plus particulièrement les basses fréquences (50-60 Hz) sont évaluées à partir d'une revue exhaustive de la littérature sur leurs effets avérés à court terme. Sur cette base scientifique, l'établissement de valeurs limites d'exposition part des effets considérés, à un moment donné, comme les plus sensibles (c'est-à-dire qui apparaissent au plus bas niveau d'exposition testé, et qui sont jugés pertinents d'un point de vue sanitaire). À cette valeur est appliqué un ensemble de coefficients d'abattement destinés à prendre en compte les incertitudes et à disposer d'une certaine 'marge de sécurité'. Des réévaluations de ce corps de connaissances, et des recommandations des valeurs limitent d'exposition qui en découle, sont régulièrement pratiquées.

I.4.1.1 Restrictions de base

Les restrictions d'exposition sont fondées sur les effets avérés sur la santé et sont dénommées restrictions de base. Selon la fréquence du champ, les grandeurs physiques utilisées pour spécifier les restrictions de base à l'exposition aux champs électromagnétiques sont la densité de courant (J), le (DAS) et le (SAR).

Pour que la protection contre les effets défavorables sur la santé soit assurée, il faut que ces restrictions de base ne soient pas dépassées. A la fréquence de 50 Hz, l'ICNIRP a établi des restrictions de base sur la densité induite dans le corps humain. Pour des niveaux de densité de courant induit supérieurs à 100 mA. m⁻², il y a dépassement des seuils d'altération aiguë de

l'excitabilité du système nerveux central et d'autres effets aigus tels que l'inversion du potentiel évoqué visuel.

Compte tenu des principes de sécurité rappelés ci-dessus, il a été décidé que, pour les fréquences du domaine compris entre 4 Hz et 1 kHz, il convient de limiter l'exposition professionnelle à des champs induisant des densités de courant inférieures à 10 mA. m⁻², autrement dit de prendre un facteur de sécurité de 10. Pour la population générale, on applique un facteur supplémentaire de 5, ce qui donne une restriction de base à l'exposition de 2 mA. m⁻². Au-dessous de 4 Hz et au-dessus de 1 kHz, la restriction de base à la densité de courant induit augmente progressivement, ce qui correspond à l'élévation du seuil de stimulation nerveuse dans ces domaines de fréquences.

I.4.1.2 Niveaux de référence

Les niveaux de référence sont obtenus à partir des restrictions de base par modélisation mathématique et extrapolation des résultats de recherches en laboratoire pour des fréquences spécifiques. Ces niveaux sont donnés pour les conditions de couplage maximal du champ à la personne exposée, assurant ainsi une protection maximale. Dans ce but plusieurs formulations ont été développées dans le régime quasi-statique [32] et [30] pour la modélisation des mécanismes de perception des champs électromagnétiques par le corps humain et le calcul des densités de courant induites dans ce dernier.

Le respect des niveaux de référence assure normalement la conformité aux restrictions de base. Si les valeurs mesurées sont supérieures aux niveaux de référence, il ne s'ensuit pas nécessairement qu'il y ait dépassement des restrictions de base une analyse détaillée est nécessaire pour savoir si les restrictions de base sont respectées ou non.

Dans ce but il convient d'envisager séparément et non de façon cumulative les niveaux de référence pour les champs électriques et les champs magnétiques. En effet, du point de vue de la prévention, les courants induits par les champs électriques et les champs magnétiques ne se cumulent pas. Dans ce cas il est prévu que les niveaux de référence soient des valeurs moyennées dans l'espace pour l'ensemble du corps de la personne exposée simultanément à des champs électriques ou magnétiques, sous la réserve expresse que les restrictions de base pour l'exposition locale ne soient pas dépassées.

I.4.2 Le standard IEEE C95.1-1999

L'édition de 1999 du standard américain [3] porte sur la bande de fréquence 3KHz-300GHz. La discussion qui suit est limitée à la bande qui nous concerne (basses fréquences), 3KHz-1M. Ce standard fait la distinction entre environnements contrôlés, et non contrôlés. C'est-à-dire l'exposition à des rayonnements élevés notamment dans les lieux de travail.

Tous les autres endroits sont considérés non contrôlés. Les grandeurs électriques prises en considération sont:

- Le champ électrique $\|\vec{E}\|$
- Le champ magnétique $\|\vec{H}\|$
- Le courant I , mesuré à travers chaque pied
- La densité de courant $\|\vec{J}\|$
- La puissance rayonnée P
- Le taux d'absorption spécifique SAR

Le tableau I-4 présente les limites d'exposition maximales pour le champ électrique, le champ magnétique, le champ électrique et le courant électrique.

Fréquence [MHz]	Champ électrique [$V m^{-1}$]	Champ magnétique [Am^{-1}]
0.003-0.1	614	163
0.1-3.0	614	16.3/ f
Courant [mA]		
0.003-0.1	1000 f	
0.1-100	100	

Tableau 1-3 : Limites d'exposition maximales [3]

I.4.3 Les recommandations ICNIRP

Les recommandations du comité international de protection contre les rayonnements non ionisants [4] portent sur la bande de fréquence 1Hz-300GHz. Une distinction est faite entre l'exposition dans un cadre professionnel et le grand public. Des restrictions (tableau5) portent sur les grandeurs physiques suivantes:

- La densité de courant J , jusqu'à 10MHz
- Le taux d'absorption spécifique SAR, à partir de 100KHz.

Les valeurs limite reportées dans le Tableau (I-5), sont à comparer avec des grandeurs moyennées. Dans le cas du SAR, il faut considérer la valeur moyennée dans le temps sur 6 min, et dans l'espace sur une masse de 10g de tissu. Pour la densité de courant, il faut d'abord moyenniser sur une surface de 1 cm^2 normale à J , et ensuite considérer la valeur quadratique moyenne sur un temps de 6 min.

Fréquence [Hz]	SAR [Wkg^{-1}]	Densité de courant [mA m^{-2}]
0-1 Hz	-	40
1-4 Hz		40/ f
4 Hz - 1kHz		10
1-100 kHz	-	f/100
	0.4 Globale	
0.1 – 10 MHz	10 tête, thorax et ventre 20 bras, jambes	f/100

Tableau 1. 4 : Restrictions de base [4]

I.5 Problématique de l'étude et bibliographie récente

Nous avons exposé dans les paragraphes précédents un aperçu sur l'état de l'art en matière d'exposition aux CEM émanant des lignes de transport de l'énergie électrique, en mettant l'accent sur la problématique de l'exposition professionnelle aux champs CE et CB rayonnés

par les systèmes énergétique Multi –Line présentant différentes géométries et différentes gammes de tensions. La caractérisation analytique et expérimentale des niveaux de champs rayonnés dans et autour des installations électriques dans la transmission et la distribution de l'énergie électrique constitue l'un des principaux problèmes en matière de normes sur la compatibilité électromagnétique et sur l'exposition professionnelle aux radiations non ionisantes. Cette problématique a fait l'objet de plusieurs travaux.

En ce qui concerne la mise en place des moyens de calcul et de réduction des champs électromagnétiques générés par les lignes haute tension, l'**EPRI** (Electric Power Research Institute) a développé plusieurs travaux de recherche qui ont été publiés en trois manuels (livre bleu) dans les quels en plus des techniques de réduction des champs émanant des lignes électriques on trouve une mise en œuvre de logiciels qui aident à étudier la performance des lignes électriques et de programmes rapides d'évaluation des risques relatifs à l'exposition aux champs électromagnétiques.

Plusieurs études portant sur des mesures expérimentales des intensités de CEM sous des circuits de lignes simple et double situées dans des couloirs parallèles et à l'intérieure des postes électriques HT, avec pour objectif essentiel l'implantation des normes imposées par l'ICNIRP aussi bien dans les lieux de travail et que l'exposition du public [33], [34], [35],[36],[37],[38], [39], [41], [42]. Dans le même contexte **O.Kilgour** [20] du laboratoire de radiation de new Zélande a préparé en collaboration avec le ministère de la santé un rapport technique pour répondre à la préoccupation du public envers les champs électromagnétiques de basse fréquence. L'investigation expérimentale a été conduite sous un circuit de lignes doubles de tension 60Kv fonctionnant en parallèle ; les intensités de champs relevées étaient bien dans les normes établies par l'ICNIRP [22].

Ralf Müller [43] explique la procédure expérimentale pour le sondage des champs électromagnétiques sous les lignes haute tension. La démarche consiste dans un premier lieu en l'étalonnage du mesureur de champ à fin de garantir une bonne précision dans les mesures relevées. La technique de mesure la plus adéquate consiste à utiliser des sondes unidirectionnelles pour mesurer le champ dans les trois directions orthogonales, l'intensité de champ résultant est obtenue comme étant la superposition des trois intensités mesurées. Il proposait aussi la méthode des sondes tridimensionnelles pour mesurer directement le champ

résultant tout en faisant tourner le capteur dans un champ uniforme. Les résultats de mesures selon les deux techniques sont presque les mêmes et les erreurs sont relativement faible.

En ce qui concerne la caractérisation des CEM générés par les postes électriques haute tension qui sont généralement localisés dans des agglomérations urbaines et dans lesquels exercent des ouvriers qui assurent des activités d'entretien, de mesure et de dépannage, on peut citer le travail réalisé par **Victor Angelo** au philippine [44], qui a réalisé une caractérisation expérimentale du champ magnétique dans un poste électrique 100 MVA. La Surface du poste a été divisée en de petites sections et les mesures ont été effectuées en des points intérieurs. Les endroits présentant de fortes intensités de champ magnétique on été localisés par une représentation graphique. Les valeurs minimales, moyennes et maximales mesurées étaient bien en dessous des valeurs limites admissibles.

Sur le même thème le ministère de l'environnement de Katar a étudié en coordination avec et la société d'électricité **Kahramaa** les risques d'exposition aux CEM émanant des postes électriques HT situés dans les zones urbaines. Les niveaux de champs mesurés autour des clôtures des postes et dans les salles de contrôle sont présentés en 3D sur une carte du plan du poste. à fin de pouvoir localiser facilement les zones présentant de fortes intensités de champ magnétique. Les résultats de mesures ont été comparés avec les normes internationales.

D'autres études portant sur l'élaboration de codes mathématiques développés pour le calcul analytique des CEM rayonnés par les des lignes hautes tensions de différentes configurations ; a fin de valider leurs modélisation numérique et d'analyser le degré de conformité des intensités de champs calculées avec les normes internationales [45],[46],[47],[48],[49],[50],[51],[52].

En ce qui concerne la simulation tridimensionnelle des CEM le travail réalisé par **Kay Hameyer** [53] porte sur l'évaluation de la distribution des quantités de charges électriques et magnétiques sous les lignes haute tension.une étude comparative entre la méthode semi numérique basée sur les lois d'électrostatiques et celle des éléments finis basée sur des conditions aux limites spécifiques au domaine de résolution a été faite , Les résultats obtenus par les deux techniques ont été comparées pour la vérification des Intensités de champs obtenus.

On peut aussi citer deux autres études portant sur des aspects différents : la première réalisée par **C.L.Antunes [54]**, ce dernier a fait une approximation analytique de la variation du champ magnétique avec la distance pour tracer la zone de servitude pour deux lignes haute tension (60Kv et 90Kv) conformément aux normes sur les intensités de champ magnétique établies par l'organisation mondiale de protection contre les rayonnement non ionisant et les a comparées avec celles administratives utilisées au **Portugal**. La deuxième étude réalisée par **C. Hender [55]** a permis de discuter l'influence et l'impact écologique des lignes haute tension sur l'environnement. L'auteur a présenté une analyse des effets écologiques et biologiques des quantités de champs électriques et magnétiques générés par les lignes de transport de l'énergie électrique permettant de les classées comme sources principales de pollution électromagnétique.

Sur un autre thème, plusieurs travaux de recherches ont été réalisés dans le but de définir les mécanismes d'action des CEM basse fréquence sur la santé humaine.

Dans son travail **JL Lilien [56]** a conduit une campagne de mesure des champs magnétiques sous les lignes haute tension en Belgique pour montrer que l'origine la plus vraisemblable de problèmes potentiels sur la santé humaine est liée au courant de contact et non pas au champ magnétique et électrique ambiant à 50 HZ. Cette suggestion a été controversée par les résultats de mesure qui donnent une corrélation très limitée entre les courants de contact et les champs magnétiques mesurés.

La modélisation de l'exposition aux CEM a fait aussi l'objet de plusieurs travaux de recherche. Cette modélisation est généralement basée sur le développement de formulation appropriée aux différents cas d'application. Les travaux de recherche publiés **[30] et [32]** présentent des développements de formulations diélectriques et magnétiques qui permettent de calculer séparément les phénomènes induits dans le corps humain par effet inductif (champ H) et par effet capacitif (champ E).

En Algérie : les études des corrélations CEM des Lignes HT avec l'environnement ne sont pas abondants, malgré que notre payé dispose d'un maillage de postes électriques dense, et dans lequel les ouvriers sont exposés a la pollution électromagnétique. La recherche bibliographique sur les travaux nationaux sur le thème CEM générés par les lignes haute tension a permis de retrouver :

- **Dib Djallel et all [57]** ont étudié en 2014 l'influence des CEM des lignes électrique HT sur l'environnement et la santé humaine. Il a présenté une modélisation et simulation des champs CE et CB émanant de ligne HT qui traversent des agglomérations depuis 50 ans dans la ville de Tébessa. Les résultats analytiques et numériques obtenus ont servit pour recommander des solutions pour réduire la pollution électromagnétique dans la ville et le danger permanent d'exposition publique.

- **Bendakir et col Jijel [58]** ont étudié en 2009 les CEM transitoires émis par les postes THT-HT aériens avec des structures rayonnantes courtes (jeux de barres) situés dans des zones urbaines. Dans le but d'éviter ou atténuer certains effets gênant ou dangereux sur l'agglomération, l'auteur a exposé au concepteur et a l'exploitant un code de calcul de ces champs basé sur la méthode des dipôles.

- **R.Djekidel et col [59]** de l'université de Laghouat ont investie en 2014 l'évaluation précise de l'impact environnementale des champs électromagnétiques d'extrême basse fréquence produit par les lignes électriques aériennes. Ce travail présente une méthodologie de simulation pour analyser la distribution du champ électrique sous une ligne haute tension de 400 kV et étudier les moyens de réduction de l'exposition basse fréquence par la technique des écrans.

- Notre équipe du laboratoire LGEG a aussi publié en 2011 **W.TOURAB et col [60]** un travail portant sur la même thématique. Une investigation expérimentale a été conduite à l'intérieur du poste électrique d'interconnexion El-Hadjar sous un circuit de trois lignes 220kVet 90Kv. Les mesures expérimentales ont été effectuées dans un espace libre sous les lignes HT conformément aux normes IEEE et les intensités de champs relevées ont été comparées aux normes internationales publiées par l'ICNIRP révisées et publiées en 2010

A l'est Algérien : L'un des plus puissant postes électriques est celui d'El-Hadjar, ce dernier assure l'interconnexion entre l'Algérie et la Tunisie. Ce poste est caractérisé par une large gamme de tension et son emplacement dans une zone urbaine ou s'active un effectif pléthorique d'ouvriers concernés par cette exposition, qui a constitué notre population d'étude dans ce travail. Pour cela nous avons procédé à une estimation de l'exposition professionnelle à l'intérieur de ce poste, par contrôle de la pollution électromagnétique dont le taux .est mesuré par les niveaux de champs rayonnés.

Notre méthodologie a consisté en une caractérisation expérimentale et théorique de l'environnement électromagnétique sous un circuit de lignes double 220 Kv, implanté dans le poste. L'investigation expérimentale a été réalisée au moyen d'un mesureur de champ du type PPM840 conformément aux normes IEEE [3]. Par la suite nous avons procédé à une validation des résultats expérimentaux par modélisation analytique. Les intensités de champs relevées ont été comparés aux normes internationales imposées par l'organisation mondiale de protection contre le rayonnement non ionisants INCRIP [4].

Notre étude a modestement contribué à l'estimation de l'exposition professionnelle à l'intérieur du poste électrique El-Hadjar en vue de :

- Créer une base de données concernant la caractérisation expérimentale des CEM à proximité des lignes qui sera mise à la disposition des partenaires concernés.
- D'informer et sensibiliser les usagers et les décideurs sur les risques liés à l'exposition basse fréquence à l'intérieur des postes électrique HT.
- De mettre en place des moyens de prévention et de sécurité des ouvrier du poste qui assurent des taches spécifiques à des hauteurs approchant les phases des lignes pour de longues durées.

1.6 Conclusion

Dans ce premier chapitre du manuscrit nous avons évoqué les connaissances et l'état de l'art en matière d'exposition aux champs électromagnétiques basse fréquence. Nous avons procédé à un classement des différentes sources de rayonnement électromagnétique dans le spectre de fréquence avec une attention particulière à ceux d'extrême basse fréquence générés par les lignes de transport énergétique (domaine de notre étude).

Nous avons rapporté les données du contexte normatif concernant l'exposition basse fréquence et énumérer les différents organismes et institution de législation des normes.

Nous avons exposé les principales études internationales existante sur le thème "caractérisation de l'environnement électromagnétique au voisinage des lignes haute tension", avec une attention particulière à celles implantées dans les postes électriques. et signaler les quelques travaux Algériens sur le sujet.

Enfin nous avons expliqué l'originalité de notre travail, sa méthodologie, son but et sa portée pratique dans le domaine de la compréhension et la prévention de l'exposition surtout professionnelle dans la région d'Annaba.

Chapitre II

Problématique des interférences des champs électromagnétiques des basses fréquences avec l'environnement

Sommaire

II. Problématique des interférences des CEM BF avec l'environnement

II.1 Introduction

II.2 Compatibilité électromagnétique

II.2.1 Mécanisme d'action des perturbations électromagnétiques

II.2.2 Modes de couplages

II.2.3 Comportement des sources électromagnétiques

II.3 Mécanismes d'interaction CEM basse fréquences corps humain

II.3.1 Mécanismes de couplage direct

II.3.1.1 Couplage avec un champ électrique

II.3.1.2 Couplage avec un champ magnétique

II.3.1.3 Absorption de l'énergie électrique

II.3.2 Mécanisme de couplage indirect

II.4 Effets des champs électromagnétiques basse fréquence sur la santé humaine

II.4.1 Les effets avérés

II.4.2 Les effets potentiels

II.4.2.1 Etudes épidémiologiques

II.4.2.2 Etudes expérimentales

II.5 Dosimétrie et formulations quasi-statique

II.5.1 Dosimétrie en basse fréquence

II.5.2 Formulations quasi-statique en basse fréquence

II.5.2.1 Formulations diélectrique pour la simulation de l'exposition à un CE

II.5.2.2 Formulations diélectrique pour la simulation de l'exposition à un CB

II.6 Conclusion

II.1. Introduction

Dans ce chapitre nous présenterons les différents paramètres qui interviennent directement dans ces interférences, ainsi, nous citerons : au 1^{er} paragraphe nous aborderons la problématique des interférences des champs basse fréquence avec le milieu environnant qui relève d'un problème typique de compatibilité électromagnétique(CEM), puis nous abordons les règles générales de la CEM, basées sur l'explication des différents mécanismes de transfert entre les sources de ces champs et les paramètres environnementaux pris en considération (victime).

Les aspects relatifs aux effets des champs électromagnétiques sur la santé feront l'objet respectivement des paragraphes 5 et 6. La dosimétrie en basse fréquence ainsi que les formulations quasi-statiques pour la simulation de l'exposition aux champs électriques et magnétiques seront évoqués dans la dernière partie de ce chapitre qui se termine par une référence bibliographique de quelques travaux récents.

II.2. Compatibilité électromagnétique

La compatibilité électromagnétique (CEM) : Est une science relativement récente en tant que telle. Elle représente une technique qui permet de rendre compatible deux appareils fonctionnant ensemble dans un milieu donné [61], [62], et [63]. Ainsi, la directive (CEM 89-336-CEE), définit la Cem comme étant : « L'aptitude d'un dispositif, d'un appareil ou d'un système à fonctionner dans son environnement de façon satisfaisante et sans produire lui-même des perturbations électromagnétiques intolérables pour tout ce qui se trouve dans son environnement ». Ainsi la CEM repose sur deux concepts :

- **L'Emissivité** : L'EMI (électromagnétique interférence) caractérise les émissions produites par un équipement électrique ou électronique et qui pourraient, en fonction de leur intensité, perturber d'autres équipements.
- **L'immunité** : elle représente l'aptitude d'un appareil à fonctionner correctement malgré l'influence des perturbations extérieures. Elle se caractérise par la susceptibilité électromagnétique (EMS) qui traduit l'inaptitude d'un dispositif à fonctionner dans cet environnement électromagnétique.

La compatibilité électromagnétique 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 jargon de la Cem. Dans le domaine de basse fréquence les lignes haute tension sont des sources d'énergie électromagnétique et demeurent le principal centre d'intérêt de notre étude.

II.2.1. Mécanismes d'action des perturbations électromagnétiques

Le principe d'action des perturbations électromagnétique est schématisé par le diagramme de la figure (I.1). Pour que se produise un phénomène de perturbation électromagnétique, trois éléments doivent être présents : une source de perturbations, un milieu de couplage et une victime des perturbations [25] et [64].

II.2.2. Modes de couplages

La compréhension du mécanisme d'interaction des champs électromagnétique avec son 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. En termes de Cem, on distingue principalement deux types de couplages :

➤ **Le mode de couplage galvanique (ou par conduction) :**

Ce mode de couplage se caractérise par le fait, que le signal perturbateur se propage de la source vers la victime par une liaison physique. Dans cette catégorie on distingue encore les perturbations conduites induites par couplage par impédance commune. Le signal est soit une tension soit un courant.

➤ **Le mode de couplage rayonné :**

Dans ce cas il n'existe aucune liaison physique entre la source et la victime. Le transfert d'énergie s'effectue par couplage capacitif, inductif ou par rayonnement. Selon la nature du couplage le signal perturbateur peut être un champ électrique, un champ magnétique ou une onde électromagnétique. L'interprétation de ces trois modes de couplage représentés sur

la figure (II.1) et étroitement liée au comportement général des sources de rayonnement électromagnétique qui est présenté au paragraphe suivant :

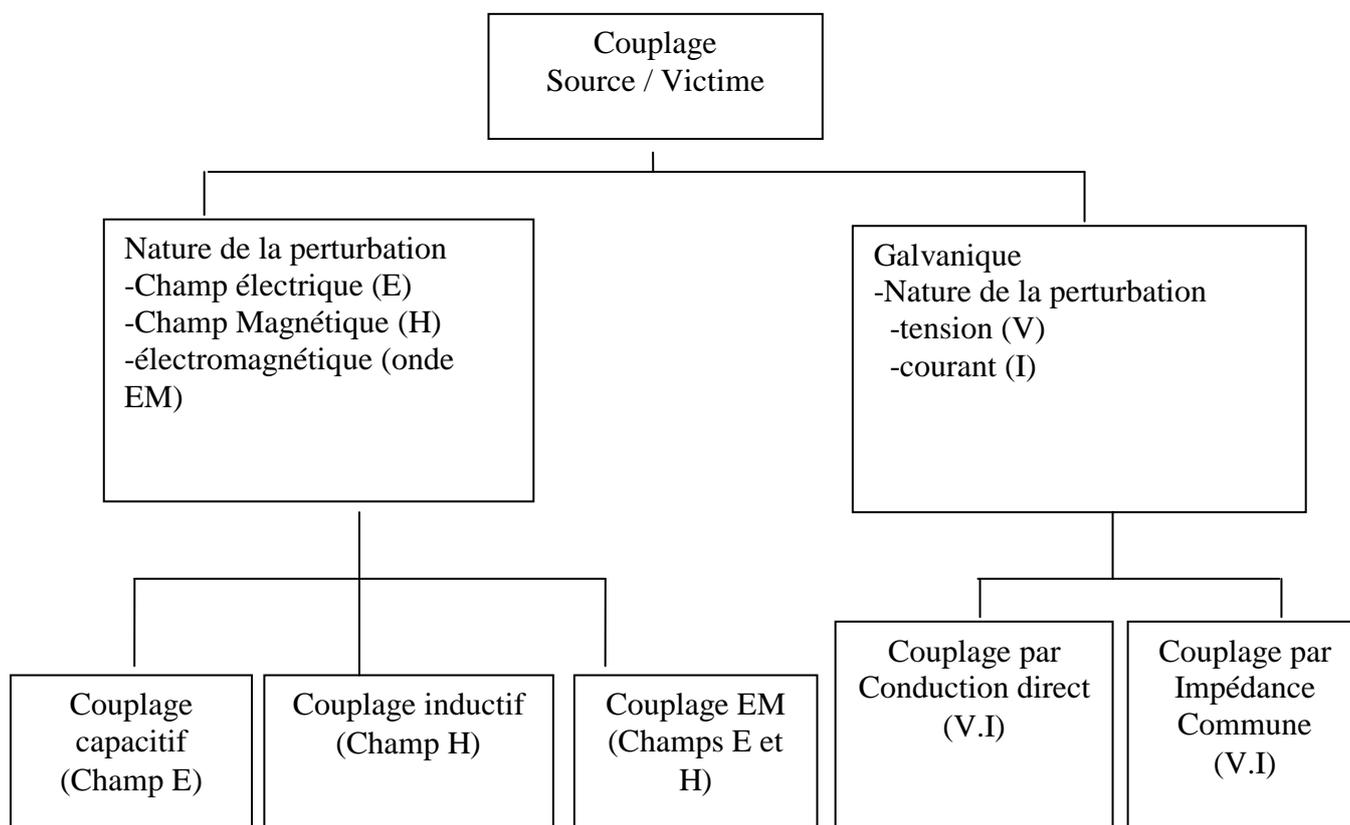


Fig. II.1. Modes de couplages électromagnétiques [8]

II.2.3. Comportement des sources électromagnétiques

D'une manière générale, la caractérisation d'une source relève de deux aspects :

- Le premier concerne les paramètres électriques tels que l'impédance d'entrée de la structure ou la fréquence de résonance, le rapport S/B. Ces paramètres sont importants dans le cas de la conception de structures dédiées à des applications précises (sondes de mesures, antennes radiofréquences...) et permettent une optimisation de la structure par rapport aux dispositifs se situant en amont de la structure.

- Le second aspect concerne l'étude du comportement électromagnétique de la structure qui consiste en la caractérisation du champ électromagnétique généré par cette dernière. Cet aspect est directement lié à l'évaluation des effets des interactions de la source avec le milieu victime.

Le comportement électromagnétique d'une source de rayonnement est principalement lié à la fréquence et à la distance d'observation de la source de rayonnement, relativement à la longueur d'onde, ce dernier paramètre étant également lié à la fréquence de l'onde [66], [25], [8] et [65]. Ainsi, la nature des champs d'exposition, et donc la nature des couplages entre une source et une victime sont variables selon la fréquence du signal source.

D'une manière générale, la détermination du champ électromagnétique produit par une source quelconque relève d'un problème relativement complexe. On peut cependant retenir un comportement commun à toutes les sources, en fonction de la distance (relativement à la longueur d'onde) entre la source électromagnétique et le milieu « cible ». Cette similitude se caractérise par le fait que le champ électromagnétique généré est la somme de trois contributions dont les amplitudes varient, en fonction de la distance r d'observation, proportionnellement à $\frac{1}{r}$, $\frac{1}{r^2}$ et $\frac{1}{r^3}$. Ces différentes contributions traduisent des échanges

d'énergies différents entre la source et la cible.

- Le terme en $\frac{1}{r}$ est le terme dit de rayonnement et correspond à un transfert d'énergie depuis la source.
- Le terme en $\frac{1}{r^2}$ est le terme d'induction et correspond à des échanges d'énergie réactive entre la source et le milieu environnant.
- Le terme en $\frac{1}{r^3}$ est le terme quasi-stationnaire et correspond à une accumulation de charges.

Ces contributions peuvent facilement être mises en évidence dans le cas des sources élémentaires qui constituent le dipôle électrique et le dipôle magnétique (figure II. 2). Le modèle du dipôle électrique élémentaire est constitué de deux charges ponctuelles $+q$ et $-q$ distantes d'une longueur « a ». La charge q varie en fonction du temps selon une loi sinusoïdale de fréquence f . Le modèle du dipôle magnétique oscillant est un circuit de forme circulaire, de rayon « a » et parcouru par un courant sinusoïdale de fréquence f .

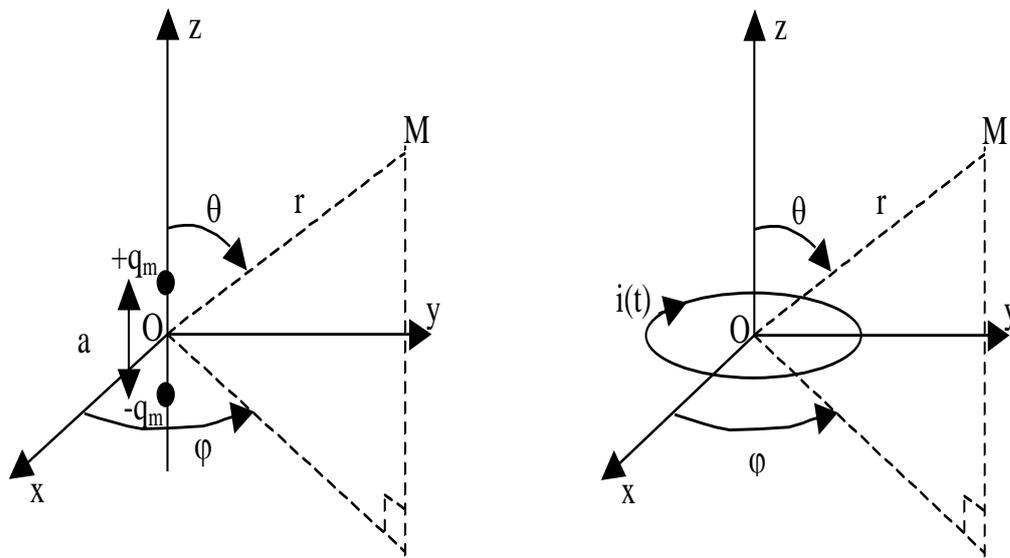


Figure. II.2. Dipôles électrique et magnétique oscillants [25]

La (figure II. 3) représente les variations des amplitudes normalisées des termes des champs électromagnétiques en fonction de la distance par rapport à la source (relativement à la distance définie par le rapport $(\lambda/2\pi)$).

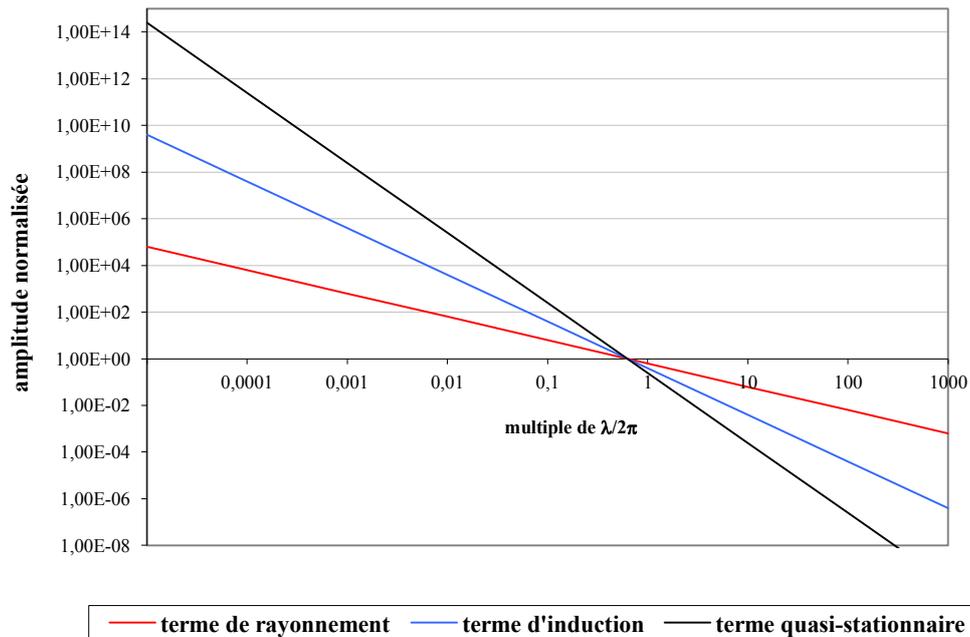


Fig.II.3. Variations relative des termes de rayonnement, D'induction et quasi stationnaire.

A la distance $r = \frac{\lambda}{2\pi}$ ces trois composantes sont d'amplitude égale. Au delà de cette limite

dite « de champ proche », les composantes d'induction et quasi-stationnaire deviennent rapidement négligeables devant la composante de rayonnement. Le champ électromagnétique est alors décrit par une onde plane indépendante de la géométrie de la source. Dans cette zone de rayonnement, l'impédance d'onde Z_0 définie par le rapport E/H tend vers une

constante $Z_0 = \sqrt{\frac{\mu}{\epsilon}}$ Qui ne dépend que des propriétés du milieu de propagation. Pour des

distances de l'ordre de $\lambda/2\pi$ les termes de rayonnement, d'induction et quasi-stationnaire sont du même ordre de grandeur et se traduisent par des échanges d'énergies complexes entre la source et la cible. Très proche de la source, le champ généré est essentiellement dû à sa composante quasi-stationnaire et la nature des interactions (électrique et/ou magnétique) est essentiellement liée à la forme et aux dimensions de la source et de la cible.

La (figure II. 4) montre les variations normalisées de l'impédance d'onde en fonction de la distance pour les deux sources élémentaires de la (figure II.2) .A grande distance de la source

(relativement à la longueur d'onde), cette impédance tend vers l'impédance d'onde du milieu de propagation indépendamment de la nature électrique ou magnétique de la source. Dans la zone de champ proche ($r = \frac{\lambda}{2\pi}$), l'impédance d'onde varie en fonction de la distance et de la nature de la source.

- Pour le dipôle magnétique cette impédance est très faible au voisinage de la source et augmente au fur et à mesure que l'on s'éloigne de la source, jusqu'à la limite de champ proche. Cette diminution de l'impédance d'onde au voisinage de la source est caractéristique d'un champ magnétique intense, et d'un champ électrique faible, et les interactions à attendre seront essentiellement dues à un phénomène de couplage inductif avec la cible.

- Pour le dipôle électrique, l'impédance d'onde est très élevée au voisinage de la source. Elle diminue avec la distance jusqu'à la valeur asymptotique correspondant à Z_0 . La valeur élevée de l'impédance d'onde au voisinage de la source est caractéristique cette fois d'un champ électrique élevé et d'un champ magnétique faible. Ainsi, dans ce cas, les effets prépondérants dans l'interaction entre la source et la cible, seront essentiellement dus à un couplage capacitif.

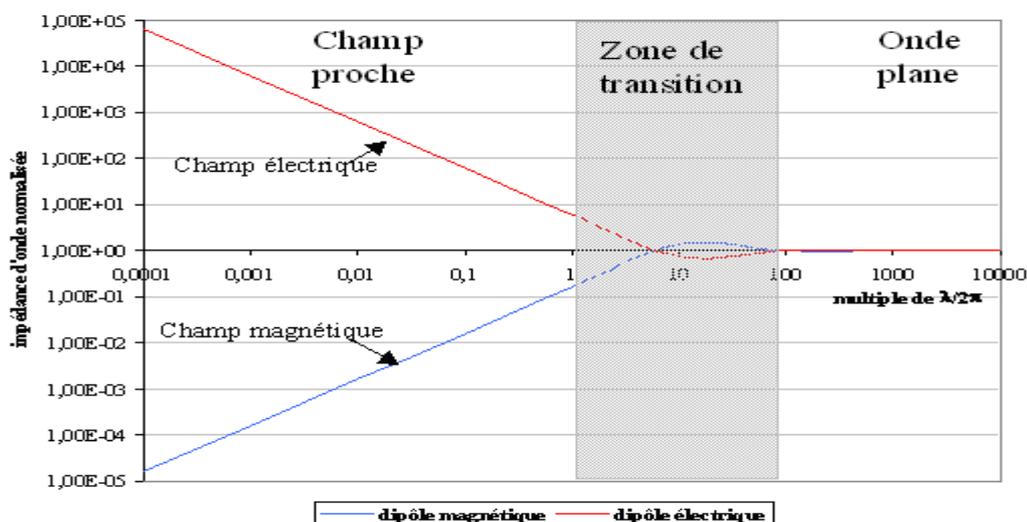


Fig. II.4. Variation de l'impédance d'onde normalisée en fonction de la distance normalisée par rapport à la source

Les différents aspects que nous venons d'évoquer, concernant le comportement général des sources électromagnétiques, entraînent plusieurs conséquences quand à la nature de leurs interactions avec l'environnement. La (figure II.5) montre les variations de la distance correspondant à l'a zone de champ proche, en fonction de la fréquence de la source. Dans l'air, cette distance est de l'ordre de 6000 km pour des fréquences correspondant au réseau de distribution de l'énergie (50 Hz et 60 Hz) et diminue jusqu'à quelques dizaines de centimètres pour les radiofréquences (~50 cm à 100 MHz).

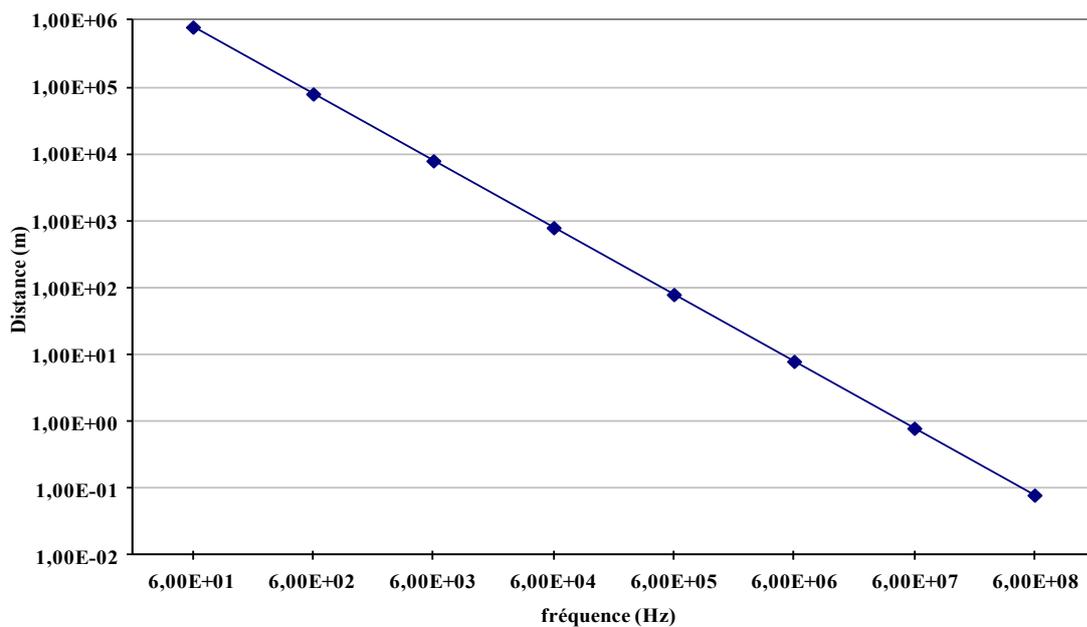


Fig. II.5 : variation de la distance correspondant la limite de champ proche
En fonction de la fréquence [8]

Dans la gamme de fréquence qui nous intéresse, les longueurs d'ondes sont très grandes devant les distances mises en jeu, et les interactions ont lieu essentiellement dans la zone de champ quasi stationnaire. Ainsi les interactions prépondérantes seront dues à un champ électrique ou à un champ magnétique.

II.3. Mécanismes d'interaction champs électromagnétiques basse fréquence corps humain

Les études jour montrent que les CEM ont un effet physiologique sur les milieux biologiques [67] et [68]. Lorsqu'un milieu biologique est soumis à des CEM, une interaction se produit avec les charges électriques du tissu ou de la cellule. Le résultat de l'interaction peut produire un effet biologique. L'être vivant peut être considéré globalement comme un ensemble de processus électriques en interaction avec des mécanismes biochimiques (figure II.6). Il résulte de l'exposition a des champs électromagnétiques, une induction de champ électriques associés a des courants induits qui interfèrent avec ceux qui existent naturellement dans l'organisme. L'ampleur et la répartition spatiale de ces champs varient selon que le champ extérieur est électrique ou magnétique, ses caractéristiques (fréquence, amplitude, d'orientation et de forme d'onde) et la taille, la forme et les propriétés électriques du corps exposé.

II.3.1 Mécanisme de couplage direct

C'est le mécanisme physique de base pour l'interaction des champs magnétiques ELF avec des tissus. Le champ électrique induit augmente avec la fréquence du champ extérieur et la taille de l'objet [23]. l'effet des champs induits au dessus d'un seuil bien établi est la stimulation de tissus excitable (systèmes nerveux et muscles).

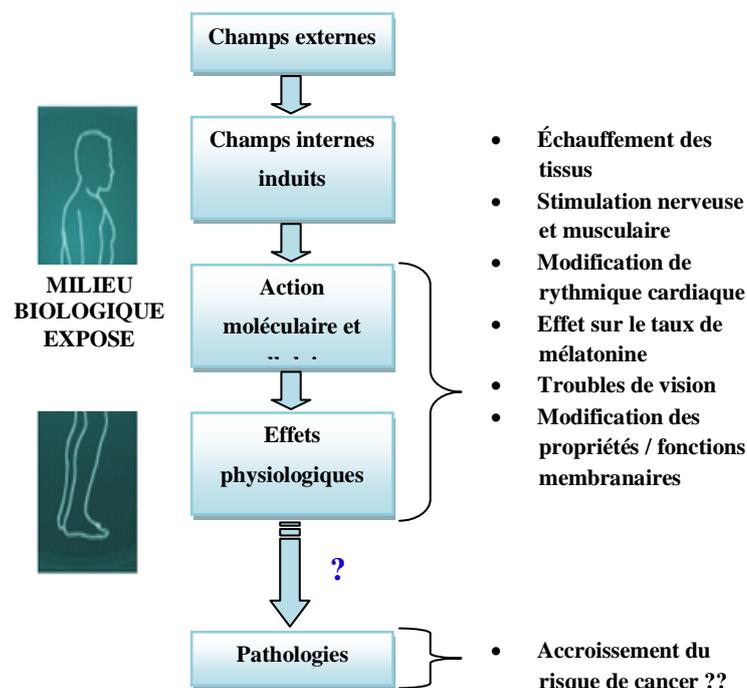


Fig. II.6. Mécanismes d'interaction champs électromagnétique et corps humain

Il existe trois mécanismes fondamentaux de couplage, par lesquels les champs électrique ou magnétique de fréquence variable dans le temps interagissent avec la matière vivante [4] :

Couplage avec les champs électriques bas fréquences

Couplage avec les champs magnétiques bas fréquences

Absorption d'énergie provenant des champs électromagnétiques

II.3.1.1. Couplage avec un champ électrique

En basse fréquence le corps humain se comporte comme un bon conducteur et son interaction avec les champs électriques de fréquence variable provoque :

- un écoulement de charges électriques (courant électrique),
- la polarisation des charges liées (formation de dipôles électriques)
- la réorientation des dipôles électriques déjà présents dans les tissus.

L'importance relative de ces différents effets dépend des propriétés électriques du corps, c'est-à-dire de sa conductivité électrique qui détermine l'écoulement du courant électrique et de sa permittivité qui détermine l'ampleur des phénomènes de polarisation. La conductivité et la permittivité varient selon le type de tissu biologique et dépendent également de la fréquence du champ. Les champs électriques externes induisent, à la surface du corps exposé, une charge superficielle qui provoque, à l'intérieur du corps, l'apparition de courants dont la distribution dépend des conditions d'exposition, de la taille et de la forme du corps, ainsi que de la position du corps dans le champ (figure II.7.a).

II.3.1 .2. Couplage avec un champ magnétique

L'interaction physique champs magnétiques de fréquence variable – corps humain crée des champs électriques induits et provoque la circulation de courants électriques. L'intensité du champ induit et la densité de courant sont proportionnelles:

- au rayon d'une boucle de courant dans le corps humain,
- à la conductivité électrique du tissu, ainsi qu'à la densité de flux magnétique

- et à la vitesse de variation de cette grandeur. Pour un champ magnétique d'intensité et de fréquence donnée, les champs électriques les plus intenses sont induits lorsque les dimensions de la boucle sont maximales. Le trajet exact et l'intensité du courant induit dans une partie du corps donnée dépendent de la conductivité électrique du tissu considéré.

Le corps humain n'est pas électriquement homogène ; cependant, les densités de courant induites peuvent être calculées en utilisant des modèles électriques et anatomiques réalistes du corps humain (figure II.7.b).

II.3.1 .3. Absorption de l'énergie électrique

L'exposition du corps humain aux champs électriques ou magnétiques basses fréquences n'entraîne généralement qu'une absorption d'énergie négligeable et aucune élévation de température mesurable. L'exposition à des champs électromagnétiques de fréquence supérieure à 100 kHz peut toutefois entraîner une absorption d'énergie et une élévation de température significatives. De façon générale, l'exposition à un champ électromagnétique uniforme (onde plane) entraîne une distribution de densité de courant fortement inhomogène à l'intérieur du corps, qui est à l'origine des effets biologiques [4] . Ce dépôt et cette distribution doivent être évalués par la mesure et le calcul dosimétrique. Dans les tissus biologiques, le débit d'absorption spécifique (DAS) défini comme étant le Débit d'énergie thermique déposée sur une masse de matière biologique (poids corporel) du fait de l'atténuation de l'énergie électromagnétique lorsqu'elle traverse les tissus. Le Débit d'Absorption Spécifique (DAS), est exprimé en watts par kilo (W/kg) et il est proportionnel au carré de l'intensité du champ électrique interne. La distribution et la valeur moyenne du DAS peuvent être calculés ou estimés à partir de mesures faites en laboratoire et peuvent être influencés par les facteurs suivants :

- Paramètres du champ incident, à savoir fréquence, intensité, polarisation, configuration source-objet (champ proche ou lointain).

- Caractéristiques du corps exposé, à savoir taille, géométrie interne et externe, propriétés diélectriques des différents tissus.

- Effets du sol et des autres objets réfléchissants dans le champ proche du corps exposé.

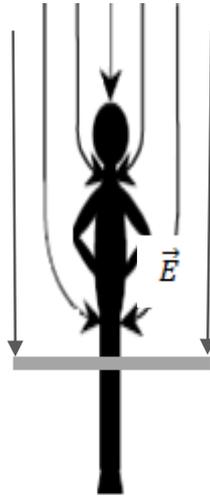


Fig. II.7 :a corps humain plongé dans un champ électrique



Fig. II.7:b corps humain plongé dans un champ magnétique

II.3.2. Mécanismes de couplage indirect.

Il existe deux mécanismes de couplage indirect :

-Les courants de contact résultant du contact du corps humain avec un objet se trouvant à un potentiel électrique différent (c'est-à-dire lorsque soit le corps soit l'objet est chargé électriquement par un champ électromagnétique) ;

-Le couplage de champs électromagnétiques à des appareillages médicaux portés par, ou implantés sur, une personne (les prothèses auditive et les pacemakers ect ...) [8], [9].

Lorsqu'un champ électromagnétique charge électriquement un objet conducteur, cela provoque le passage de courants électriques à travers le corps de la personne en contact avec cet objet [69]. L'amplitude et la distribution spatiale de ces courants dépendent de la fréquence, de la dimension de l'objet considéré, de la taille de la personne et de la surface de contact ; des décharges transitoires et des étincelles peuvent se produire lorsqu'une personne et un objet conducteur exposé à un champ intense se rapprochent l'un de l'autre.

II.4. Effets des champs électromagnétiques basse fréquence sur la santé humaine

Les mécanismes d'interaction des champs électrique et magnétique avec la matière peuvent être groupés en deux catégories : les champs et les courants induits d'une part, les autres effets directs et indirects d'autre part. Certains mécanismes pourraient être spécifiques pour certaines parties du corps, par exemple les cellules nerveuses sont plus sensibles aux champs induits que les autres cellules. A ce jour, en dehors des effets dus aux champs et aux courants induits servant de base à la réglementation, aucun mécanisme d'action de ces champs sur le vivant n'a été démontré [70].

II.4.1. Les effets avérés

Les effets avérés dépendent de l'intensité locale du courant induit dans chaque tissu suite à une exposition à un champ électromagnétique 50Hz; Leur grandeur de référence est la densité de courant induit exprimée en millième d'Ampère par mètre au carré (mA/m^2).

Lorsque le corps humain est exposé à des champs électriques 50Hz, les champs électriques externes induisent à la surface du corps exposé une charge superficielle. Ce phénomène se traduit par l'apparition de courants, nécessaires pour déplacer les charges électriques à la surface du corps. Lorsque le corps humain est exposé aux champs magnétiques alternatifs, l'interaction physique champs magnétiques 50Hz – corps humain crée des champs électriques induits, et des courant induit à l'intérieure du corps humain. L'exposition a un champ électrique peut amener les sujets exposés a percevoir ce champ, du fait de la vibration des poils provoqué par la charge électrique alternative induite, a la surface du corps. Ces caractéristiques rendent le champ électrique plus ou moins perceptible selon les individus, les seuils de perception du champ électrique varient donc d'un individu à l'autre. La plupart des gens sont capables de percevoir des champs électriques de 50/60 Hz

d'intensité supérieure à 20 kV.m-1 et seule une minorité peut percevoir des champs d'intensité inférieure à 5 kV.m-1 [71].

Contrairement au cas du champ électrique, le corps humain n'est pas Sensible au champ magnétique. Cependant, comme il est conducteur, son exposition à un champ magnétique y induit des courants mais ceux- ci sont de faible intensité. L'exposition à des champs magnétiques intenses peut provoquer des perceptions immédiates. Les seuils retenus par l'Organisation Mondiale de la Santé [21], sont indiqué dans le (tableau II.1). À partir de 100 mA/m², les courants induits par l'exposition aux champs sont supérieurs aux courants endogènes et entraînent donc une stimulation électrique des tissus excitables, comme par exemple le muscle cardiaque [4].

Tableau II.1: Le seuil de perception du champ magnétique [21]

Champ magnétique (50/60 Hz)(m T)	Densité de courant induit (mA/m ²)	Le seuil de perception
0.5-5	1 - 10	Effet de biologique mineurs
5 - 50	10-100	Effet bien établis sur le système nerveux et la vision
50-500	100-1000	Simulation des tissus excitables et des dommages possibles sur la santé
>500	>1000	Fibrillation ventriculaire et des extrasystoles-effets aigus.

II.4.2. Les effets potentiels

La plupart des travaux de recherches s'intéressent aux risques qu'entraîne l'exposition à long terme aux champs électromagnétique 50Hz. Ces études intéressent aussi bien les biologistes que les physiciens. En 2002 une monographie dans laquelle les champs magnétiques ELF ont été classés comme « peut-être cancérogènes pour l'homme » a été publié. La (figure II.8) représente la méthodologie suivie dans la recherche des effets de ces champs sur la santé :

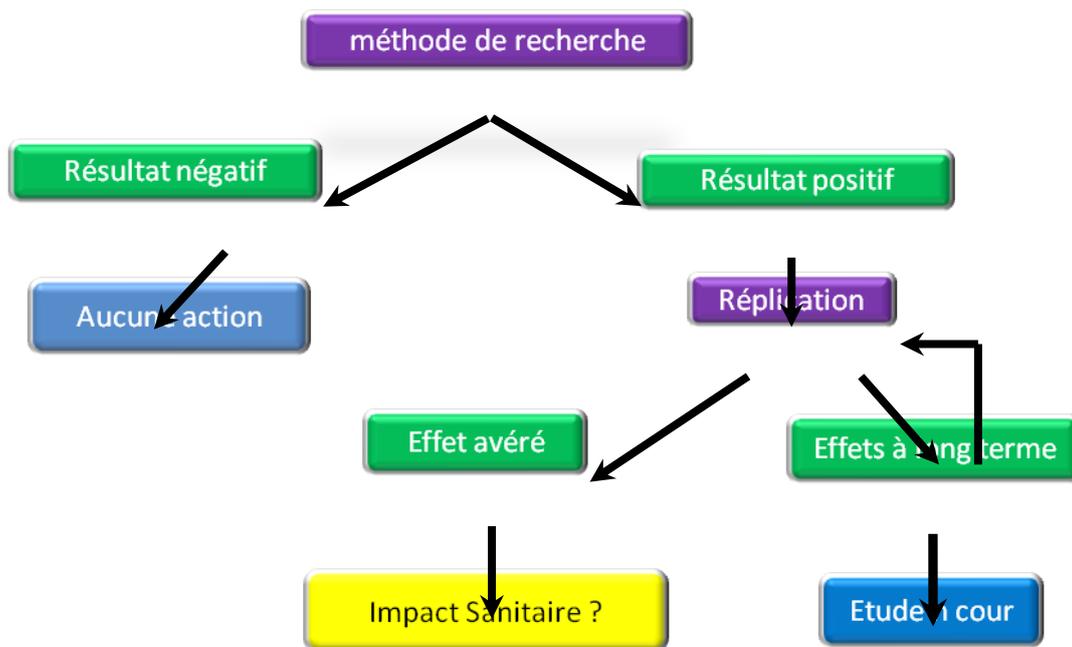


Fig.II. 8 Méthodologie de recherche sur les effets des champs électromagnétiques 50 Hz

Ces méthodes de recherche émanent des études épidémiologiques et expérimentales et de modèles théoriques par ordinateurs :

- **L'épidémiologie** : Science qui recherche des corrélations entre l'exposition et l'apparition de maladies.

-
- **Expérimentations biologiques sur l'animal** : Etude in vivo ou sur des cultures de cellules (étude in vitro) qui cherchent à identifier un effet, à en confirmer l'existence et à identifier un mécanisme d'action. (Référence brochure).
 - **Expérimentation chez l'homme** : Expositions contrôlées de volontaires humains à des champs électriques et/ou magnétiques 50 Hz pendant des périodes relativement brèves. De multiples fonctions sont analysées, comme par exemple : la mémoire, la concentration, la vitesse de réaction, l'activité électrique cérébrale.

II.4.2.1. Etudes épidémiologiques

Les études épidémiologiques établissent des associations statistiques qui sont interprétées en tenant compte des autres facteurs environnementaux parfois difficiles à séparer du facteur étudiés. Elles sont réalisées en prenant compte des expositions professionnelles qui sont les plus importantes et les plus durables, des expositions résidentielles chez les adultes et des expositions résidentielles chez les enfants. Les études épidémiologiques établissent des associations statistiques qui sont interprétées en tenant compte des autres facteurs environnementaux parfois difficiles à séparer du facteur étudiés. Elles sont réalisées en prenant compte des expositions professionnelles qui sont les plus importantes et les plus durables, des expositions résidentielles chez les adultes et des expositions résidentielles chez les enfants.

Dans les premières études épidémiologiques, c'est d'abord le risque de cancer qui a été analysé, et notamment des leucémies et de tumeur cérébrale chez les enfants. D'autres risques ont également été étudiés tels que les maladies cardio-vasculaires, les dépressions, les suicides, et les maladies neuro-dégénératives. En revanche, dans ce type d'étude, il est impossible de maîtriser l'exposition aux champs électromagnétiques sur une longue période. Ces études sont basés sur le facteur risque relatif (RR) qui représente le rapport entre le taux d'incidence de la maladie au sein d'un groupe exposé à un facteur de risque donné et le taux d'incidence pour la même maladie dans le groupe non exposé et l'intervalle de confiance (IC) qui représente la plage de valeurs où la vraie valeur de l'indice mesuré a 95 % de chance de se trouver [31] et [72]. C'est un indicateur du degré de précision de la mesure.

Les études longue durée en laboratoire sont effectuées sur des animaux et offrent l'avantage de concentrer la recherche sur le seul agent physique étudié, en contrôlant les autres facteurs environnementaux. Elles sont donc complémentaires des études épidémiologiques, dont elles peuvent indirectement confirmer les résultats en précisant les mécanismes et la cause d'une association statistique observée. Elles ont notamment porté sur la cancérogenèse et le risque de malformations.

A. Les études épidémiologiques chez les enfants

La première étude épidémiologique qui a posé pour la première fois la question d'un risque possible lié à l'exposition au champ magnétique a été conduite en 1979 au Etats-Unis [73]. Cette étude observait une plus grande fréquence de cancers, notamment de leucémies, parmi les enfants habitant près d'ouvrages électriques. Depuis de très importants travaux de recherches internationales ont été impulsés et se poursuivent encore. Pour mettre en évidence cette corrélation la plus part des études récentes ont utilisé des approches qui consistent à comparer directement les niveaux de champs mesurés dans les habitations et à considérer la densité et les caractéristiques des lignes électriques à leur voisinage.

Vue la diversité des expositions aux champs électromagnétiques résidentiels, il parvient plus fiable de calculer les facteurs de risque sur la base de mesure de champs, que de les calculés en fonction de la densité des lignes électriques au voisinage des habitations. Dans les recherches réalisées aux Etats-Unis sous la direction de Martha Linet de l'institut National de Cancer [74], aucune association entre la densité des lignes électriques autour des habitations, et une augmentation du risque de leucémie n'était confirmée, le risque relatif était (RR=0,88).

Les recherches réalisées indépendamment au Canada, en Angleterre et en Grande-Bretagne avec des puissances statistiques plus importantes, ont donné des résultats similaires à ceux des études américaines et ont pu démontrer que le risque relatif de développer la leucémie infantile n'augmente pas avec l'augmentation du niveau de champ magnétique. Pour la catégorie des enfants exposés à plus de 0,2 μT , les chercheurs trouvent une faible augmentation des cas de leucémie, le risque relatif étant de 1,24 (mais l'intervalle de confiance IC = 0,86 – 1,79). Une augmentation du risque relatif est également observée à des

niveaux d'exposition plus élevés (0,4-5 μ T), mais pour des niveaux d'exposition supérieure le risque relatif diminue [30].

En ce qui concerne les effets de l'exposition aux champs sur le risque de cancer du cerveau chez l'enfant, les résultats des études faites par **N. Wertheimer et E. Leeper [73]** et qui ont mis en évidence cette hypothèse avec un facteur de risque (RR=2,4) ; ont été controversés par les études épidémiologiques basées sur de vraies mesures de champs dans les habitations qui n'ont pas pu établir aucune relation entre le cancer du cerveau chez l'enfant et les champs magnétiques basse fréquence.

B. Les études épidémiologiques chez l'adulte

Les études faites sur l'exposition résidentielle des adultes n'ont pas démontré une association avec le risque de cancer, par contre celles sur l'exposition professionnelle où les niveaux d'exposition aux champs magnétiques pour certains métiers sont 10 à 15 fois supérieurs par rapport à ceux que l'on trouve en milieu résidentiel, ont connus de notables progrès. Certaines études suggèrent que les travailleurs les plus exposés aux champs sont soumis à un risque accru de leucémie et de cancer de cerveau [75] et [76]. La plus part d'entre elles établissent le niveau d'exposition aux champs en fonction du titre d'emploi des travailleurs, d'autres ont améliorés l'évaluation individuelle de l'exposition professionnelle, en tenant compte des facteurs professionnels reconnus comme possible cancérigènes et en réalisant des mesures de champ à l'aide de dosimètres conçus spécialement pour cet usage.

Une analyse conjointe réalisée par Kheifets à partir des trois plus importantes études en exposition professionnelle étude Ontario – hydro, Sahl 1993, Thériault 1994 [75] : étude franco-canadienne pour la partie EDF et Hydro-Québec, Savitz 1995 [76], a permis de regrouper près de 400 000 travailleurs des compagnies d'électricité, suivis tout au long de leur carrière professionnelle et même au-delà pour une grande partie d'entre eux.

Sur la base de l'analyse combinée des données de ces études, le risque relatif était (RR= 1,2) pour les cancers du cerveau et (RR= 1,09) pour les leucémies. Ces résultats ne sont donc pas statistiquement significatifs. La possibilité que l'exposition aux CEM puisse être responsable d'une augmentation du nombre de maladies cardio-vasculaires, de dépressions,

ou de suicides a fait l'objet d'études épidémiologiques portant sur de larges effectifs sans montrer d'augmentation du risque.

II.4.2.2. Etudes expérimentales

Deux grands types d'études de laboratoire sont conduits :

A. Les expérimentations in vitro

Ces études portent sur des modèles biologiques (cellules) et cherchent à identifier le détail des mécanismes d'action. Aucune étude in vitro répliquée n'a montré d'altération de l'ADN, ni de modification des mécanismes de réparation associés, même pour des valeurs de champs inhabituellement élevées.

B. Les expérimentations in vivo

Ces études sont effectuées sur des animaux de laboratoire (rats), a fin de mettre en évidence un éventuel effet cancérigène des champs électromagnétiques. Cependant, l'extrapolation de ces résultats à l'homme demande certaines précautions. Les chercheurs canadiens de l'Institut Armand – Frappier au Québec (Canada) ont fait des essais sur des générations entières de rongeurs qui ont été élevées dans des champs électromagnétiques intenses (2, 20, 200 et 2000 μT) , aucun effet n'a pu être identifié en comparaison avec un groupe de référence vivant dans la même Condition de vie dans le laboratoire, mais qui n'était pas exposé au champ magnétique [77] .De même des études de santé animale faites par une équipe japonaise [78] sur des animaux d'élevage, n'ont pas révélé de potentiel nocif, ce qui rejoint les données obtenues sur l'animal d'expérience.

II.5. Dosimétrie et formulations quasi-statiques

Quand un objet biologique est immergé dans un champ électromagnétique, les forces du champ induisent certaines quantités physiques (charges, des courants, l'énergie) dans ces tissus [79]. Ces quantités physiques sont responsables des effets biologiques et les lignes directrices des restrictions de base d'exposition aux champs électromagnétique (valeurs

limites d'exposition) sont exprimés à travers ces quantités de base, et doivent rester bien dans des limites inférieures au seuil normatif (figure II.9).

II.5.1 Dosimétrie en basse fréquence

En basse fréquence jusqu'à quelques centaines de kilohertz, la quantité physique de base est la densité de courant induite dans les tissus J , à des fréquences plus élevées le taux d'absorption spécifique (SAR) est également pris en compte. La dosimétrie vise à déterminer les quantités de base en fonction de la distribution du champ électromagnétique, des caractéristiques de l'organisme exposés et du lieu de l'exposition que l'on appelle le théâtre en utilisant une instrumentation de mesure (dosimétrie expérimentale) et des solutions théoriques directes des équations de Maxwell (Dosimétrie analytique). Les résultats de dosimétrie sont exploités par les organisations suivantes:

1- Les organisations de protection contre le rayonnement non ionisant afin de développer des niveaux de référence (les valeurs d'action) et des restrictions de base (valeurs limites d'exposition).

2- Les experts appliquent directement des modèles dosimétriques et des méthodes de conditions réelles d'exposition afin de vérifier le respect des restrictions de base (valeurs limites d'exposition) lorsque les niveaux de référence (valeurs déclenchant l'action) sont dépassés.

3- Les biologistes ont besoin de connaître les niveaux de champ dans les tissus de l'objet exposé ou échantillon.

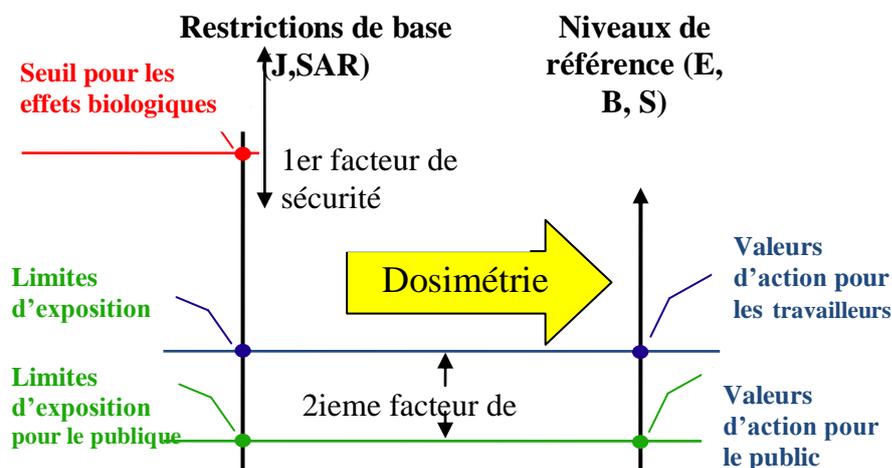


Fig. II .9 Dosimétrie en basse fréquence [79]

Actuellement, la technologie ne permet pas encore de mesurer directement le micro - courants induit par des champs électromagnétiques à l'intérieur du corps humain. Quelques travaux de recherche pour effectuer de telle mesures ont été effectués sur les fantômes d'homme et de rats a base d'agar, sur les carcasses de rats et même sur des rats vivants par des chercheurs américains. Le principe de mesure consiste a inséré dans l'objet d'étude une sonde iso tropique composé d'une aiguille isolante qui permet de mesurer précisément la différence de potentiel entre deux positions très proches dans le fantôme, et donc d'estimer le champ électrique correspondant. Bien que le principe de cette mesure paraisse simple, il existe d'énormes difficultés d'ordre techniques et éthiques [30]. En effet la répartition du champ électrique est modifiée par l'aiguille de la sonde et il est pratiquement impossible d'effectuer des mesures répétées chez l'homme.

II.5.2 Formulations quasi-statiques en basse fréquence

L'analyse dosimétriques des interactions des tissus biologiques avec les champs électrique et magnétique 50 Hz est réalisée tenant compte des hypothèses simplificatrices du régime quasi-statique :

1- Les effets de propagation sont négligeables : le champ électrique se découple de celui magnétique, ces derniers peuvent être calculés respectivement par les méthodes électrostatiques et magnétostatique.

2- La taille de l'objet exposé est comparable ou plus petite que la profondeur de pénétration du champ magnétique dans la peau, autrement dit celui-ci n'est pas perturbé par le corps exposé.

3- Les courants de déplacement dans le corps exposé sont prépondérant par rapport a ceux de conduction, donc le corps humain est équipotentiel et le calcul du champ électrique à l'intérieur et à l'extérieure du corps humain peut être effectué séparément.

Grace à ces approches quasi- statiques les champs électrique et magnétique sont découplés et les problèmes d'exposition à ces champs peuvent être étudié séparément. En outre, chacun de ces problèmes peut être divisé en deux étapes séparées figure (4). La Première étape consiste a calculé l'intensité du champ externe en résolvant les équations de maxwell, la 2^{ème} étape consiste a développé des formulations quasi -statique permettant de calculer les courants induits par le champ à l'intérieure du corps humain [32].

II.5.2.1 Formulations diélectrique pour la simulation de l'exposition à un champ électrique

Historiquement, cette formulation a été développée pour calculer les pertes dans des matériaux diélectriques soumis à un champ électrique variable dans le temps [32] et [30]. Pour utiliser la formulation « diélectrique » dans le contexte de l'exposition humaine on doit tenir compte des hypothèses simplificatrices suivantes :

- 1- Les effets de propagation d'ondes sont négligeables
- 2- Le champ magnétique est négligeable par rapport au champ électrique
- 3- Les courants de déplacement dans le corps humain sont négligeables

Dans ces conditions, le champ électrique induit une polarisation de la matière et un déplacement de charge électrique à l'intérieure de la matière, lorsque celle-ci présente une conductivité non nulle. Dans la limite où la fréquence est nulle, ce déplacement de charge va contrecarrer le champ « source » extérieur et annule ainsi le champ électrique à l'intérieur des régions conductrices qui est caractérisé par une faible conductivité. Par contre, si la fréquence n'est pas nulle, la répartition de la charge à l'intérieur des conducteurs varie dans le temps afin de s'adapter au champ source extérieur : la formulation diélectrique permet donc de calculer les courants issus du déplacement de ces charges dans les conducteurs.

La formulation et la schématisation du problème diélectrique général sont données par la (figure II.10.a) . Dans ce type de problème, l'inconnue est le potentiel scalaire électrique ϕ . Les sources du champ électrique sont exprimées par le biais de conditions à la frontière de type Dirichlet. Notamment, pour des applications qui portent sur l'exposition humaine aux champs générés par des lignes haute tension, le potentiel scalaire électrique doit être fixé à l'emplacement des câbles et zéro sur le sol . Des conditions de Neumann peuvent être utilisées pour limiter le domaine de résolution.

II.5.2.2 Formulations diélectrique pour la simulation de l'exposition à un champ magnétique

Lorsque le corps humain est exposé au seul champ magnétique variable dans le temps engendré par un fort courant alternatif, un champ électrique est induit en tout point. Ce champ électrique induit des courants de conduction et cause des phénomènes de polarisation qui se traduisent en des courants de déplacement qui sont négligeables par rapport aux courants de conduction. L'idée à la base de la formulation appelée « $\phi - A$ » est que, puisque la « réaction d'induit » du corps humain est négligeable, on peut calculer le champ magnétique rayonné en absence du corps humain, soit par des formules analytiques [80], soit par des méthodes numériques, soit par des sources équivalentes, déterminées à partir de mesures de champ. Puis on calcul dans une deuxième étape les courants intérieurs à partir des valeurs obtenues précédemment. Les hypothèses à la base de cette formulation sont les suivantes :

1) Les effets de propagation d'onde sont négligeables : c'est-à-dire tant que la longueur d'onde est très grande par rapport à la taille du système que l'on souhaite étudier ; on est alors en conditions « quasi-statique ». Dans le cas particulier de l'exposition humaine à des champs à fréquence Industrielle, cette condition ne pose pas de problèmes.

2) La présence du corps humain ne modifie pas de manière significative le champ magnétique, car la perméabilité de la matière vivante est unitaire, et de plus, en raison de la faible conductivité des tissus à la fréquence industrielle, les courants induits sont très faibles : Autrement dit, la « réaction d'induit » est négligeable.

3) Le champ électrique est négligeable par rapport au champ magnétique : Ainsi on peut négliger les courants induits électriquement (tout comme Dans le cas de la formulation diélectrique, nous avons négligé le phénomène de l'induction magnétique). Dans le cas particulier de l'exposition humaine à des champs à fréquence industrielle, cette condition ne pose pas de problèmes. Tenant compte des hypothèses précédentes la formulation et la schématisation du problème diélectrique général ont été développés dans les travaux de recherche réalisés par Laurent et Hong [30]. Dans la (figure II.10.b) le potentiel vecteur « B » représente le terme source et le domaine de résolution est limité au seul corps humain.

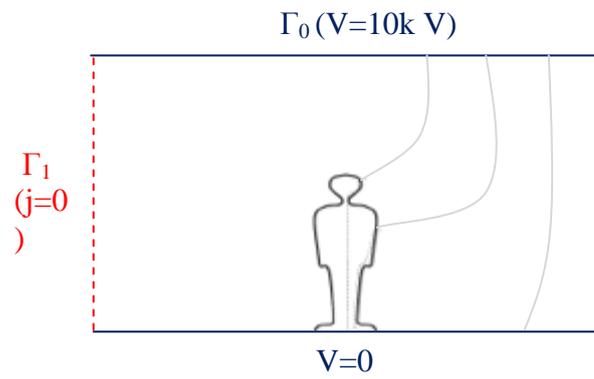


Fig. II.10.a : Modélisation de l'exposition a un champ électrique

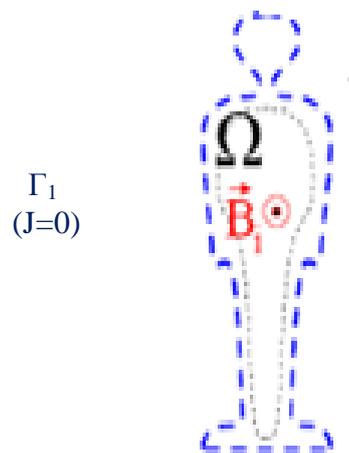


Fig.II.10.b : Modélisation de l'exposition a un champ magnétique

II.6 Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons examiné la problématique de l'interférence des champs électromagnétiques basse fréquences avec l'environnement. Nous avons réalisé une études bibliographiques sur les effets des champs électromagnétiques basse fréquence sur la santé , avec une attention particulière aux effets biologiques.

En pratique l'exposition a des champs électromagnétiques basse fréquence a lieu en condition de champ proche, le champ électrique se découple donc de celui magnétique et les phénomènes physiques mis en jeu sont complètement différents. Nous avons vu que les effets des champs sur la santé ne sont pas établis .Les organisations mondiale de protection contre le rayonnement non ionisant ont établis des restrictions de base et des niveaux de référence sur les valeurs de champ électrique et magnétique ne pas dépasser lors de l'exposition a des champs électromagnétiques basse fréquence.

Les résultats des études menés dans ce contexte sont bien contradictoires .Les études expérimentales chez l'animal ne permettent pas non plus de conclure, d'autant plus que ces résultats ne sont pas directement transposables chez l'être humain. A fin d'éclaircir les connaissances sur les effets de ces champs il est nécessaire de quantifier numériquement par voie de la dosimétrie, les phénomènes physiques induits dans le corps humain.

Chapitre III

Modélisation théorique du champ électromagnétique 50 Hz.

Sommaire

III. Modélisation théorique du champ électromagnétique 50 Hz

III.1 Introduction

III.2 Modélisation analytique des champs électromagnétiques 50 Hz

III.2.1 Equations de Maxwell

III.2.2 Détermination du vecteur potentiel magnétique

III.3 Calcul analytique du champ électrique rayonné par une ligne haute tension

III.3.1 Champ électrique engendré par une ligne de longueur infinie

III.3.2 Champ électrique engendré par une ligne triphasée

III.4 Calcul analytique du champ magnétique rayonné par une ligne haute tension

III.4.1 Champ magnétique généré par un fil rectiligne

III.4.2 Méthode vectorielle pour le calcul du champ magnétique

III.4.2.1 Programmation sous l'environnement Matlab

III.4.2.2 Exploitation du programme de calcul

III.4.2.3 Résultats et discussion

III.5 Modélisation numérique des champs électromagnétiques 50 Hz

III.5.1 Méthode des différences finis

III.5.2 Méthode des différences finis dans le domaine temporel

III.5.3 Méthode des impédances

III.5.4 Méthodes des éléments finis

III.6 Conclusion

III.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.

III.2 Modélisation analytique des champs électromagnétiques 50 Hz

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 recours 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 bio 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 (FDM), la méthode des éléments de frontière (BEM), et la méthode des différences finis de temps (FDTD).

III.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 [81].

$$\text{rot}E = \frac{\partial B}{\partial t} \dots\dots\dots(III.1)$$

$$\text{rot}H = J + \frac{\partial D}{\partial t} \dots\dots\dots(III.2)$$

$$\text{div}D = P_v \dots\dots\dots(III.3)$$

$$\text{div}B = 0 \dots\dots\dots(III.4)$$

Avec :

E : vecteur champ électrique.

B : vecteur induction magnétique.

H : vecteur champ magnétique.

J : vecteur densité de courant.

D : vecteur induction électrique.

Et P : densité volumique de charge.

A partir de l'équation (Eq.4.) on peut déduire qu'il existe un potentiel vecteur magnétique A tel que.

$$B = \text{rot}A \dots\dots\dots(III.5)$$

Le champ magnétique H s'écrit alors :

$$H = \frac{1}{\mu_0} \text{rot}A \dots\dots\dots(III.6)$$

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

$$E = -grad\phi - \frac{\partial A}{\partial t} \dots\dots\dots(III.7)$$

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

III.2.2 Détermination du vecteur potentiel magnétique

En utilisant la jauge de Lorentz

$$divA = -\epsilon_0\mu_0 \frac{\partial\phi}{\partial t} \dots\dots\dots(III.8)$$

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

$$\Delta A + \mu_0\epsilon_0\omega^2 A = -\mu_0 J \dots\dots\dots(III.9)$$

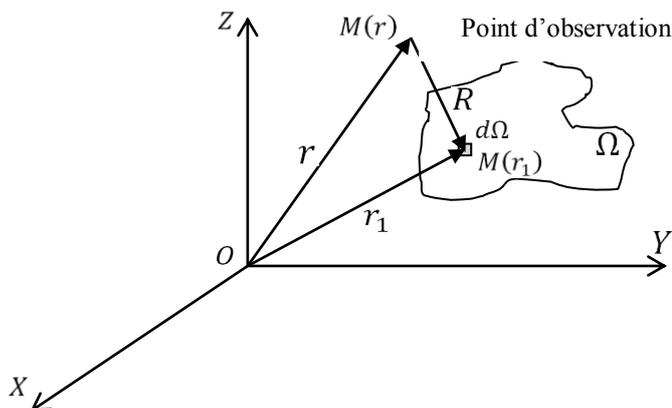


Fig. III.1. Disposition du calcul du champ électromagnétique.

D'après la figure (III .1), la solution en un point M(r),de cette équation est sous forme :

$$A(r) = \frac{\mu_0}{4\pi} \int_{\Omega} J(r_1) \frac{e^{-j\beta R}}{R} d\Omega \dots\dots\dots(III.10)$$

Ou 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 (r₁) ou cercle le courant (figure 1.1), $\beta = \frac{2\pi}{\lambda}$ 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 :

$$\Phi = \frac{1}{4\pi\epsilon} \int_S \rho \frac{e^{-j\beta R}}{R} dS \dots\dots\dots(III.11)$$

Le terme $e^{-j\beta R}$ traduit l'effet de propagation. Lors du calcul en champ proche, ce terme est souvent pris égale a 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 ($R \ll \lambda$).

III.3 Calcul analytique du champ électrique rayonné par une ligne haute tension

III.3.1 Champ électrique engendré par une ligne de longueur infinie

Considérons une droite infinie uniformément chargée, avec une densité linéique de charge λ . La droite est orientée sur la figure (III.2) suivant l'axe Oz [82].

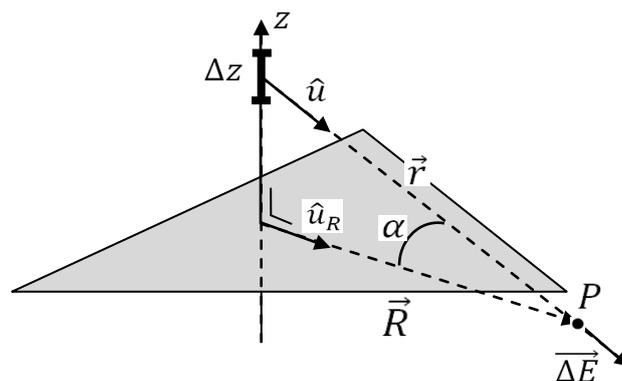


Fig. III.2 : Champ électrique généré par une droite infinie chargée

Un « petit » élément de longueur dz sur la droite porte une charge λdz . Sa contribution au champ au point P est :

$$d\vec{E} = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \cdot \frac{\lambda \cdot dz}{r^2} \cdot \hat{u} \dots \dots \dots (III.12)$$

On observe que, la droite étant infinie, à tout élément dz correspond son symétrique par rapport à l'origine : les champs électriques correspondants possèdent des composantes verticales opposées, alors que les composantes horizontales s'additionnent. Le champ électrique de deux éléments symétriques est donc :

$$d\vec{E} = 2 \cdot \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \cdot \frac{\lambda \cdot \cos \alpha}{r^2} \cdot \hat{u}_r \cdot dz \dots \dots \dots (III.13)$$

Pour évaluer le champ total, il faut intégrer les contributions $d\vec{E}$ provenant de tous les éléments dz . L'expression du champ devient donc :

$$d\vec{E} = 2 \cdot \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \cdot \hat{u} \cdot \int_0^\infty \frac{\lambda \cdot \cos \alpha}{r^2} \cdot dz \dots \dots \dots (III.14)$$

En choisissant comme variable d'intégration l'angle α , avec $z = R \cdot \tan \alpha$ et $r = \frac{R}{\cos \alpha}$

$$dz = \frac{R}{\cos^2 \alpha} \cdot d\alpha \Rightarrow \frac{\cos \alpha}{r^2} \cdot dz = \frac{\cos \alpha}{r^2} \cdot \frac{R}{\cos^2 \alpha} \cdot d\alpha$$

Dès lors, puisque α varie de 0 à $\pi/2$.

$$\vec{E} = \frac{\lambda}{2\pi\epsilon_0} \cdot u_r \cdot \int_0^{\pi/2} \cos \alpha \cdot d\alpha = \frac{\lambda}{2\pi\epsilon_0 R} \cdot u_r \dots \dots \dots (III.15)$$

On suppose maintenant que la droite est finie de longueur $2z$. La contribution au potentiel au point P d'un élément de longueur dz est :

$$\Delta V = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \cdot \frac{\lambda \cdot dz}{r} \dots \dots \dots (III.16)$$

En tenant compte de ce que deux points de la droite, disposés symétriquement par rapport à 0, donnent la même contribution on obtient :

$$V = 2 \cdot \frac{\lambda}{4\pi\epsilon_0} \cdot \int_0^z \frac{dz}{\sqrt{z^2 + R^2}} + V_0 = \frac{\lambda}{2\pi\epsilon_0} \left[\ln(z + \sqrt{z^2 + R^2}) - \ln R \right] + V_0$$

Où $V_0 = \text{constant}$

On prend un point de référence, soit P_0 à la distance R_0 de la droite. L'expression du potentiel au point P_0 est :

$$V(P_0) = \frac{\lambda}{2\pi\epsilon_0} \left[\ln \left(z + \sqrt{z^2 + R_0^2} \right) - \ln R_0 \right] + V_0 \dots\dots\dots(\text{III.17})$$

Donc, la constante V_0 est :

$$V_0 = V(P_0) - \frac{\lambda}{2\pi\epsilon_0} \left[\ln \left(z + \sqrt{z^2 + R_0^2} \right) - \ln R_0 \right]$$

Et le potentiel au point P peut être écrit :

$$V = \frac{\lambda}{2\pi\epsilon_0} \left[\ln \left(\frac{z + \sqrt{z^2 + R^2}}{z + \sqrt{z^2 + R_0^2}} \right) - \ln \left(\frac{R}{R_0} \right) \right] + V(P_0) \dots\dots\dots(\text{III.18})$$

III.3.2 Champ électrique engendré par une ligne triphasé

Pour une phase :

En choisissant $V(P_0) = 0$, et en faisant tendre z vers l'infini ; on obtient l'expression de potentiel au point P d'une droite infinie [83] :

$$V_R = -\frac{\lambda}{2\pi\epsilon_0} \left[\frac{R}{R_0} \right] \dots\dots\dots(\text{III.19})$$

Où R_0 = distance de la ligne au point où le potentiel est nul .En appliquant la méthode des images figure (III.3), nous supposons que le potentiel du sol est $V_{sol} = 0$.

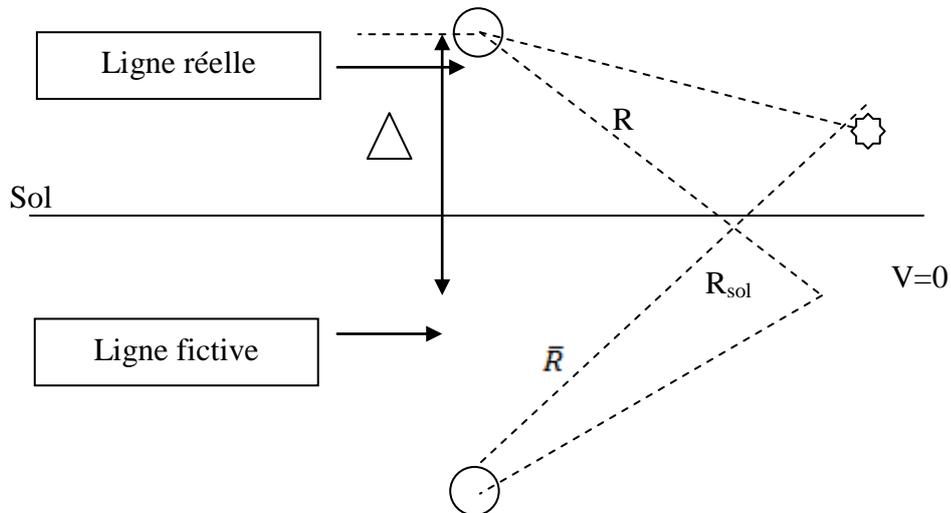


Fig. III.3 : méthode des images pour le calcul du champ électrique résultant

Le potentiel scalaire électrique et le champ électrique engendrés par la ligne réelle sont :

$$V_R = -\frac{\lambda}{2\pi\epsilon_0} \left[\ln \frac{R}{R_{sol}} \right] \dots\dots\dots(III.20.a)$$

$$E = -\frac{\lambda}{2\pi\epsilon_0} \hat{u}_R \dots\dots\dots(III.20.b)$$

Où R_{sol} est la distance entre la ligne et la terre. Le potentiel scalaire électrique et le champ électrique engendrés par la ligne fictive de densité de charge ($-\lambda$) est :

$$V'_R = \frac{\lambda}{2\pi\epsilon_0} \left[\ln \frac{R'}{R_{sol}} \right] \dots\dots\dots(III.21.a)$$

$$E' = -\frac{\lambda}{2\pi\epsilon_0} \hat{u}'_R \dots\dots\dots(III.21.b)$$

Où R_{sol} est la distance entre la ligne et la terre, donc le potentiel scalaire électrique et le champ électrique engendrés par deux lignes sont :

$$V_{totale_R} = -\frac{\lambda}{2\pi\epsilon_0} \left[\ln \frac{R}{R'} \right] \dots\dots\dots(III.22)$$

Dans ce cas le champ résultant est la somme vectorielle des deux champs générés respectivement par le conducteur \vec{E} et son image \vec{E}' :

$$\vec{E} = \vec{E} + \vec{E}' \dots\dots\dots(III.23)$$

Le potentiel maximum sur la surface de la ligne étant connu, on peut calculer λ à partir de la tension nominale de la ligne triphasée. Donc, en appliquant des résultats obtenus par la méthode des images ci-dessus, on a :

$$V_{inst} = \frac{\lambda}{2\pi\epsilon_0} \left(\ln \frac{r_0}{2\Delta - r_0} \right) \Rightarrow \lambda = \frac{V \cdot 2\pi\epsilon_0}{\ln \left(\frac{r_0}{2\Delta - r_0} \right)} \dots\dots\dots(III.24)$$

Où r_0 est le rayon du conducteur et $V_{inst} = U \times \sqrt{\frac{2}{3}}$ la tension nominale du réseau.

Pour la ligne triphasée :

Dans ce cas, on doit prendre en compte l'influence des deux autres phases sur la troisième. On calcule la densité de charge linéique à partir des coefficients d'influence :

$$co_{ii}(y) = \ln \left(\frac{2y}{R} \right) \text{ Avec } : y \gg R$$

$$co_{ij}(x_a, y_a, x_b, y_b) = \ln \left(\frac{\sqrt{(x_b - x_a)^2 + (y_b - y_a)^2}}{\sqrt{(x_b - x_a)^2 + (y_b - y_a)^2}} \right)$$

La matrice des coefficients est :

$$co = \frac{1}{2\pi\epsilon_0} \cdot \begin{bmatrix} co_{ii}(y1) & co_{ij}(x1, y1, x2, y2) & co_{ij}(x1, y1, x3, y3) \\ co_{ij}(x1, y1, x2, y2) & co_{ii}(y2) & co_{ij}(x2, y2, x3, y3) \\ co_{ij}(x1, y1, x3, y3) & co_{ij}(x2, y2, x3, y3) & co_{ii}(y1) \end{bmatrix}$$

Alors, les densités de charge linéique λ_i sont données par :

$$[\lambda_i] = [c_0^{-1}] \cdot [V_i]$$

3.4 Calcul analytique du champ magnétique rayonné par une ligne haute tension

3.4.1 Champ magnétique généré 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 (III.4), sont données par [83] :

$$A_x = 0; \quad A_y = 0 \text{ et } A_z = -\frac{\mu_0 I}{2\pi} \cdot \ln r' \dots\dots\dots (III.26)$$

L'induction magnétique correspondante est :

$$B_x = -\frac{\mu_0 I}{2\pi} \cdot \frac{y}{r'^2}; \quad B_y = \frac{\mu_0 I}{2\pi} \cdot \frac{x}{r'^2} \text{ et } B_z = 0 \dots\dots\dots (III.27)$$

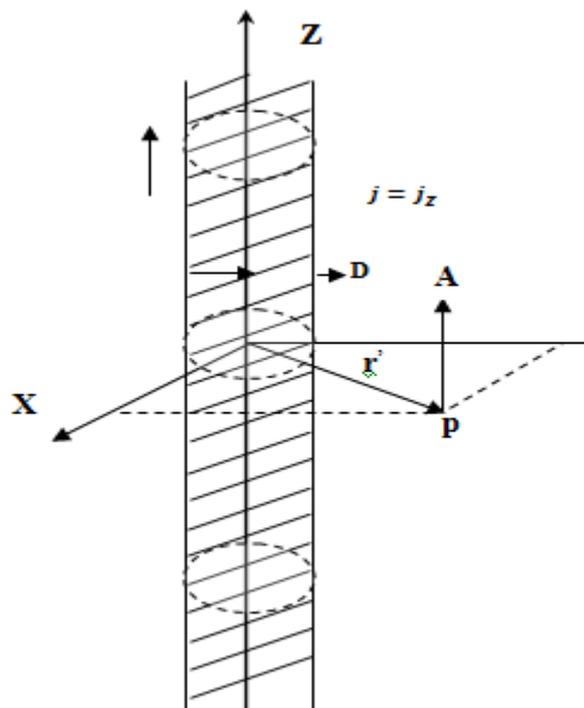


Fig. III.4 Champ magnétique rayonné par un fil de longueur infinie

III.4.2 Methode vectorielle pour le calcul du champ magnetique

Le champ magnetique émis par une ligne triphasée aérienne en un point M situé a une certaine distance par rapport a l'axe du pylône (figure III.5) 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 [84].

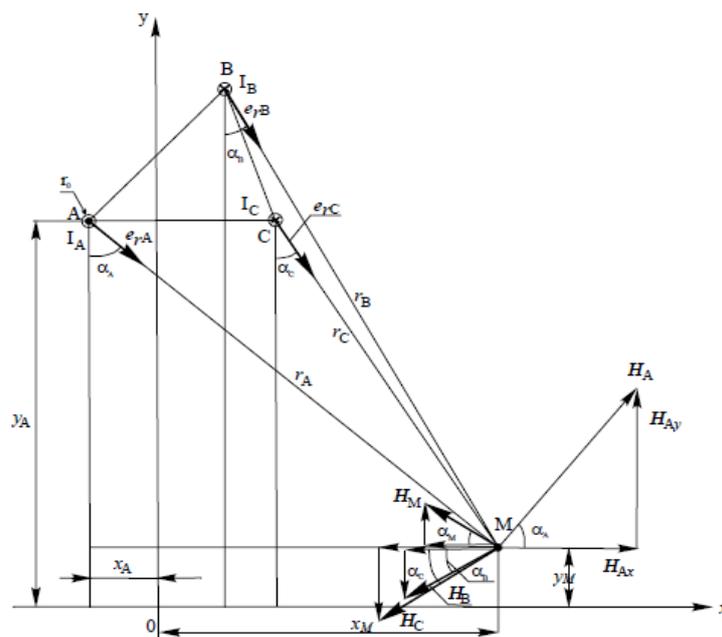


Fig.III.5 Champ magnétique émis par les trois phases d'une ligne électrique en un point M

En se référant a la figure (III.5) , 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 :

$$\begin{aligned} i_A &= (I \cos(\omega t_1)) = I \\ i_B &= (I \cos(\omega t_1 - 120^\circ)) = -0.5I \\ i_C &= (I \cos(\omega t_1 - 240^\circ)) = -0.5I \end{aligned}$$

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. Figure 1.

$$H_m = H_A + H_B + H_C \dots\dots\dots(III.28)$$

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 due à la contribution des trois courants de phases est

$$H_m = \frac{1}{2\pi} \left[\frac{I_A}{r_A} e_{rA} + \frac{I_B}{r_B} e_{rB} + \frac{I_C}{r_C} e_{rC} \right] \dots\dots\dots(III.29)$$

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 :

$$\begin{aligned} r_A &= \sqrt{(x_m - x_A)^2 + (y_m - y_A)^2} \\ r_B &= \sqrt{(x_m - x_B)^2 + (y_m - y_B)^2} \\ r_C &= \sqrt{(x_m - x_C)^2 + (y_m - y_C)^2} \end{aligned}$$

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 :

$$\left. \begin{aligned} H_x &= H_{Ax} + H_{Bx} + H_{Cx} \\ H_y &= H_{Ay} + H_{By} + H_{Cy} \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots(III. 30)$$

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

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

$$B = \mu_r \mu_0 H \dots\dots\dots(III.31)$$

Avec μ_r : permittivité magnétique relative (=1.00000038).

III.4.2.1. 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 tâche différente.

La figure (III-6) présente l'organigramme du code utilisé pour le calcul du champ électrique et celui magnétique en fonction de la distance l'axe du pylône. Cet organigramme est constitué de trois blocs principaux ; Bloque d'entrée, Bloque de résolution et le Bloque de sortie.

- Bloque d'entrée (pré processeur) : il consiste à préparer les données nécessaires pour le bloque 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 a la surface des conducteurs.

- Bloque 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.

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

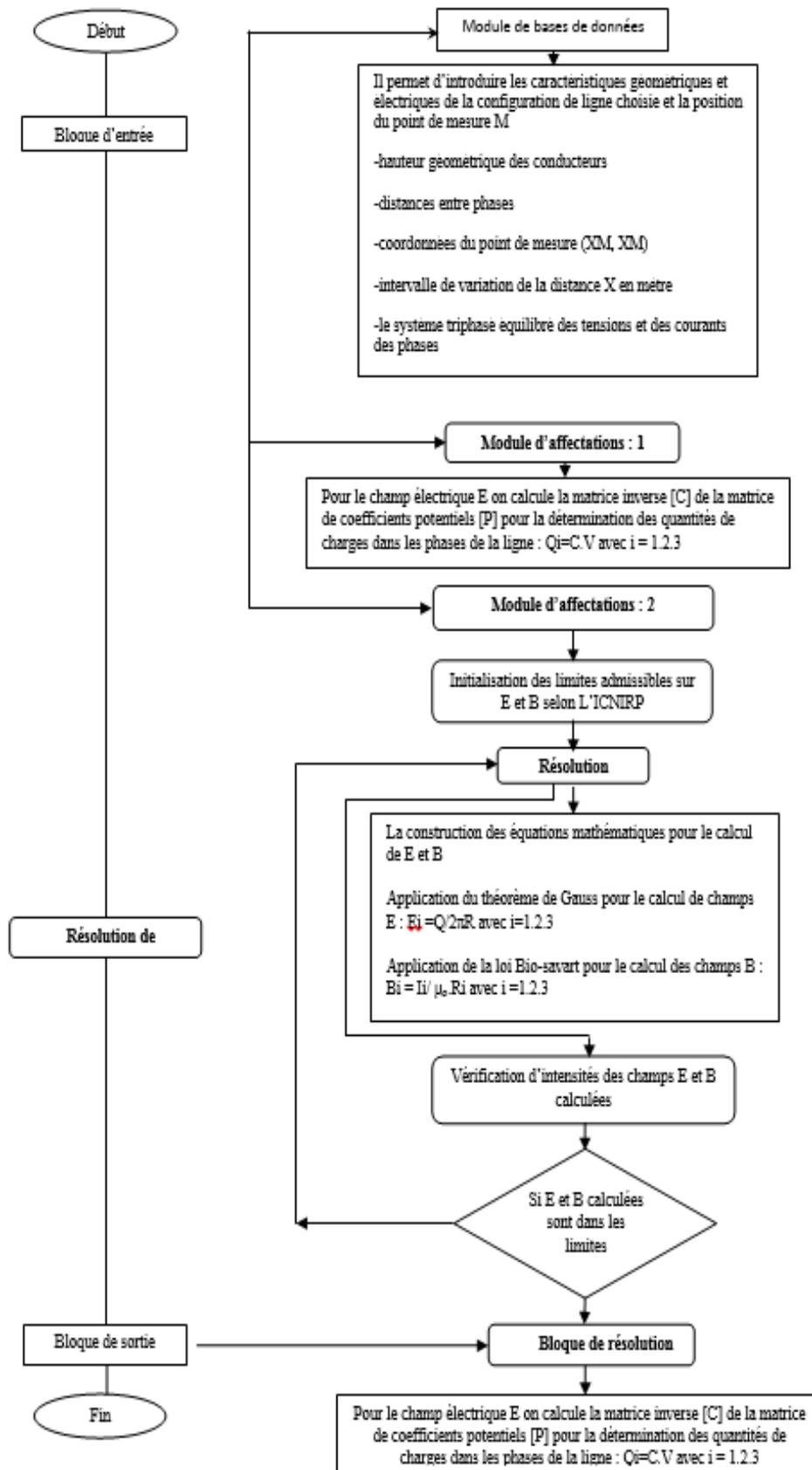


Fig.III.6 Algorithme pour le calcul du champ électromagnétique rayonné par une ligne HT

III.4.2.2. Exploitation du programme de calcul

Le code de calcul développé précédemment a été exploité pour valider le calcul analytique de la répartition du champ électrique et celui magnétique au voisinage des lignes hautes tensions, effectué pour des lignes 330 kV, 110 kV et 10 kV avec différents courants de charges dont les dispositions géométriques sont données dans le tableau 2.1. Les figures (2.6, 2.7, 2.8), représentent l'interprétation graphique des résultats de calcul analytiques des intensités de champ magnétique rayonnées par chaque circuit de ligne.

U, KV	XA(m)	XB(m)	XC,(m)	YA,(m)	YB,(m)	YC,(m)	YM,(m)
330	- 4.5	3.55	7.05	18	25.5	18	2
110	- 2	2	3.5	12.1	16.1	12.1	2.5
10	-0.5	0	0.5	8	8	8	2.5

Tableau III.1 : valeurs des paramètres normalisées des lignes 330 ,110 et 10 KV

III.4.2.3. Résultats et Discussion

D'après les (figures III.6.a-b-c), la densité du champ magnétique des lignes électriques aériennes triphasé 330 kV, 110 kV, 10 kV n'excède pas la valeur $0,04 \mu\text{T}$ qui représente le seuil à partir duquel la santé de l'homme est affectée, ceci sur des distances pas moins de 100 m, 60 m, 40 m, respectivement. Ces valeurs sont bien conformes à celles calculées dans [84]. 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.

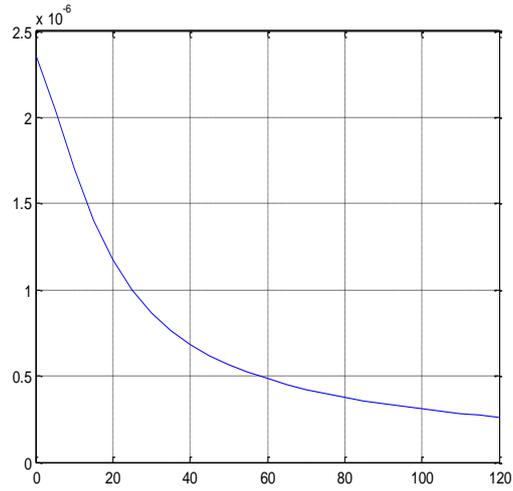


Fig.III.7.a Champ magnétique généré par une ligne 330kV, avec une charge de 240 A

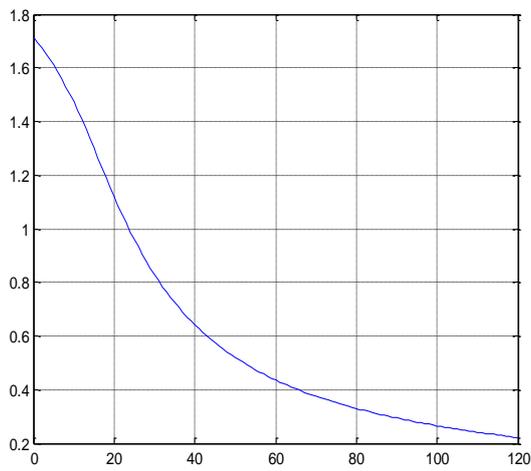


Fig. III.7.c Champ magnétique généré par une ligne 110 kV, avec une charge de 52

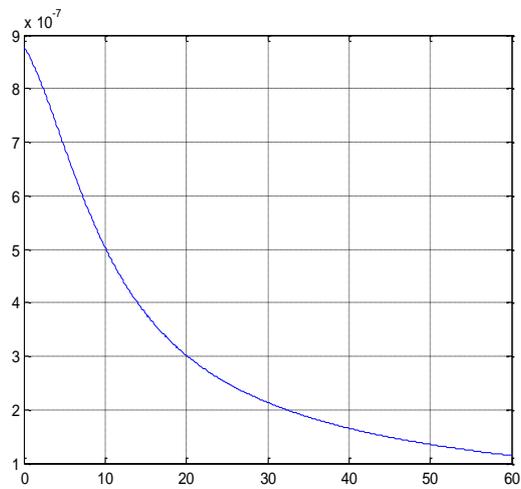


Fig. III.7.b Champ magnétique généré par une ligne 10kV, avec une charge de 105 A

III.5 Modélisation numérique des champs électromagnétiques 50 Hz

L'utilisation de systèmes électriques et électroniques rend impérative la compréhension des phénomènes relatifs aux interactions électromagnétiques mutuelles de tels systèmes. Lors de la conception d'un système, les contraintes de compatibilité électromagnétique doivent être considérées dès le début, de façon à définir les conceptions les plus adaptées et les moins sensibles aux perturbations. Ces dernières années, les outils de simulation numérique sont utilisés intensivement dans la résolution des problèmes en compatibilité électromagnétique.

Pour des 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 possédant 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 les méthodes les plus utilisées dans le monde de la simulation et de modélisation des champs de fuite et des interférences des systèmes énergétiques avec l'environnement on peut citer:

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

III.5.1 Méthode des différences finies

La méthode de différences finies [85] est l'une des premières méthodes numériques avoir été appliquée en génie électrique. Le principe de base de cette méthode consiste à discrétiser le domaine de résolution avec une grille, et d'approcher l'équation sous forme différentielle sur chaque nœud de la grille. Par exemple (Figure III.7), en 2D l'équation de Laplace :

$$\frac{\partial^2 \phi}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \phi}{\partial y^2} = 0 \text{ avec } \phi \text{ le potentiel électrique scalaire.}$$

Devient :

$$\frac{\partial \phi_{i+1,j} - 2\partial \phi_{i,j} + \partial \phi_{i-1,j}}{h^2} + \frac{\partial \phi_{i,j+1} - 2\partial \phi_{i,j} + \partial \phi_{i,j-1}}{k^2} = 0$$

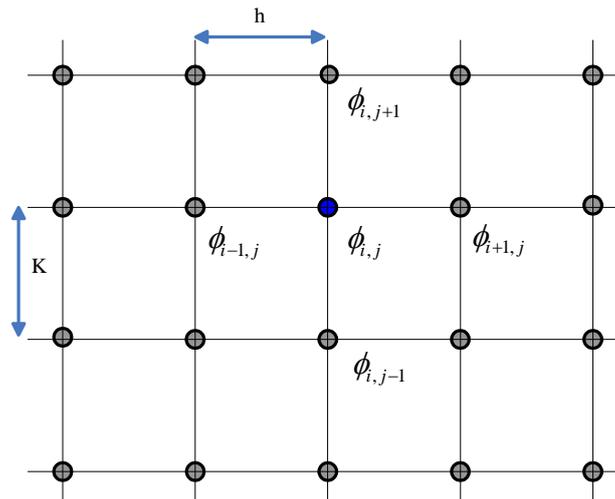


Fig.III.8 Application de la méthode DF en 2D et 3D.

L'équation aux dérivées partielles est ainsi transformée en un système algébrique linéaire creux. Si cette méthode est en principe relativement simple à mettre en œuvre, des problèmes peuvent se poser lorsque on doit gérer des géométries compliquées (discrétisation de la frontière, condition d'interface) [86].

III.5.2 Méthode des différences finies dans le domaine temporel

La méthode de différences finies dans le domaine temporel a été développée par **Kane S. YEB** [87], le principe de base est d'approximer la dérivée d'une fonction $f(x)$ à partir de ses points adjacents, Cette méthode consiste en une double discrétisation dans le temps et dans l'espace (2D ou 3D). L'application de cette méthode a été proposée la première fois pour résoudre les équations de Maxwell. Le maillage (Figure III.8) dans cette méthode consiste à

diviser le domaine en cubes élémentaires sur lesquels sont disposées les six composantes du champ électromagnétique qui sont dérivées à partir des équations de Maxwell.

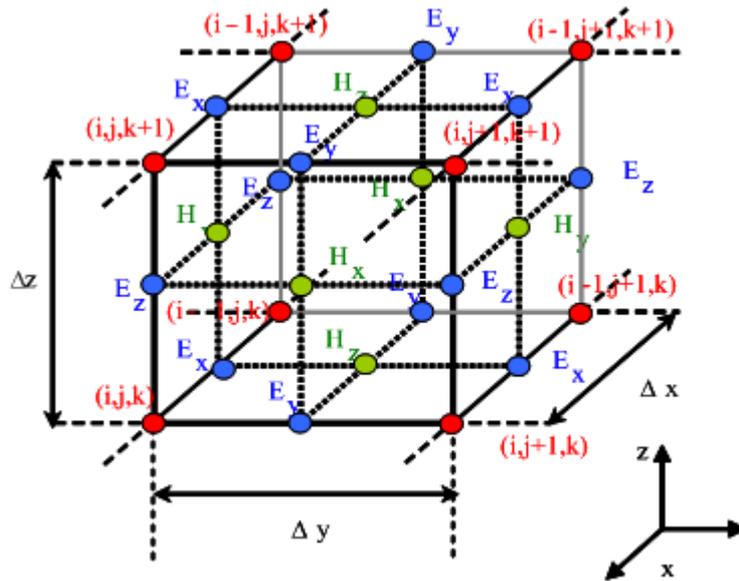


Fig.III.9 Application de la méthode FDTD- maillage de Yee

Les six équations dérivées sont:

$$-\frac{\partial B_x}{\partial t} = \frac{\partial E_z}{\partial y} - \frac{\partial E_y}{\partial z} - \frac{\partial D_x}{\partial t} = \frac{\partial H_z}{\partial y} - \frac{\partial H_y}{\partial z} - J_x$$

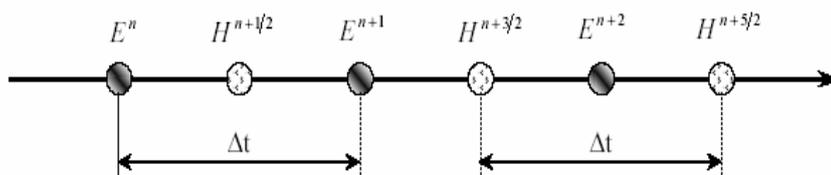
$$-\frac{\partial B_y}{\partial t} = \frac{\partial E_x}{\partial z} - \frac{\partial E_z}{\partial x} \text{ et } -\frac{\partial y}{\partial t} = \frac{\partial H_x}{\partial z} - \frac{\partial H_z}{\partial x} - J_y$$

$$-\frac{\partial B_z}{\partial t} = \frac{\partial E_y}{\partial x} - \frac{\partial E_x}{\partial y} - \frac{\partial z}{\partial t} = \frac{\partial H_y}{\partial x} - \frac{\partial H_x}{\partial y} - J_z$$

Une discrétisation de l'espace suivant un maillage régulier et structuré implique que toutes les composantes de champs \vec{E} et \vec{H} peuvent s'écrire sous la forme:

$$F\left(i\Delta x + K_k \left(\frac{\Delta x}{2}\right), j\Delta y + K_y \left(\frac{\Delta y}{2}\right), k\Delta z + K_s \left(\frac{\Delta z}{2}\right)\right)$$

De la même manière, le temps peut être discrétisé en intervalles Δt , ce qui implique que tout instant t peut être échantillonné par $n \Delta t$, avec n entier positif. Pour que les dérivées temporelles soient centrées, le champ électrique \vec{E} est calculé à l'instant $n \Delta t$ et le champ magnétique \vec{H} à $(n + \frac{1}{2})\Delta t$:



Critère de stabilité

Les équations du champ électromagnétique répondent à un schéma explicite. Les équations du champ électromagnétique répondent à un schéma explicite, c'est-à-dire qu'il n'y a pas besoin de système matriciel pour résoudre les équations. Si le système est simple à résoudre,

L'utilisateur est cependant limité dans le choix du pas temporel. La relation fixant ce critère de stabilité de la méthode FDTD est donnée ci-dessous :

$$\Delta t \leq \Delta t_{max} = \frac{1}{c \sqrt{\frac{1}{\Delta x^2} + \frac{1}{\Delta y^2} + \frac{1}{\Delta z^2}}} \quad (\text{la célérité de l'onde dans le milieu de propagation}).$$

Le problème essentiel posé par cette méthode vient des dimensions forcément limitées du volume étudié. Si au niveau de la source les conditions sont parfaitement claires, il n'en est pas de même au niveau des autres frontières du domaine. On introduit alors des frontières absorbantes qui simulent un milieu infini au-delà de la frontière et donc une absorption sans réflexion, de l'onde vers l'extérieur du volume d'étude.

III.5.3 Méthode des impédances

La méthode des impédances [88] consiste à construire un réseau électrique représentatif du milieu et à appliquer les équations de Kirchhoff. Pour cela, le milieu étudié est décomposé en cellules rectangulaires dans le cas d'une représentation 2D ou cubiques dans le cas 3D (Figure III.9). Chaque sommet des cellules est représenté par un nœud et chaque arête des cellules porte une impédance :

$$Z_m^{i,j,k} = \frac{1}{\sigma + j\omega\epsilon} \cdot \frac{\Delta L}{\Delta S}$$

Où m représente la direction considérée (x, y ou z). ΔL et ΔS représentent respectivement la longueur de l'arête correspondante et la section de la cellule. Les constantes σ, ϵ représentent les caractéristiques électriques du milieu. Les inconnues du problème sont les courants I dans chaque maille formée par les arêtes de chaque cellule. L'équation imposée pour chaque cellule est loi de Kirchhoff, où une force électromotrice est imposée conformément à la loi d'induction de Faraday.

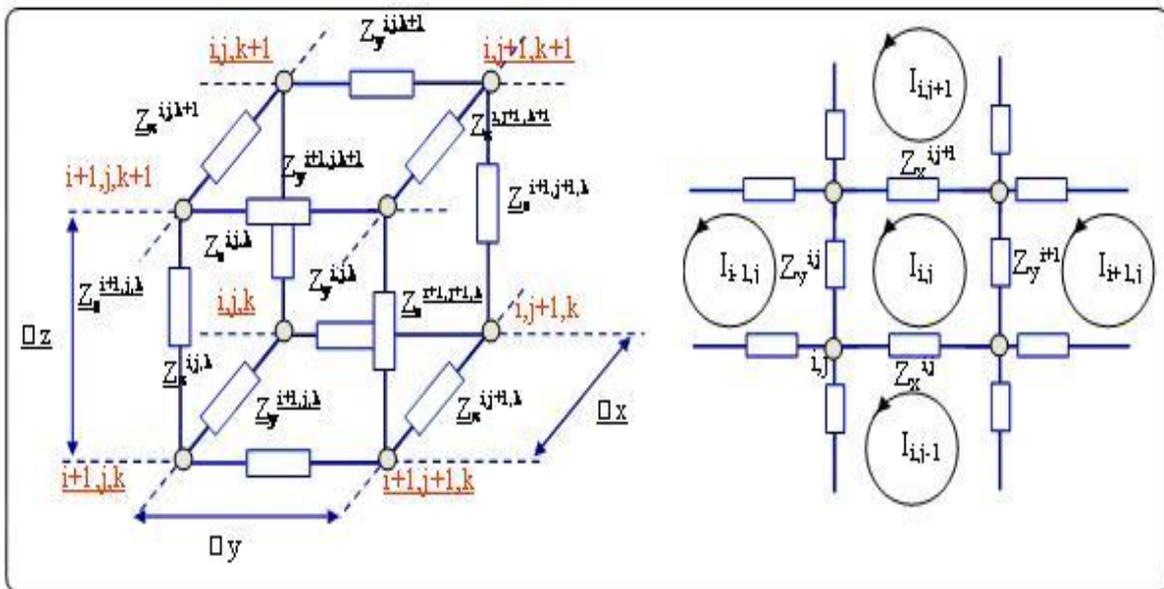


Fig. III.10 Représentation 2D de la méthode des impédances

III.5.4 Méthode des éléments finis

La méthode des éléments finis [89] est un outil de résolution numérique des systèmes physiques. Elle nécessite l'utilisation intensive de l'ordinateur. C'est une méthode à mufti-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 tes problèmes compliqués Gomme par exemple les simulations sur les milieux hétérogènes, l'application du maillage dépend de la taille de chaque élément constituant le système. La (figure III.10) résume une résolution numérique d'un système physique par la méthode EF. 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

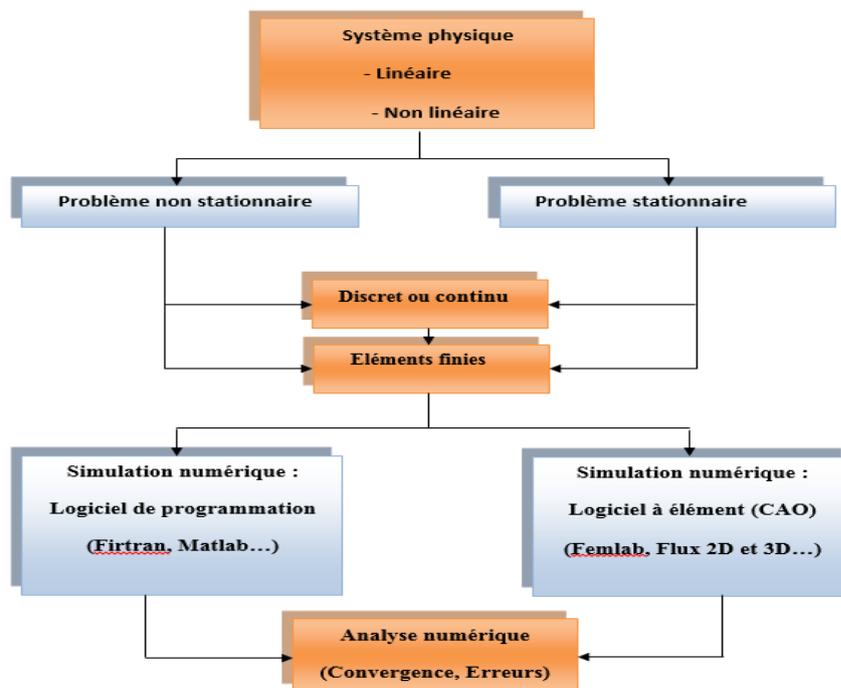


Fig. III.11 Description de la méthode- résolution d'un système physique par la méthode des éléments finis

➤ **Le maillage**

L'opération de maillage consiste à discrétiser le domaine Ω en sous domaines Ω_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, FEMLAB... 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 linéiques :** Elles servent à mailler une surface qui peut représenter le domaine surfacique Ω ou une section méridienne d'un domaine volumique Ω axisymétrique.
- **Les mailles volumiques :** Dans ce cas les mailles sont des volumes. La Figure (III.11) ci-dessous présente les différents cas du maillage.

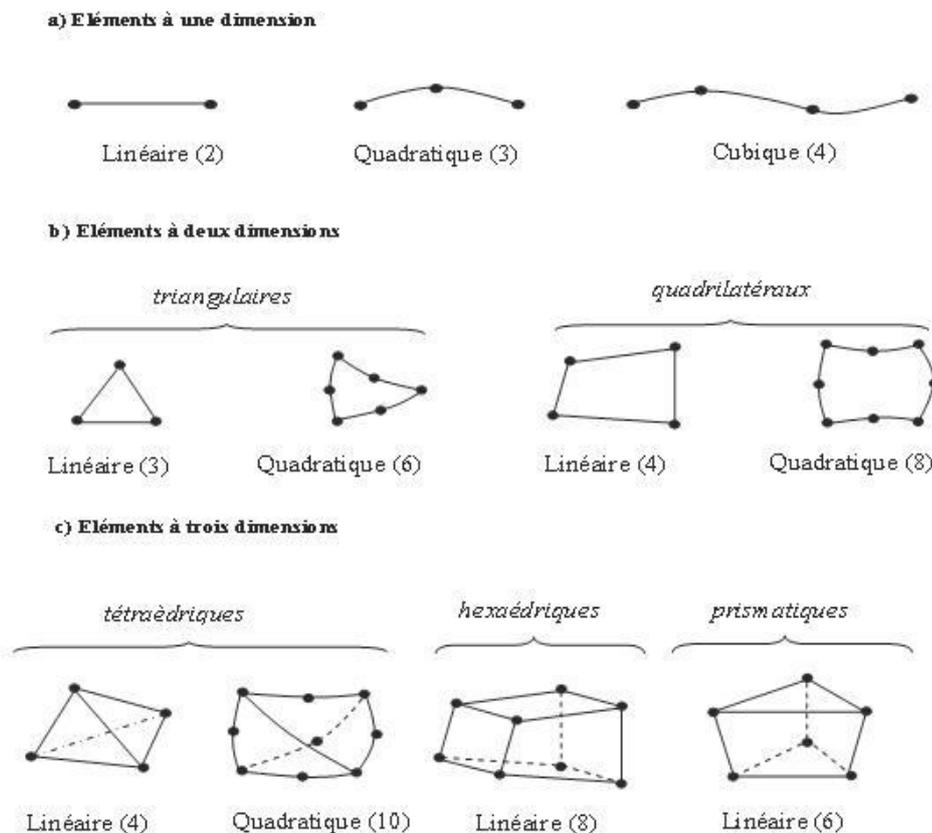


Fig.III.12 Les différents cas du maillage

III.6 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 et sont valables pour les circuits de géométrie simple. En terme pratique la taille physique du système pose des problèmes de mathématiques complexes et d'incertitudes dans les résultats de calcul. Dans le cas des lignes aériennes haute tension le problème qui se pose est bien le petit rayon du conducteur par rapport à la grande taille du pylône, dans ce cas le passage à la modélisation numérique permet de limiter le domaine de résolution par un maillage et d'établir des modèles mathématiques qui traitent le problème par conversion des équations de Maxwell en des équations électrostatiques et magnétostatiques, pour le régime quasi statique.

Dans la dernière partie du chapitre, 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 latéral du champ électrique et celui magnétique rayonnés par les lignes haute tension. Les résultats de calcul obtenus sont en accord avec ceux publiés dans le travail publié par [52].

Chapitre VI

Analyse de l'environnement électromagnétique au voisinage des lignes haute tension

Sommaire

VI. Analyse de l'environnement électromagnétique au voisinage des LHT

VI.1 Introduction

VI.2 Equations de propagation du champ électromagnétique

VI.3 Méthodes de réduction du champ électromagnétique sous les LHT

VI.3.1 Méthode de réduction du champ électrique

VI.3.1.1 Effet de changement de la géométrie de la ligne

A. Effet de la configuration de la ligne

B. Effet de la garde au sol

VI.3.1.2 Effet de la distance entre phases

VI.3.1.3 Effet du nombre de conducteurs par phase

VI.3.1.4 Effet de la flèche et des câbles de garde

VI.3.2 Méthode de réduction du champ magnétique

VI.3.2.1 Effet de changement de la géométrie de la ligne

A. Effet de la configuration de la ligne

B. Effet de la garde au sol

VI.3.2.2 Effet de la distance entre phases

VI.3.2.3 Effet de la variation de la charge

VI.4 Conclusion

VI.1 Introduction

Les équations de Maxwell régissent tous les phénomènes d'électromagnétisme, lesquelles servent de support à la description des ondes électromagnétiques et de leur propagation

VI.2 Equations de propagation du champ électromagnétique

Le phénomène de propagation des ondes électromagnétiques sur les lignes de transmission de l'énergie électrique peut être expliqué en considérant les deux dernières équations de Maxwell établies en l'absence des sources de courants [90].

$$\begin{cases} \overrightarrow{\text{rot}}\vec{E} \sim \partial\vec{B}/\partial t \\ \overrightarrow{\text{rot}}\vec{B} \sim \partial\vec{E}/\partial t \end{cases} \dots\dots\dots (VI.42)$$

Cela signifie qu'un champ E(ou B) variable dans le temps engendre un champ B(ou E) tournant de même nature. En effet si on choisie dans un premier temps un champ électrique variable E1, celui-ci va engendrer un champ d'induction magnétique tournant B1 (figure 4.4). Mais comme ce champ B1 s'établit progressivement, il est variable dans le temps. Il va donc à son tour produire un champ électrique E2 qui en s'établissant dans le temps va produire un champ d'induction magnétique B2, et ainsi de suite. De cette manière, le couple de champs(E ,B) s'auto-entretient dans le temps avec une progression dans l'espace .

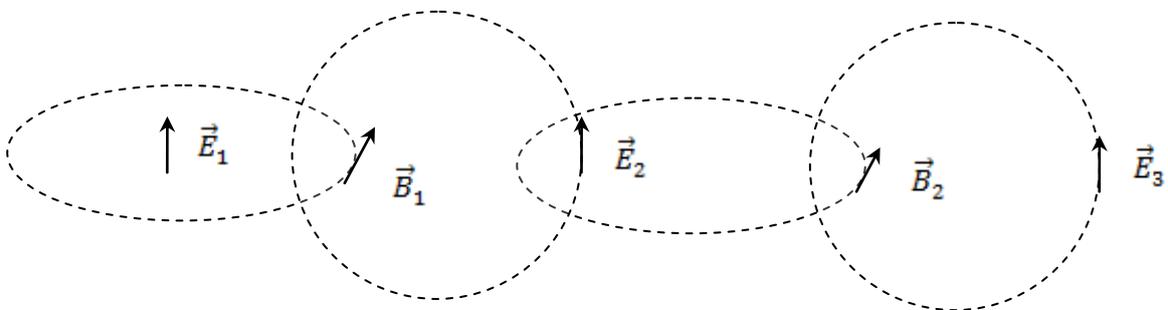


Figure VI.1 Illustration du phénomène de propagation du champ électromagnétique [90]

Prenons le rotationnel des équations de Maxwell précédentes, on peut écrire :

$$\begin{cases} \overrightarrow{\text{rot}}(\overrightarrow{\text{rot}}\vec{E}) = -\frac{\partial}{\partial t}(\overrightarrow{\text{rot}}\vec{B}) \\ \overrightarrow{\text{rot}}(\overrightarrow{\text{rot}}\vec{B}) = \mu_0\overrightarrow{\text{rot}}\vec{j} + \mu_0\varepsilon_0\frac{\partial}{\partial t}(\overrightarrow{\text{rot}}\vec{E}) \end{cases} \dots\dots\dots \text{(VI.43)}$$

Puis remplaçons $\overrightarrow{\text{rot}}\vec{B}$ et $\overrightarrow{\text{rot}}\vec{E}$ par les résultats des équations (M4) et (M3) dans les deux équations précédentes ; et utilisons la propriété $\overrightarrow{\text{rot}}(\overrightarrow{\text{rot}}) \equiv \overrightarrow{\text{grad}}(\text{div}) - \Delta$, ou

$\Delta \equiv \frac{\partial^2}{\partial x^2} + \frac{\partial^2}{\partial y^2} + \frac{\partial^2}{\partial z^2}$ est l'opérateur Laplacien :

$$\begin{cases} \overrightarrow{\text{grad}}(\text{div}\vec{E}) - \Delta\vec{E} = -\frac{\partial}{\partial t}(\mu_0\vec{j} + \mu_0\varepsilon_0\frac{\partial\vec{E}}{\partial t}) \\ \overrightarrow{\text{grad}}(\text{div}\vec{B}) - \Delta\vec{B} = \mu_0\overrightarrow{\text{rot}}\vec{j} + \mu_0\varepsilon_0\frac{\partial}{\partial t}(-\frac{\partial\vec{B}}{\partial t}) \end{cases} \dots\dots\dots \text{(VI.44)}$$

En substituant maintenant les termes $\text{div}\vec{E}$ et $\text{div}\vec{B}$ donnés par les équations (M1) et (M2), on obtient :

$$\begin{cases} \overrightarrow{\text{grad}}\left(\frac{\rho}{\varepsilon_0}\right) - \Delta\vec{E} = -\mu_0\frac{\partial\vec{j}}{\partial t} - \mu_0\varepsilon_0\frac{\partial^2\vec{E}}{\partial t^2} \\ \overrightarrow{\text{grad}}(0) - \Delta\vec{B} = \mu_0\overrightarrow{\text{rot}}\vec{j} + \mu_0\varepsilon_0\frac{\partial}{\partial t}(-\frac{\partial\vec{B}}{\partial t}) \end{cases} \dots\dots\dots \text{(VI.45)}$$

Après réarrangement des différents termes dans chacune des équations, on trouve les équations de propagation des champs à partir des sources :

$$\begin{cases} \Delta\vec{E} - \mu_0\varepsilon_0\frac{\partial^2\vec{E}}{\partial t^2} = \frac{1}{\varepsilon_0}\overrightarrow{\text{grad}}\rho + \mu_0\frac{\partial\vec{j}}{\partial t} \\ \Delta\vec{B} - \mu_0\varepsilon_0\frac{\partial^2\vec{B}}{\partial t^2} = -\mu_0\overrightarrow{\text{rot}}\vec{j} \end{cases} \dots\dots\dots \text{(VI.46)}$$

Si on se place loin des sources (densités des charges ρ et de courants \vec{j}) qui donnent naissance aux champs électriques, alors on obtient les équations de propagation des ondes électromagnétiques :

$$\begin{cases} \Delta \vec{E} - \mu_0 \varepsilon_0 \frac{\partial^2 \vec{E}}{\partial t^2} \equiv 0 \\ \Delta \vec{B} - \mu_0 \varepsilon_0 \frac{\partial^2 \vec{B}}{\partial t^2} \equiv 0 \end{cases} \dots\dots\dots (VI.47)$$

On remarque que ces équations sont du type de l'équation d'Alembert que l'on retrouve pour tout phénomène de propagation en physique (ondes sur une corde vibrante, onde sonores ...)

VI.3 Méthodes de réduction du champ électromagnétique sous les lignes haute tension

Les influences du champ électromagnétique des lignes électriques HT sur l'environnement sont bien connues et analysées dans plusieurs travaux de spécialité, [91]. Un intérêt particulier présente les effets négatifs du champ magnétique et celui électrique engendré par les réseaux électriques à haute tension sur la santé humaine. Pour diminuer ces effets, on minimise les valeurs du champ électromagnétique au voisinage des lignes par optimisation de leur structure et par réglage de leurs grandeurs électriques. Ces techniques permettent de contrôler la pollution électromagnétique au voisinage des lignes haute tension, et influent beaucoup sur leur qualité de service ; le tableau 1 nous donne une idée générale sur l'influence des paramètres géométriques sur les intensités de champs rayonnés par les lignes aériennes.

Paramètres		CE	CM	RI	AN
Espacement entre phases	↑	↑	↑	↘	↓
Hauteur de la phase au sol	↑	↓	↓	↘	↘
Nombre de conducteurs du faisceau	↑	↑	=	↓	↓
Espacement entre les conducteurs subdivisés	↑	↗	=	↗	↗
Section des conducteurs équivalents	↑	↗	=	↘	↘

Tableau VI.1 : influence des paramètres géométriques sur les champs électrique et magnétique d'une ligne HT (↑ augmentation, ↓ diminution, ↗ léger augmentation, ↘ léger diminution, = aucun effet)

VI. 3.1 Méthodes de réduction du champ électrique

Le champ électrique au voisinage d'une ligne haute tension dépend de ses paramètres géométriques. Cependant les effets du champ électrique peuvent être réduits par certaines conceptions appropriées des lignes.

VI.3.1.1 Effets de changement de la géométrie de la ligne

Quelques changements dans la conception de la ligne peuvent affecter les intensités du champ électrique à son voisinage différemment de ceux sous les conducteurs.

Les principaux paramètres considérés sont : la configuration de la ligne, la hauteur, la flèche, les dimensions des conducteurs, le blindage et l'espacement des phases. Les intensités de champs maximales sont déterminées en fonction des paramètres géométriques non dimensionnels [92].

Dans ce paragraphe un programme de calcul a été élaboré sous l'environnement MATLAB pour l'analyse des différentes options de réduction du champ électrique figure (VI.8).

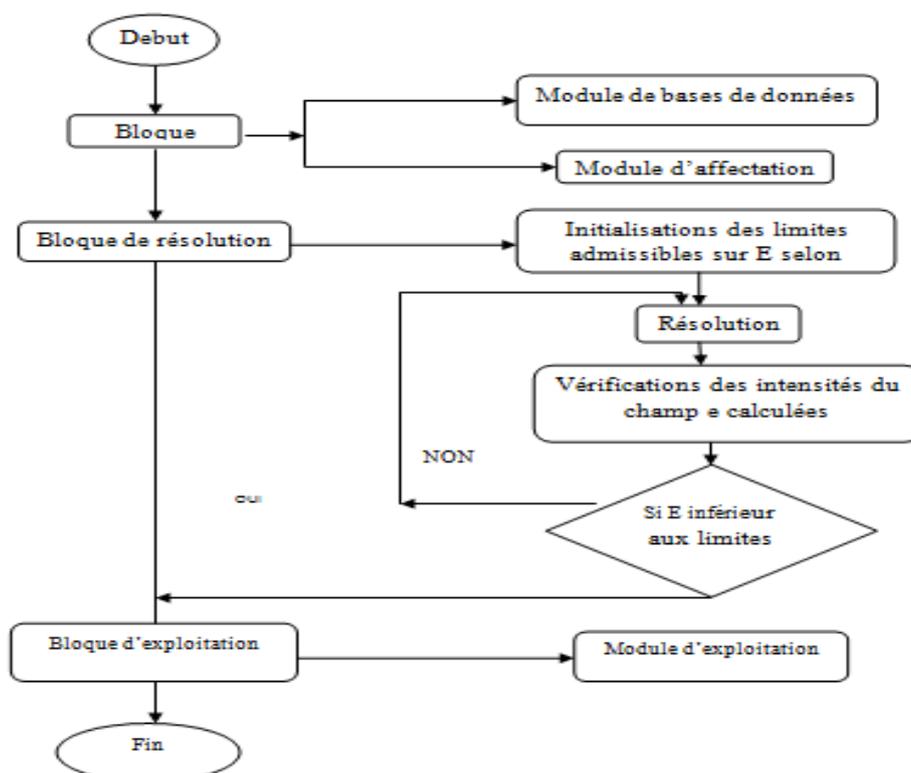


Fig. VI.2 Algorithme de réduction du champ électrique au voisinage des lignes HT

➤ **Effet de la configuration de la ligne**

L'effet de la configuration géométrique de la ligne sur la distribution des quantités de charges électrique et magnétique est illustré par une application a un circuit de ligne simple 525KV [92] avec un faisceau de 3 conducteurs par phase de rayon 3.3 cm et distant de 45cm , dont on va calculer l'intensité du champ électrique pour trois configurations différentes :

horizontale, verticale et triangle, la distance entre phase est $S=10m$ et la hauteur des conducteurs par rapport au sol est $H= 10.6m$.

La figure (VI.9) représente le profile du champ électrique pour les trois configurations de ligne obtenues a partir du code de calcul développé précédemment. Les caractéristiques électriques et géométriques des trois configurations sont identiques.

D'après la figure ci-dessus on peut constater que l'intensité maximale du champ électrique donné par la configuration triangle est moins importante que celle donné par les deux autres configurations horizontales et verticales. En s'éloignant des conducteurs l'effet de la configuration de la ligne agit différemment sur le profile du champ électrique devient plus faible dans le cas de la configuration verticale par rapport a celle horizontale. Ceci peut être expliqué par l'utilisation des pylônes avec des gardes au sol plus importante dans le cas des lignes en nappe verticale.

➤ **Effet de la garde au sol**

Augmenter la hauteur de la ligne est le changement de sa configuration le plus efficace pour la réduction du champ électrique à son voisinage. La dépendance entre la hauteur de la ligne H et l'intensité de champ maximale E est exprimée par une relation empirique :

$$\left(\frac{E_1}{E_2}\right) = \left(\frac{H_1}{H_2}\right)^m \dots\dots\dots (VI.48)$$

Avec E_1 et E_2 représentent les intensités de champ maximales pour deux hauteurs respectives H_1 et H_2 , le coefficient m dépend de la géométrie de la ligne , dans le cas d'une configuration horizontale on prend $m = -1.4$ [92].La figure (VI.10) représente le profile latéral

du champ électrique de notre modèle de ligne étudié considéré avec deux hauteurs différentes H_1 et H_2 . On peut voir sur cette figure que l'augmentation de la hauteur de la ligne permet une diminution du champ électrique jusqu'à une longueur critique (L_c) à partir du centre de la ligne, au delà de cette distance l'intensité du champ électrique est influencé de manière différente par l'augmentation de la hauteur de la ligne. La distance critique (L_c) pour laquelle l'augmentation de la hauteur de la ligne n'influe pas sur le champ électrique au voisinage de la ligne est exprimée en fonction de ses paramètres géométriques à partir de la figure (VI.11).

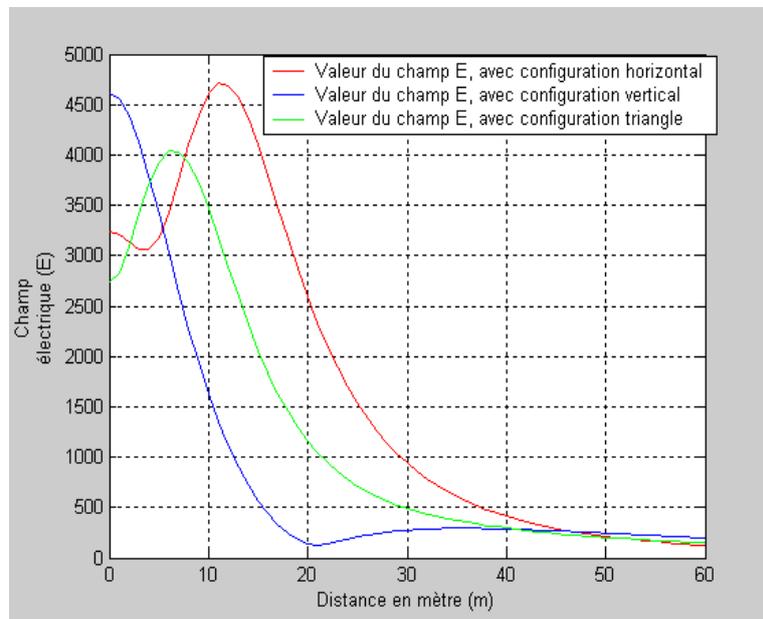


Figure VI.3 Champ électrique pour les trois configurations de lignes

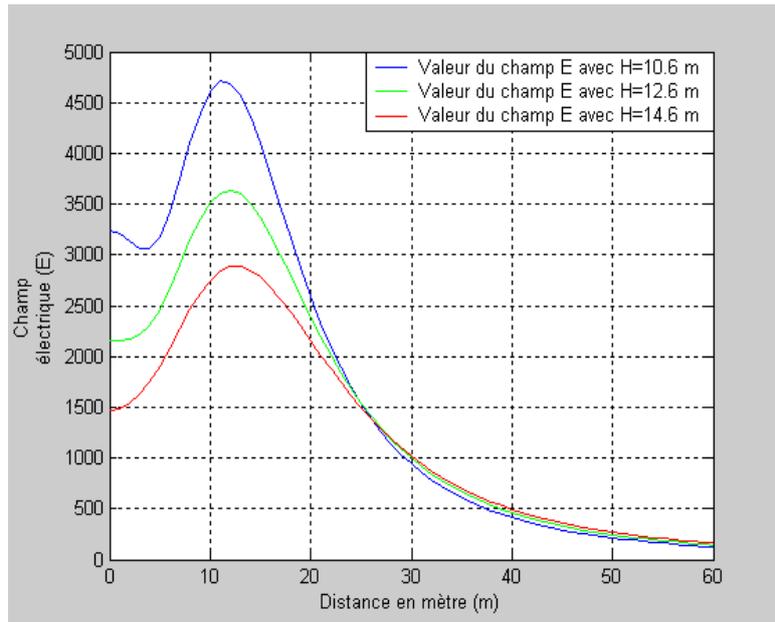


Fig. VI.4 Champ électrique pour différentes gardes au sol

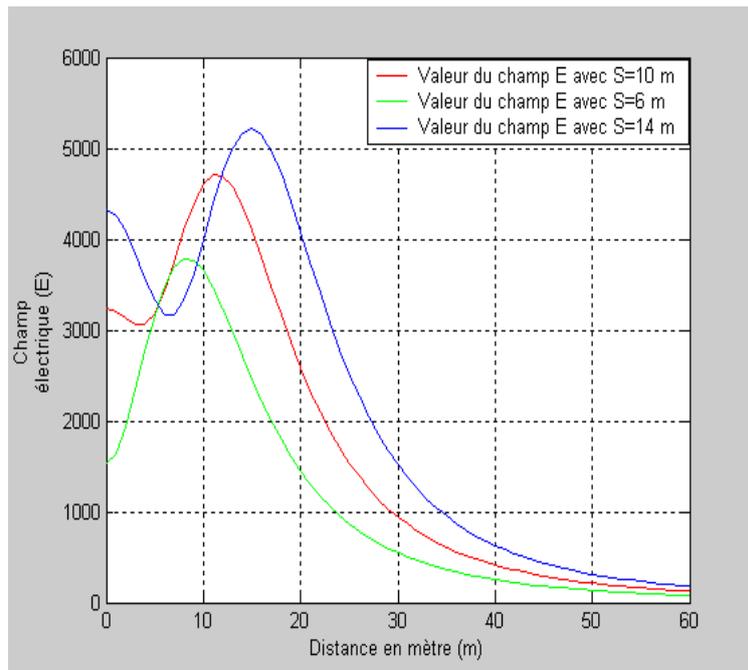


Fig.VI.5 Effet de la distance entre phases sur le profil du champ CE

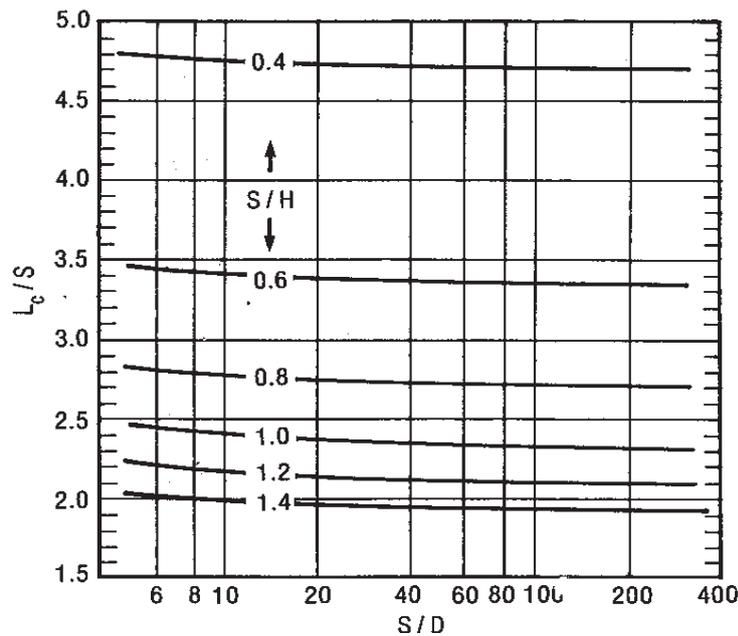


Fig .VI.6 Distance critique (L_c), pour la variation du champ CE avec la hauteur H [92]

➤ Effet de la distance entre phases

L'effet de l'espacement des phases dit aussi compaction des lignes, sur l'intensité du champ maximal, est une option très utilisée dans la réduction du champ électrique au voisinage des lignes. La majorité des lignes compactées génèrent un champ électrique faible. Cet effet apparait clairement sur la figure (VI.12), qui représente le comportement du champ électrique de notre ligne 525KV avec une configuration en nappe horizontale et pour trois distances entre phases différentes 9,10 et14 m. Ainsi la compaction des lignes reste une option très attractive pour la réduction du champ électrique, et nécessite l'utilisation des conducteurs de grande section pour minimiser le bruit acoustique.

VI.3.1.2 Effets du nombre de conducteurs par phase

L'effet des dimensions du conducteur (D) peut être évalué en utilisant dans la conception faisceaux, le diamètre équivalent des conducteurs exprimé par la relation suivante :

$$d_{eq} = D \cdot \sqrt[n]{\frac{nd}{D}} \dots\dots\dots (VI.49)$$

Par définition c'est le diamètre du conducteur unique qui doit avoir la même quantité de charge électrique par unité de longueur que celui en faisceaux et génère ainsi la même intensité de champ électrique. De façon générale on peut voir que les dimensions des conducteurs agissent de la même façon sur la répartition du champ électrique sous et à l'extérieur des conducteurs, et en tout point l'intensité du champ varie proportionnellement à la charge des conducteurs et peut être exprimé par la relation suivante :

peut être exprimé par la relation suivante :

$$\frac{E_1}{E_2} = \ln\left(\frac{2S}{D_2}\right) / \ln\left(\frac{2S}{D_1}\right) \dots\dots\dots (VI.50)$$

Avec E1 et E2 sont les champs électriques générés par les lignes avec espacement entre phase S et les diamètres respectifs des conducteurs D1 et D2. Les changements radicaux des dimensions des conducteurs affectent de façon appréciable la répartition du champ électrique, cette option ne peut être utilisée souvent pour des raisons techniques et économiques.

VI.3.1.3 Effets de la flèche et des câbles de garde

L'effet de la flèche est normalement négligeable si on prend l'intensité du champ électrique par rapport au point le plus bas par rapport aux conducteurs de la ligne, dans ce cas l'écart dans le calcul du champ électrique avec ou sans la flèche est inférieure à 1%, cette différence exprimée en pourcentage du champ, augmente en valeur absolue avec la distance à la ligne et reste négligeable.

Les câbles de gardes qui assurent la protection contre la foudre n'influencent pas sur le champ électrique à la terre, ces derniers sont placés à une certaine hauteur par rapport aux conducteurs de la ligne et mis à la terre à leurs extrémités, leur présence réduit le champ électrique d'environ 2%.

VI. 3.2 Méthodes de réduction du champ magnétique

Pour réduire le champ magnétique au voisinage d'une ligne haute tension on peut procéder de la manière suivante :

1- En augmente la distance entre les lignes électriques et la population. La distance autorisée pour la construction et l'exploration des airs des lignes aériennes haute tension est fixé sur des couloirs de largeur maximale 45 m. Dans ces couloirs, il est conditionné une autorisation préalable pour la construction de bâtiments et d'autres structures, Cette mesure ne réduit pas les champs magnétiques, mais permet de réduire son effet sur les humains. Dans son travail **Carlos Lemos [93]** a développé un logiciel CEM_ELF.LAT pour la détermination de la zone de sécurité du champ magnétique pour deux circuits de lignes 60 KV et 220KV figure (8.a et b) conformément aux valeurs inferieures a celles limites imposées par l'organisation internationale de protection contre le rayonnement non ionisant **l'ICNIRP [4]**.

2- En diminuant le courant dans la source. Cela se fait en augmentant la tension. Cette diminution du courant donne une réduction du champ magnétique et peut être réalisée comme suite :

- Par le blindage de la source de champ ou de la personne qui est près d'elle. Cette procédure consiste à ajouter entre le circuit d'alimentation et les couloirs de passage des lignes, des conducteurs légèrement isolée des conducteurs aériens. Ces conducteurs sont croisés connectés à chaque extrémité afin de former une boucle. Une tension est induite par le champ magnétique formé par cette boucle qui a son tour, induit un courant qui crée un champ magnétique qui annule partiellement le champ de la ligne de transmission.

- En faisant l'annulation de phase. L'annulation de phase consiste à avoir deux champs égaux de sens opposé qui s'annulent les uns des autres. Cette procédure est possible car nous avons d'une part la fréquence de 60 Hz et que les champs sont alternatifs et inversent leur direction 60 fois par seconde.

- En mettant en œuvre de nouvelles conceptions qui ciblent principalement la géométrie du pylône et la hauteur des conducteurs au-dessus du sol on peut utiliser l'un des modèles suivants:

- **Compaction** : Le compactage consiste à réduire la distance des phases des lignes électriques ainsi que d'accroître la garde au sol des deux phases extérieures. Cela se fait avec des isolateurs en interphase. Il en résulte une diminution du champ magnétique. L'avantage du compactage est qu'il peut être utilisé pour les lignes existantes. d'un autre côté, l'inconvénient de cette méthode c'est l'augmentation de l'effet couronne et qu'elle n'est pas applicable pour toutes les configurations des lignes.
- **Split phase line**: consiste en un fractionnement des phases des lignes en sous phases qui donne une réduction du champ magnétique proportionnelle au cube de la distance .Comme pour la compaction, la subdivision des phases des lignes en sous phases s'accompagne par un bruit audible produit par l'effet couronne.

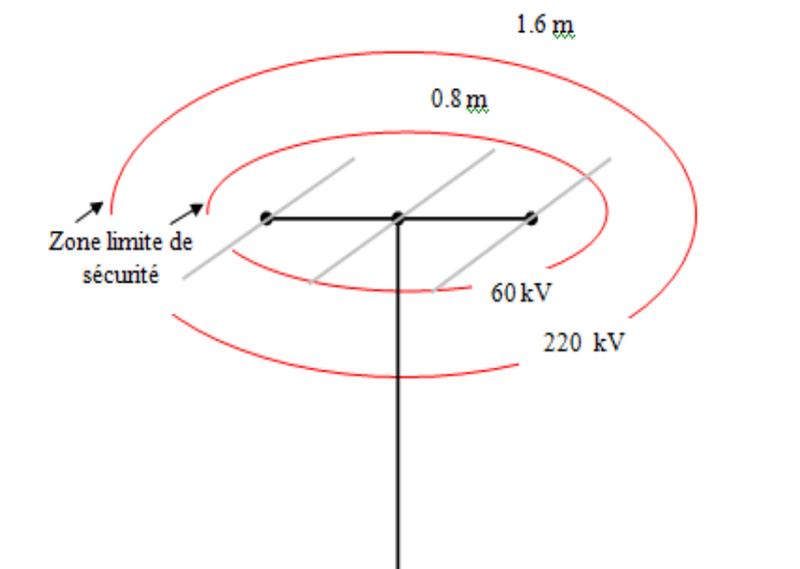


Fig.VI.7.a Zone de servitude du champ magnétique au voisinage des lignes haute tension 60KV et 220KV, pour une valeur limite du champ magnétique $B = 100 \mu\text{T}$ [93]

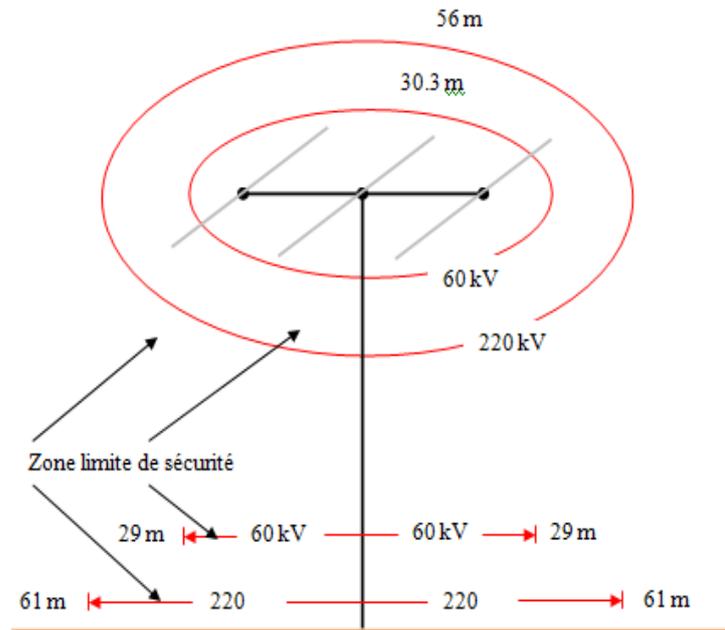


Fig.VI.7.b. Zone de servitude du champ magnétique au voisinage des lignes haute tension 60KV et 220KV, pour une valeur limite du champ magnétique $B = 0.4 \mu\text{T}$ [93]

VI. 3.2.1 Effets de changement de la géométrie de la ligne

➤ Effet de la configuration de la ligne

Le profile du champ magnétique tracé pour le modèle de ligne 525Kv proposé précédemment avec trois configurations : horizontale, verticale et triangle, est illustré par le figure (VI.14). D'après cette figure on peut constater que l'intensité maximale du champ magnétique donné par la configuration verticale est plus importante que celle donné par les deux autres configurations horizontales et triangle ceci a n'importe quel distance de la ligne ceci peut être Ceci peut être expliqué par l'utilisation des pylônes avec des gardes au sol plus importante dans le cas des lignes en nappe verticale. En s'éloignant des conducteurs l'effet de la configuration de la ligne agit différemment sur le profile du champ magnétique, ce dernier devient plus faible dans le cas de la configuration horizontale par rapport a celle triangle.

➤ Effet de la garde au sol

La figure (VI.15) représente la densité de champ magnétique calculée pour la configuration horizontale du modèle de ligne choisi. Cette figure montre que la densité du champ magnétique généré par la ligne augmente avec la diminution de la garde au sol. On peut toujours voir sur cette figure que l'intensité maximale du champ magnétique est relevée sous l'axe du pylône, sa variation est inversement proportionnelle au cube de la hauteur géométrique des conducteurs par rapport au sol.

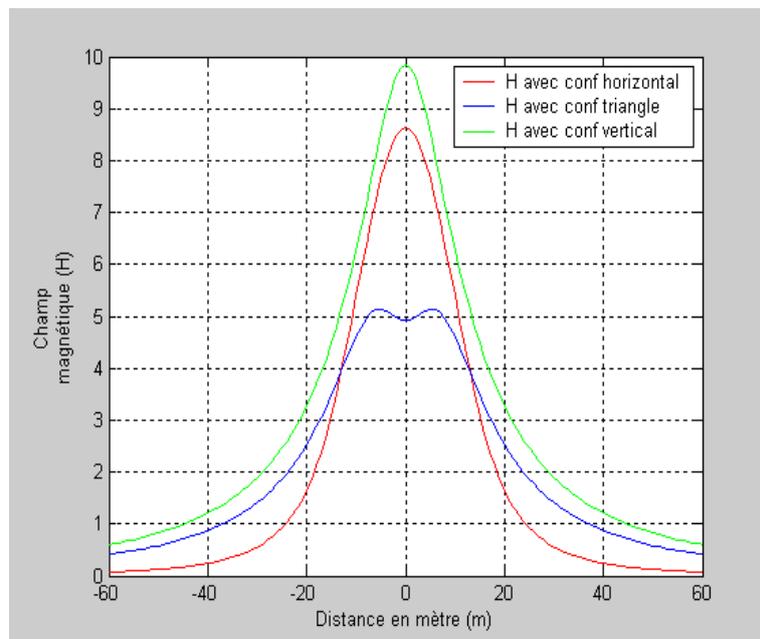


Fig. VI.8 Champ magnétique pour les trois configurations de lignes

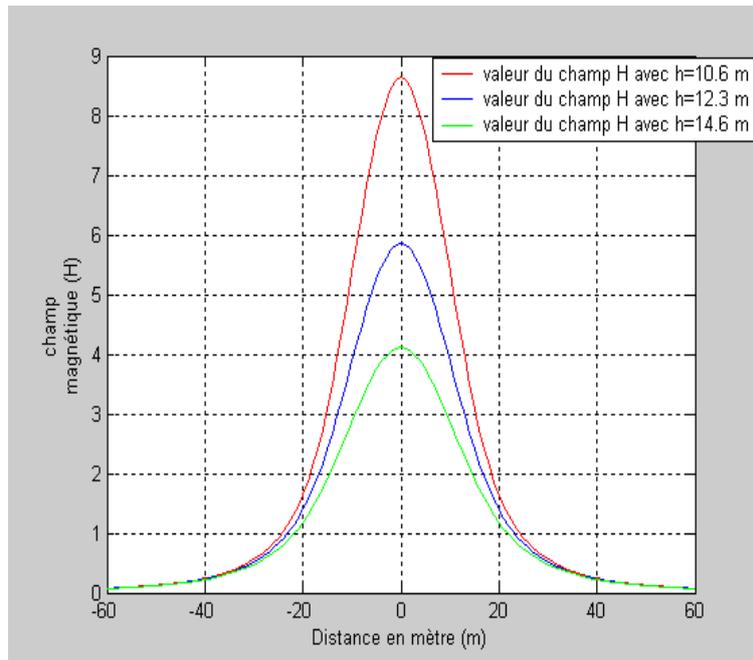


Fig. VI.9 Champ magnétique calculé pour différentes hauteurs de la ligne.

➤ **Effet de la distance entre phases**

L'espacement des phases agit sur l'intensité du champ magnétique généré par la ligne de la même façon que pour le champ électrique. On peut voir sur la figure (VI.16), que l'intensité du champ magnétique généré par notre modèle de ligne choisit augmente avec l'augmentation des distances entre phases. L'intensité maximale du champ est toujours relevée sous l'axe du pylône. La compaction des lignes reste l'une des options les plus fréquemment utilisées dans la réduction des quantités de charges magnétiques rayonnées au voisinage des lignes haute tension.

➤ **Effet de la variation de la charge**

Le champ magnétique généré par une ligne haute tension varie indépendamment des tensions de ses phases, il est proportionnelle aux intensités de courants qui les traversent.

La figure (VI.17) montre les profils du champ magnétique tracés pour le modèle de ligne proposé pour ses régimes de charge : minimal, moyen et maximal estimés dans l'intervalle [20%,40% ,60%,80%,100% et 120%] de sa charge. On peut voir sur cette figure que les intensités du champ magnétique atteignent leurs valeurs maximales sous les axes des pylônes et décroissent rapidement de manière inversement proportionnelle à la distance des conducteurs.

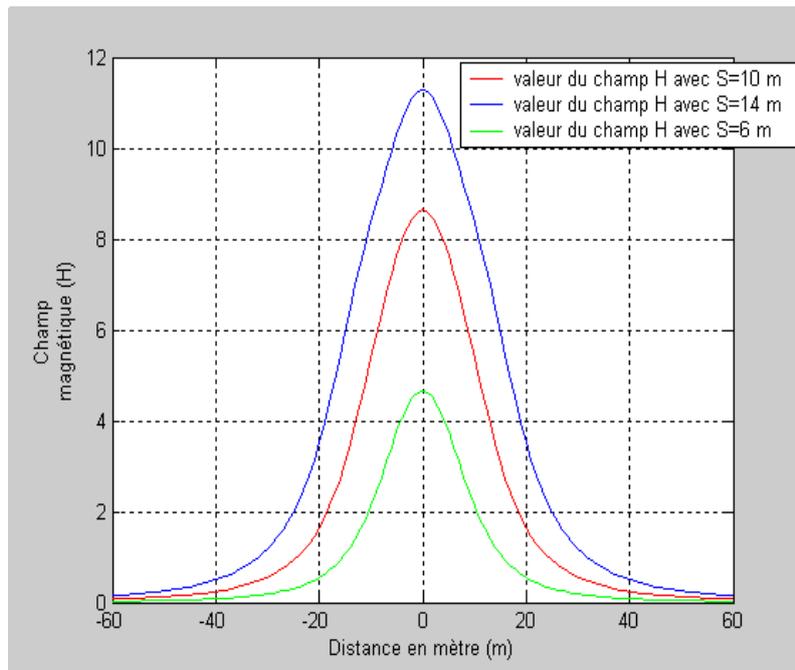


Fig. VI.10 Champ magnétique calculé pour différents espacement entre phases

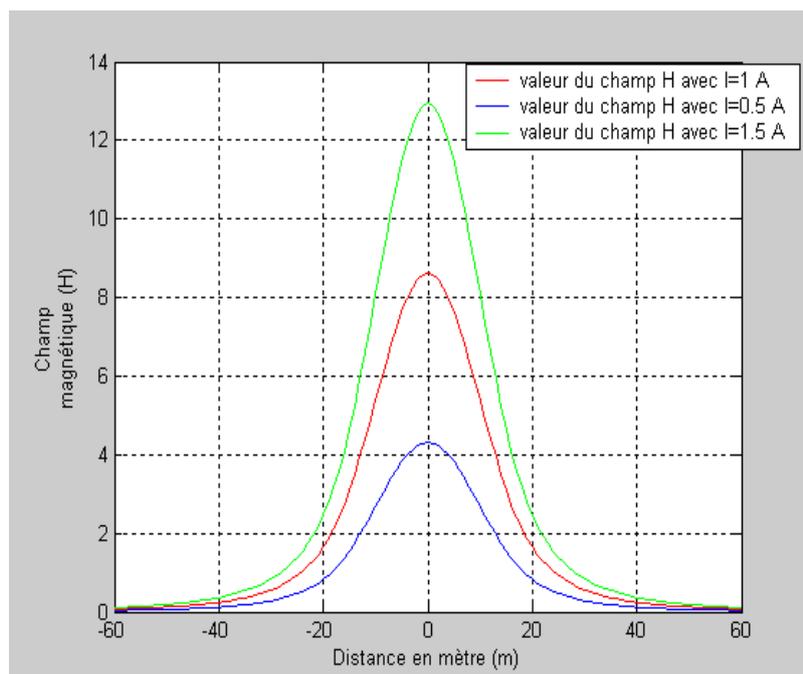


Fig.VI.11. Effet de la variation de la charge

VI.4 Conclusion

Dans ce chapitre nous avons discuté et évalué les différentes techniques de réduction des champs électrique et magnétiques rayonnés par les lignes électriques haute tension.

Nous avons montré l'effet de variation des caractéristiques électriques et géométriques sur les profils latéraux de ces champs relevés à partir du code MATLAB développé au deuxième chapitre.

On a pu conclure dans cette partie du travail que :

-Le champ électrique varie avec le niveau de tension, certains changements dans la configuration de la permet de diminuer l'intensité de champ jusqu'à une distance critique L_c fixée relativement à ses paramètres géométriques; au delà de cette distance cette option de réduction du champ agit différemment. L'augmentation de la hauteur géométrique des lignes et la diminution de la distance entre phase sont des options très efficaces dans la réduction du champ électrique à leur voisinage .

-Le champ magnétique est proportionnel au courant qui circule dans les conducteurs, ce dernier diminue lorsqu'on passe de la configuration horizontale à la configuration triangle, et augmente lorsqu'on passe à la configuration verticale. La variation de la hauteur géométrique et la compaction de la ligne agit de la même façon que pour le champ électrique.

Chapitre V

Caractérisation expérimentale et théorique de l'environnement électromagnétique au voisinage des lignes haute tension

Sommaire

V. Caractérisation expérimentale et théorique de l'environnement électromagnétique au voisinage des lignes haute tension

V.1 Métrologie en matière CEM1

V.2 Mesure du champ électromagnétique sous une ligne HT

V.2.1 Description du mesureur de champ électromagnétique

V.2.1.1. Caractéristiques opérationnelles du mesureur de CEM

V.2.1.2. Calibration

V.2.1.3. Précautions à prendre lors des mesures

V.2.2 Procédure de mesure du champ électromagnétique sous une ligne HT

V.2.2.1. Polarisation des champs électrique et magnétique

V.2.2.2. Techniques de mesure du champ électrique

a. Profil latéral

b. Profil longitudinale

V.2.2.3. Techniques de mesure du champ magnétique

V.3 Etude expérimentale

V.3.1 Description du circuit de lignes étudié

V.3.2 Protocole de mesure

V.4 Résultats expérimentaux

V.4.1 Comportement du champ électrique

V.4.2 Comportement du champ magnétique

V.4.3 Discussion des résultats

V.4.4 Configurations de lignes incluses dans les mesures

V.4.5 Analyse et évaluation

V.5 Validation des résultats expérimentaux

V.5.1 Modélisation Analytique

V.5.1.1 Calcul du champ électrique

V.5.1.2 Calcul du champ magnétique

V.5.1.3 Résultats analytiques

V.5.2 Simulation Numérique

V.5.2.1 logiciel de simulation

V.5.2.2 Résultats de simulation numérique

V.6 Conclusion

V.1 Métrologie en matière de CEM

Les mesures en matière de champs électromagnétiques sont compliquées et posent beaucoup de problèmes. En effet, s'il est assez facile d'obtenir des résultats de mesures, il est néanmoins difficile de savoir exactement ce que l'on a mesuré et donc d'affirmer que les résultats obtenus correspondent à ce qu'on voulait réellement mesurer. Ces problèmes sont liés au site de mesure et à la disposition des mesureurs. En France l'Agence Française de Sécurité Sanitaire de l'Environnement et du Travail [23] recommande, pour la métrologie des champs électromagnétique extrêmes basse fréquence :

- De disposer d'un appareil de mesure de référence donnant suffisamment d'informations, en particulier spectrales, pour réduire une partie des aléas potentiellement liés aux études d'exposition effectuées.
- D'élaborer un protocole de mesure des champs ELF dans l'objectif de standardiser les méthodes d'évaluation de l'exposition des personnes notamment au voisinage des ouvrages de transport et distribution de l'énergie électrique.
- D'encourager les laboratoires d'essais et de métrologie en électromagnétisme à obtenir une accréditation pour la réalisation de mesures de champs électromagnétiques basses fréquence.
- D'étudier la pertinence des indicateurs d'exposition aux champs ELF disponibles (différents types de moyennes arithmétiques, géométriques etc...) et de réfléchir à l'intérêt de disposer d'autres indicateurs d'exposition.
- D'améliorer les appareils de mesure pour les rendre moins coûteux et réduire leur encombrement. Cela permettra de cartographier précisément et facilement l'exposition à l'extrêmement basse fréquence à proximité des sources.

En pratique la caractérisation expérimentale des champs électromagnétiques générés par les lignes hautes tensions pose quelques problèmes d'ordre technique. D'abord, les situations d'exposition (position de la personne exposée, conditions de fonctionnement de la source du

champ), la procédure de mesure à suivre (nombre et position des points de mesure) et en fin lieu la méthode de mesure choisie.

Les méthodes de mesures les plus utilisées sont :

Les méthodes temporelles : Qui donnent des mesures rapides avec une grande résolution spatiale, elles utilisent des unités de mesure optiques difficiles à déplacer ; pour effectuer une cartographie du champ à la surface du dispositif sous test. Il est donc nécessaire que ce soit lui-même qui se déplace. Cette contrainte est majeure dans le cas des systèmes de géométrie complexe (cas des lignes haute tension).

Les méthodes fréquentielles : Qui sont basées sur des principes électroniques, elles utilisent des sondes faciles à déplacer sur la surface du dispositif à mesurer. Ces méthodes sont les plus utilisées dans la caractérisation expérimentale du champ électromagnétique au voisinage des lignes haute tension.

V.2 Mesure du champ électromagnétique sous une ligne HT

Les champs électromagnétiques de basse fréquence, émanant des lignes de transport et de distribution de l'énergie électrique sont mesurés conformément à la procédure établie par les normes IEEE Std 644-1987 (révision des normes IEEE Std 644- 1979) .La procédure consiste à mesurer au niveau du sol, des intensités de champs électrique et magnétique rayonnés par les lignes haute tension et les dispositifs énergiques.

V.2.1 Description du mesureur de champ électromagnétique

Deux types de compteurs sont utilisés pour mesurer l'intensité du champ électrique des lignes électriques à courant alternatif et sont décrits techniquement dans la littérature [94]:

- **Free-Body meter:** Mesures l'état d'équilibre courant induit ou une charge oscillant entre les deux moitiés d'un corps conducteur isolé dans un champ électrique.
- **Ground-Reference-Type meter:** Mesures le courant de retour à la terre d'une sonde plate introduite dans un champ électrique.

Le Free-Body meter est conçu pour des mesures de sondage, parce qu'il est portable et permet des mesures au-dessus du plan de masse dans des airs libres. Par conséquent, ce type

de compteur est recommandé pour des mesures en plein air près des lignes électriques. Il se compose essentiellement d'une paire de plaques de condensateur placés face à face et d'une bobine circulaire à travers les quelles le courant diélectrique est mesuré. Pour éviter les perturbations du champ électrique L'ensemble est monté sur un trépied non conducteur de hauteur 0.8 m et relié par une fibre optique à un PC pour l'enregistrement des mesures. L'inconvénient de l'arrangement simple du mesureur est la caractéristique directionnelle. Pour mesurer avec précision, la direction des lignes de champ doit être connue et le capteur positionné en conséquence, ceci est rarement possible en pratique.

La métrologie pratique exige d'effectuer la mesure dans chacun des trois axes spatiaux orthogonaux et l'intensité de champ équivalente est calculée comme étant le module des trois composantes du champ. Ceci est théoriquement possible avec une sonde simple en faisant trois mesures consécutives dans les trois directions. La réponse pratique consiste à utiliser un capteur de champ qui a une structure tridimensionnelle.

Les équipements de mesure modernes utilisent des capteurs constitués de trois plateaux de condensateurs placés perpendiculairement les uns aux autres ; l'isotropie et la non-directionnalité du capteur peuvent être résolus en faisant tourner le capteur dans un champ homogène, l'intensité du champ mesurée doit rester constante c'est la seule façon de s'assurer que les intensités de champ dangereuse ne sont pas présentes.

Sachant qu'à la surface du sol le potentiel est nul, il est préférable de mesurer le champ électrique à une certaine hauteur par rapport au sol. Les mesures doivent être faites dans des airs ouvertes et à des distances égales des centres des pylônes.

V.2.1.1 Caractéristiques opérationnelles du mesureur de champ électromagnétique

La théorie opérationnelle d'un mesureur de champ électromagnétique est basée sur le théorème de Gauss pour la mesure du champ électrique et la loi de Faraday pour la mesure du champ magnétique. Le champ résultant mesuré est donné par la méthode des amplitudes. L'amplitude du champ électrique dans chaque point sous une ligne triphasée est la superposition des composantes du champ E_k ($k=1,2, 3$) relative à chaque phase de la ligne et peut être définie comme suite [95] :

$$E_R = \sqrt{E_1^2 + E_2^2 + E_3^2 - E_1 \cdot E_2 - E_1 \cdot E_3 - E_2 \cdot E_3}$$

Le champ électrique généré par un conducteur en un point donné dépend de la distance qui le sépare du conducteur et son image par rapport au sol, le champ électrique généré par un conducteur de longueur infinie chargé en un point de coordonnées (x,y) peut être décomposé dans le repère cartésien en une composante horizontale E_x selon l'axe des x et une composante verticale E_y selon l'axe y :

$$E_x = \frac{4V}{\ln\left\{\frac{2H}{r_0}-1\right\}} \cdot \frac{Hxy}{(x^2+(H-y)^2)(x^2+(H+y)^2)}$$

$$E_y = \frac{2V}{\ln\left\{\frac{2H}{r_0}-1\right\}} \cdot \frac{H(H^2+x^2-y^2)}{(x^2+(H-y)^2)(x^2+(H+y)^2)}$$

Avec H la hauteur du conducteur par rapport au sol ; V la tension du conducteur ; r rayon du conducteur. Les résultats de modélisation d'un exemple avec les paramètres : H=10m ; hauteur du capteur par rapport au sol 1,6 m ; tension du conducteur 10KV ; rayon du conducteur 0,01m sont montrés sur la figure (V.1).

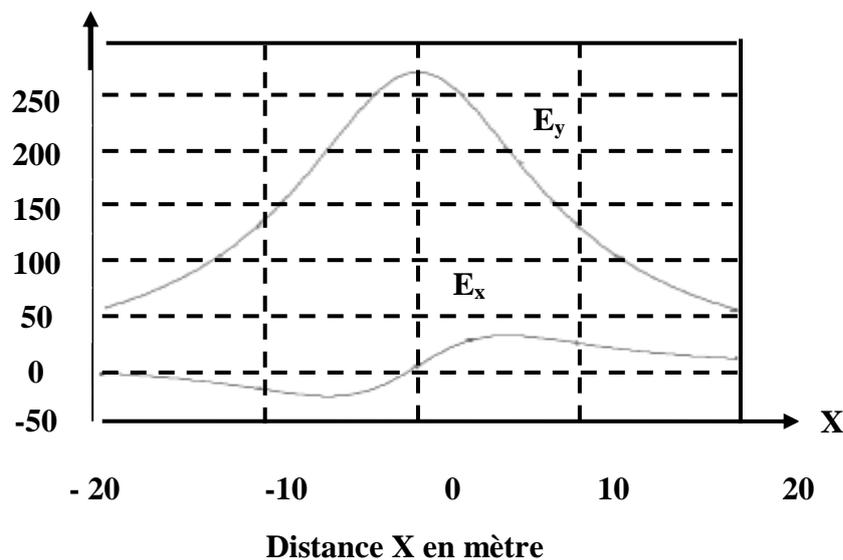


Figure V.1 : Composantes E_x et E_y du champ électrique rayonné

Il est clair que la composante verticale du champ électrique est plus importante que celle horizontale, mathématiquement le rapport entre elles peut être exprimé :

$$\frac{E_x}{E_y} = \frac{H^2 + x^2 + y^2}{2xy}$$

La valeur de ce rapport augmente proportionnellement à la hauteur du conducteur dans le cas d'une ligne triphasée, la projection verticale du champ électrique en un point de coordonnées (x, y) peut être supposée comme une fonction

$$E_{Ry} = f(E_{y1}, E_{y2}, E_{y3})$$

des composantes du champ électrique de tous les conducteurs de la ligne E_{yk} ($k=1, 2, 3$). Les composantes E_x et E_y dépendent ainsi des tensions des conducteurs. De la même façon le champ magnétique résultant rayonné par les conducteurs d'une ligne triphasée parcourus par des courants équilibrés.

V.2.1.2. Calibration

Le mesureur de champ électrique doit être étalonné périodiquement, avec des fréquences d'étalonnage qui dépendent en grande partie de la stabilité de l'appareil. Il doit être placé au centre d'une structure de deux plaques parallèles chargées qui génèrent un champ électrique uniforme à une hauteur de 0.5m par rapport au sol. Les dimensions du système d'étalonnage doivent être réglables pour pouvoir étalonner les mesureurs de grandes et de petite intensité du champ électrique. L'intensité du champ électrique donnée par le mesureur doit être tracée et comparée avec la tension appliquée aux bornes des plaques d'étalonnage. Les incertitudes dans les calculs doivent être inférieures à 3%, elles tiennent compte de la non uniformité du champ et du non parallélisme des plaques d'étalonnage.

La sonde de champ magnétique doit être placée au centre de la boucle du champ d'étalonnage généré par des systèmes de bobines qui vérifient la même uniformité du champ avec le mesureur. Dans la pratique l'étalonnage du mesureur de champ magnétique ce fait avec des bobines d'Helmholtz et doit être effectué pour chaque axe d'orientation de la sonde tridimensionnelle [94]. Les intensités de champs mesurées après étalonnage doivent être représentées graphiquement et comparés avec celles d'avant l'étalonnage.

V.2.1.3. Précautions à prendre lors des mesures

Afin de réaliser des mesures de champs sous les lignes haute tension conformément aux normes recommandées et relever des intensités de champ électrique non perturbées en des endroits bien données ; plusieurs facteurs doivent être respectés [94] :

1/ Les mesures du champ électrique doivent être effectuées dans des airs libres sous les lignes, les points de mesure doivent être bien choisis et le terrain de mesure doit être dégagé de tout obstacle (arbres, clôtures, hautes herbes, ou d'autres irrégularités) qui risque de déformer le profil du champ électrique.

2/ La distance entre l'opérateur et le mesureur de champ doit être au minimum 2.5m, afin de réduire l'effet de proximité et pour ne pas perturber les lignes de champ.

3/ Pour donner une description détaillée de l'intensité du champ au point de mesure, on doit vérifier la direction alignée du mesureur de champ : les axes électriques de la sonde de mesure doivent coïncider avec ceux géométriques.

4/ Noter lors des mesures, les caractéristiques de l'environnement : humidité de l'air, température et type de terrain.

5/ Tenir compte dans la réponse du mesureur de champ de l'influence des niveaux élevés du contenu harmonique, la forme de l'onde du signal doit être observée pour obtenir une estimation de la perturbation des intensités du champ relevé.

Pour reporter les mesures effectuées sur terrain, toutes les informations générales sur le déroulement de l'investigation expérimentales doivent être mentionnées. Comme

- les conditions environnementales (la température, l'humidité, la couverture du sol)
- les paramètres électriques et géométriques des lignes de transmission (les tensions et les courants en ligne, les hauteurs des conducteurs et les distances entre phases)
- les emplacements de mesure et les instruments utilisés

Tous ces paramètres doivent être enregistrés.

V.2.2 Procédure de mesure du champ électromagnétique sous une ligne HT

V.2.2.1. Polarisation des champs électrique et magnétique

La polarisation des champs électromagnétiques rayonnés par les lignes haute tension est une information complémentaire utile pour l'interprétation des mesures. En basse fréquence, les champs électriques et magnétiques peuvent être déterminés séparément en utilisant des méthodes quasi statiques. Leur variation sinusoïdale dans le temps permet leur représentation vectorielle [92], [38]. Les vecteurs champs, sont généralement pris en compte en considérant les valeurs efficaces de leurs composantes vectorielles indépendamment de leurs déphasages. Les champs électrique et magnétique générés par les lignes haute tension ont une polarisation elliptique. La caractérisation précise des champs ne permet pas de négliger les déphasages entre leurs composantes. Par conséquent, pour sonder les champs au voisinage des lignes électriques, il est nécessaire de déterminer à la fois l'amplitude et la phase de deux composantes orthogonales.

La norme IEEE 644-1994 [94] et [38] explique que le champ résultant est donné par l'expression :

$$B_R = \sqrt{B_{\max}^2 + B_{\min}^2}$$

Avec :

B_{\max} and B_{\min} sont les valeurs efficaces des axes semi majeure and semi minore axes de la trajectoire elliptique du champ, représentés respectivement dans la figure (V.2).

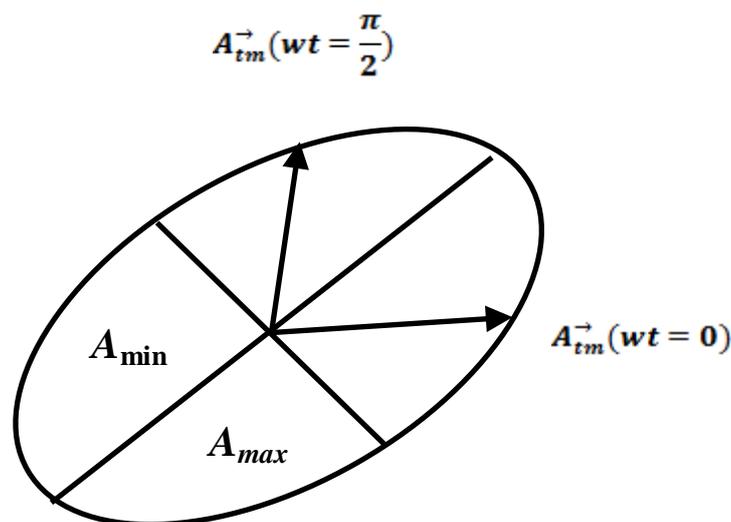


Figure V.2 : Composantes du champ à polarisation elliptique

Le champ résultant est toujours maximal ou égal à sa composante maximale. Si le champ est polarisé linéairement, sa valeur efficace résultante est égale à sa composante maximale par contre celle minimale est nulle. Si le champ a une polarisation circulaire sa valeur efficace résultante est égale à 1.4 fois la valeur de sa composante maximale ou minimale. L'intensité du champ électrique et la densité du flux magnétique peuvent être représentés par des vecteurs rotatifs qui tracent des ellipses dans un plan perpendiculaire aux conducteurs.

Les Figures (V.3 et V. 4) illustrent respectivement la polarisation du champ électrique et celui magnétique a une hauteur de 1m du sol au voisinage d'un circuit de ligne double terne avec le même arrangement des phases. En effet à un mètre du sol le champ électrique a une polarisation presque verticale à l'exception de quelques points sous les phases de la ligne, les chiffres au-dessus de chaque ellipse indiquent le rapport entre ses axes semi major et semi mineur dit coefficient de polarisation du champ électriques

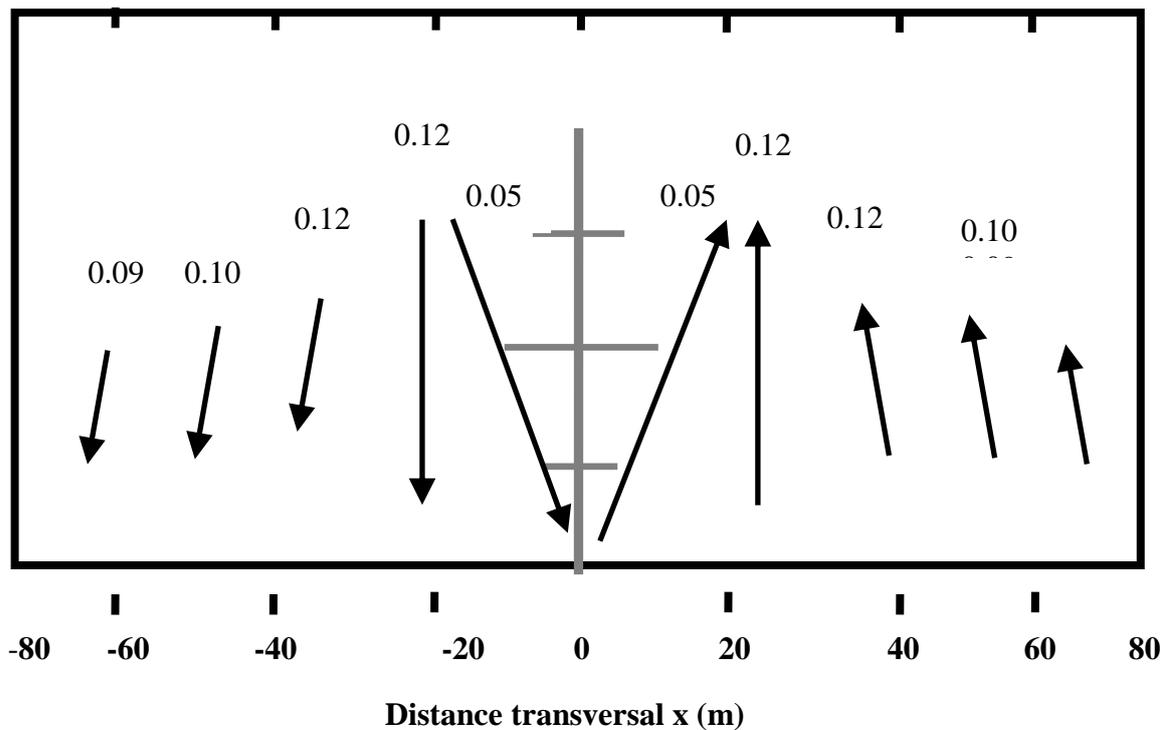


Figure V.3 : Polarisation du champ électrique a un mètre du sol

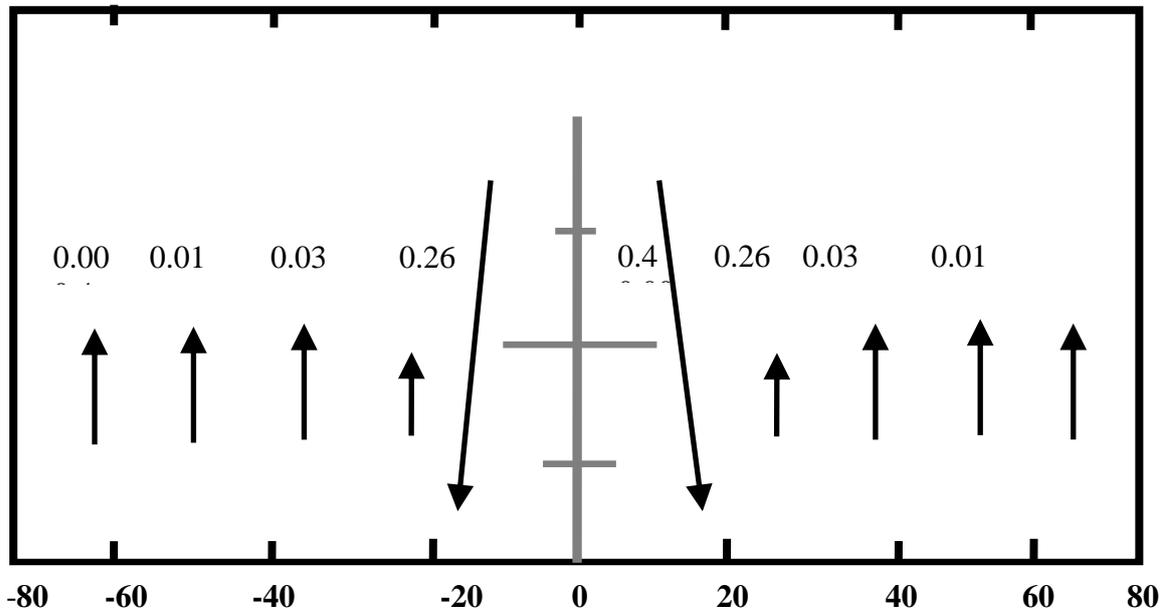


Figure V.4 : polarisation du champ magnétique a un mètre du sol

D'après la figure (V.4) la densité de flux magnétique sous la ligne a une polarisation presque linéaire

Du point de vue de l'exposition humaine, il est important de savoir à quelle distance des lignes, la polarisation elliptique est considérée linéaire. La norme IEEE 644-1994 clarifie que la polarisation des champs peut être considérée linéaire si les coefficients de polarisation sont inférieures à 0,1 valeur obtenue au fur et à mesure qu'on s'éloigne de la ligne. Cette distance reste légèrement influençable par les hauteurs géométriques des conducteurs des lignes.

V.2.2.2. Techniques de mesure du champ électrique

Les mesures de l'intensité du champ électrique générées par les lignes de transmission sont basées sur les courants induits par les oscillations des charges entre les plaques du condensateur du mesureur de champ. La procédure recommandée par la norme IEEE pour mesurer le profil latéral du champ électrique des lignes de transmission consiste à tenir l'appareil de mesure à une hauteur de 1 m au-dessus du sol à une distance d'au moins 2,5 m

de l'opérateur. Dans sa position verticale, le capteur mesure la composante verticale du champ électrique. Pour effectuer des mesures sur d'autres directions, le capteur devrait être tourné dans le plan de l'ellipse du champ électrique, cette rotation permettra de déterminer les composantes maximales et minimales du champ (semi axe de l'ellipse sur le terrain) et leurs directions.

L'exactitude des mesures du champ électrique dépend de plusieurs facteurs : la distorsion du champ par le corps de la personne qui tient le mesureur, la conductivité du mesureur, l'erreur de lecture, l'effet de la température et la difficulté de positionner les axes Électriques du mesureur dans la direction de mesure. Si la composante harmonique du champ électrique est importante, une erreur de mesure supplémentaire sera induite dans les mesures suite à la réponse du mesureur de champ aux différentes fréquences.

➤ **Profil latéral**

Le profil latéral de l'intensité du champ électrique à des points particuliers le long d'une portée doit être mesuré à des intervalles choisis dans une direction perpendiculaire à la ligne à une hauteur de 1 m par rapport au sol figure (V.5).

Les mesures des profils latéraux (la moitié) doivent commencer à partir de la ligne médiane dans la zone de mesure et doivent être apportées à une distance latérale d'au moins 30 m au-delà du conducteur extérieur. Au moins 05 mesures à égale distance doivent être effectuées sous les conducteurs. Les mesures complètes du profil du champ doivent être effectuées au-delà des conducteurs extérieurs dans des directions perpendiculaires au couloirs de passage des lignes. La répétition des mesures en des points intermédiaires permet de détecter la possibilité de changement des hauteurs géométriques des lignes, de leurs charges ou leurs voltage pendant les mesures. L'heure locale devraient être consignés sur la fiche de données régulièrement au cours des mesures pour faciliter l'examen ultérieur des données avec la tension et les données de charge enregistrées.

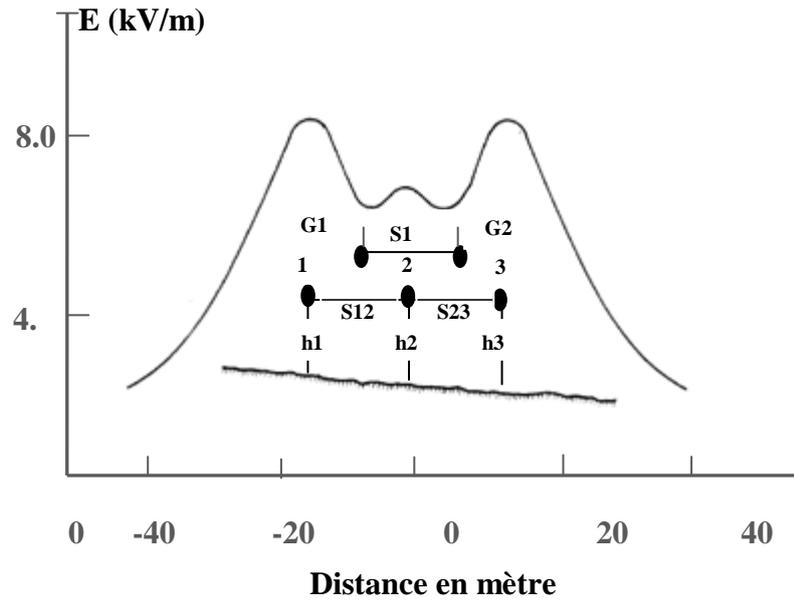


Figure V.5 Profil latéral du champ électrique standards [94].

➤ **Profil longitudinal**

Le profil longitudinal de l'intensité du champ doit être mesuré lorsque le champ est maximal au centre de la structure ou en un autre point de mesure dans une direction parallèle à la ligne et à 1 m du sol. Les mesures du profil latéral doivent être effectuées successivement sur au moins 5 intervalles successifs à partir du centre de la structure et dans les deux directions sur une distance totale égale à une travée.

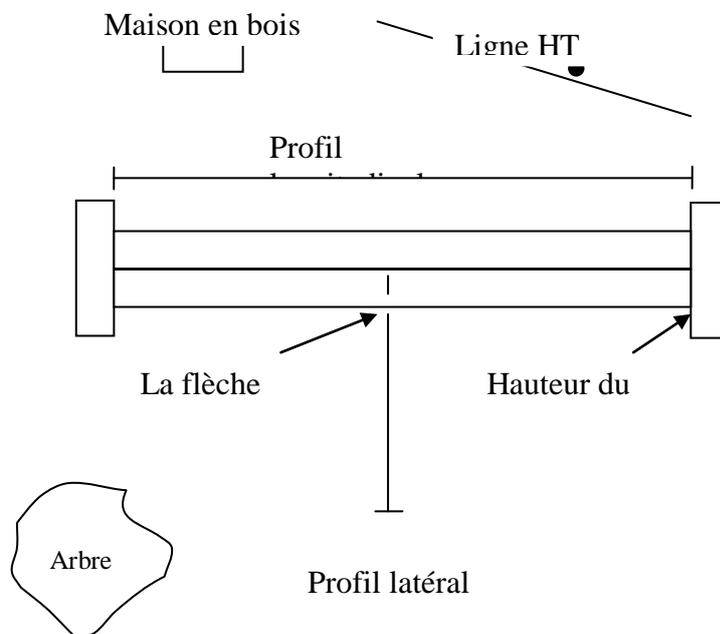


Figure V.6 : Profil longitudinale pour la mesure du champ électrique [94]

V.2.2.3. Techniques de mesure du champ magnétique

Les mesures des intensités de champ magnétique générées par une ligne haute tension sont basées sur la force électromotrice induite dans la bobine circulaire de détection placée à l'intérieur du mesureur de champ. Comme pour le champ électrique, Le profil latéral du champ magnétique d'une ligne haute tension doit être mesuré à une hauteur de 1 m au dessus du sol et la sonde doit être orientée pour la lecture maximale du champ magnétique.

La présence du corps de l'opérateur et du matériel de mesure ne modifie pas le champ magnétique.

Afin de mesurer la valeur du champ non perturbé. La distance entre la sonde et les objets magnétiques ne doit pas être inférieure à 1 m dans le but de mesurer avec précision le champ perturbé dans le milieu ambiant [94]. Pour des champs magnétiques à polarisation elliptique ou circulaire, on mesure les mêmes valeurs efficaces résultantes qui sont indépendantes du déphasage entre les composantes directionnelles.

V.3 Investigation Expérimentales

L'investigation expérimentale a été conduite dans le cadre de partenariat entre GRTE Annaba et le laboratoire LGEG. Ceci dans le but de répondre à la préoccupation des ouvriers du poste électrique El-Hadjar envers leur exposition à la pollution électromagnétique à l'intérieur du poste, particulièrement celle émanant des lignes électriques HT de différents niveaux de tension.

V.3.1 Description du modèle étudié

Pour la caractérisation de l'environnement électromagnétique des lignes haute tension, nous avons réalisé notre travail en coordination avec la société algérienne d'électricité (SONELGAZ) au niveau du poste d'interconnexion D'EL-HADJAR situé à l'est algérien, les mesures ont été effectuées sous un circuit de lignes 220 kV conçues en nappe horizontale (figure V.7). Les deux lignes sont situées l'une à côté de l'autre à l'intérieur du poste électrique d'El-Hadjar qui assure l'interconnexion entre l'Algérie et la Tunisie.

La ligne (B) se trouve à 28 m de la ligne (A), elles représentent respectivement ARCELORMITTAL et KHARAZA villes. La collecte des données géométriques et électriques du modèle étudié a été réalisée au niveau du bureau de fonctionnement et d'exploitation du poste.

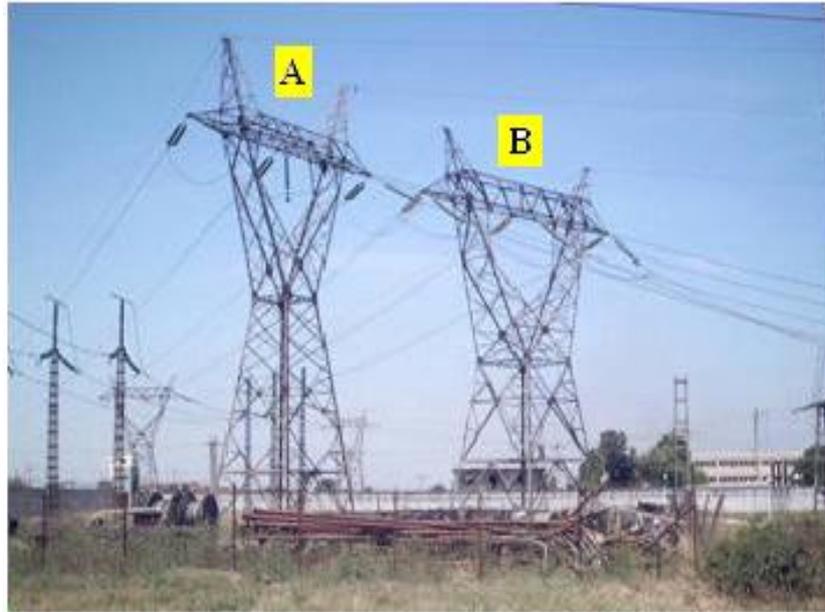


Figure V.7. Circuit de lignes étudié

V.3.1.2 Protocole de mesure

Notre étude a été réalisée en mesurant le champ électromagnétique sous le circuit de ligne double sélectionné 220 kV nécessitant souvent des travaux de maintenance. L'investigation expérimentale a été conduite dans un espace libre sous les lignes électriques A et B conformément aux normes IEEE [94] en utilisant un mesureur de champ électromagnétique référencé et calibré PMM8053B [96].

La (Figure 3) illustre le protocole de mesure. Afin de simuler les travailleurs à l'intérieur du poste qui sont continuellement exposés à des radiations émises par les équipements électriques durant leurs tâches de travail, Les intensités de champ ont été mesurées à une hauteur de 1 m par rapport au sol, pour éviter les perturbations lors de la mesure, l'appareil est équipé d'une sonde isotrope montée sur un mètre de haut trépied non conducteur. L'acquisition des données a été faite en temps réel sur ordinateur et les résultats de mesure ont été reportés en V/m : pour le champ électrique et en μT pour celui magnétique dans le système international des unités.

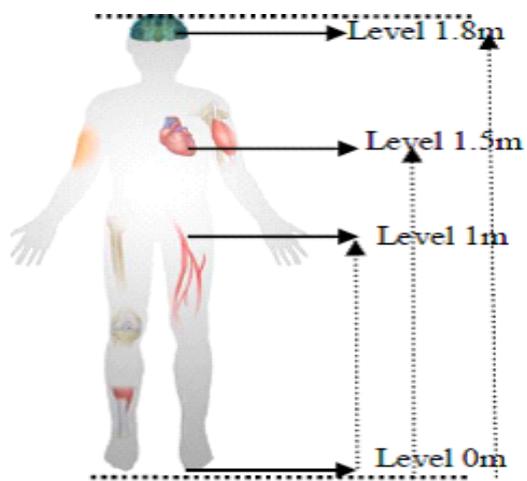


Fig. .V.8 Niveaux Sensible du corps humain [97]

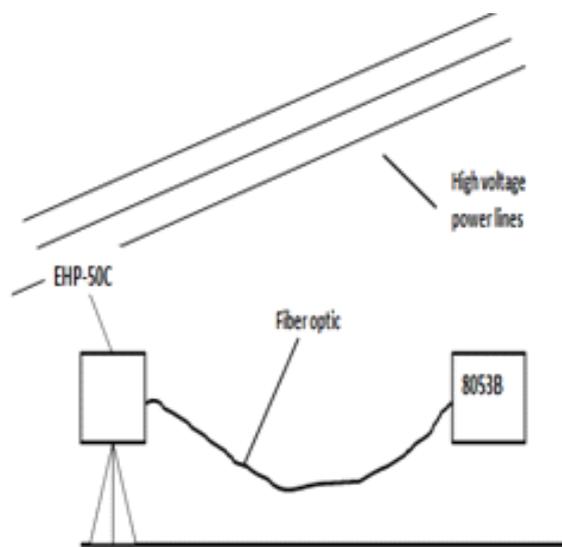


Fig. V.9 Protocole de Mesure [98]

V.3.2 Résultats expérimentaux

Les tableaux (2 et 3) résumant les résultats de mesure des champs électriques et magnétique relevés à une hauteur de 1m par rapport au sol respectivement sous un circuit de ligne simple et double 220 kV Théoriquement les champs électromagnétiques de basse fréquence ont gammes spatiales relativement faibles et les intensités de champs sont inversement proportionnelles à la distance à la source.

Pour argumenter nos résultats expérimentaux , nous nous sommes basés sur les deux principes fondamentaux relatifs à la compatibilité électromagnétique des lignes de transmission à haute tension qui sont l'effet du champ électrique d'induire des courants dans les fils parallèles à ses lignes de force (couplage capacitif) et l'effet du champ magnétique d'induire une tension dans les boucles perpendiculaire a ses lignes de champ (couplage inductif).

V.3.2.1 Comportement du champ électrique

Le tableau (V.2), illustre le profil du champ électrique relevé au voisinage du circuit de lignes 220 kV considéré.

Tableau V.1 : Comportement du champ électrique

Position de mesure	Conducteur à droite	Centre de la structure	Conducteur de gauche
Champ électrique	1764.24	3198.46	1748.65
Champ magnétique	2.69	2.58	2.74

Comme on peut le voir à partir des résultats expérimentaux mentionnés dans le (Table. V.2), les intensités de champ électrique (EF) mesurées sous les axes des pylônes A et B sont respectivement (**1764.24V / m**) n (**1748.65V / m**), l'écart entre ces valeurs est du aux hauteurs des pylônes et a la déviation du terrain. La valeur maximale du champ électrique

(EF) est relevée à mi distance de la structure (15m) et dépend de l'espacement entre les phases des lignes. Cela peut être interprété par le fait qu'en l'absence de tout écran

électrostatique, la capacité équivalente des condensateurs formés par les phases de la ligne A et celles de la ligne B atteint sa valeur maximale et varie proportionnellement à la concentration de quantités charges sur leurs surfaces. Nous pouvons conclure des résultats expérimentaux enregistrés que l'intensité du champ électrique est significativement plus élevée dans deux lignes de puissance par rapport à la ligne d'alimentation unique (table.3).

V.3.2.2 Comportement du champ magnétique

Les valeurs maximales du champ magnétique sont mesurées sous la **ligne A (2,69 μT)** et la **ligne B (2,74 μT)** et diminuent à mi- distance de la structure (2.58 μT) comme cela est mentionné dans le (Tableau. V.2), en fait, le même arrangement des phases entraîne une annulation du champ magnétique importante dans la zone intermédiaire entre les deux lignes que si un autre arrangement est utilisé. Il ressort des résultats expérimentaux que le circuit de lignes double 220 kV avec une grande puissance génère une intensité du champ magnétique plus élevé par rapport a celui de ligne simple 220KV (tableau V.3).

Tableau V. 2 : Comportement du champ magnétique

Position de mesure	Conducteur à droite	Centre de la structure	Conducteur de gauche
Champ électrique	1148.24	354.98	1137.89
Champ magnétique	2.21	2.53	2.20

V.3.2.3 Discussion des résultats

Cette investigation expérimentale nous a permis de faire une collecte des données sur la caractérisation expérimentale des champs électromagnétiques générés par les lignes haute

tension BF, en vue de création d'une banque de données au sein du laboratoire LGEG, servant de référence régionale pour les partenaires concernés.

Les profils latéraux des champs électrique et magnétique tracés nous ont permis de faire ressortir les effets des couplages inductifs et capacitifs sur la distribution des quantités de charges électriques et magnétiques au voisinage des circuits de lignes voisines. Les résultats expérimentaux montrent que les intensités maximales de ces champs n'ont pas dépassé les limites admissible fixés par l'ICNIRP qui correspondent pour l'exposition du grand public à des champs électromagnétiques 50 Hz variable dans le temps ELF a des valeurs limites de 100 FT pour le champ magnétique (B) et 5 kV / m pour le champ électrique (E).

Ces résultats vont servir dans le diagnostique et l'évaluation de l'exposition professionnelle basse fréquence à l'intérieure du poste électrique El-Hadjar.

V.3.2.4 Configurations de lignes incluses dans les mesures

En Algérie plusieurs configurations de lignes sont installées pour différents voltages, le niveau de tension le plus élevé est de 380 kV à 400 kV. Pour une collecte de données concernant la caractérisation de l'environnement électromagnétique au voisinage de ces lignes HT, Les configurations de lignes représentées dans l'annexe 2, ont été incluses dans notre investigation expérimentale.

Cas 1: Configuration horizontale simple et en faisceau 220 kV

Cette ligne avec une configuration en nappe horizontale, assure la liaison entre les postes El-Hadjar et Ramdan Djamel passant par kheraza. Les mesures expérimentales ont été réalisées d'un seul côté de la ligne a cause des obstacles rencontrés. Les résultats de mesures sont reportés dans tableau (V.1). Les phases des lignes sont conçues en faisceau avec deux conducteurs par phase distants de 45cm et de section 288 mm² qui est un conducteur standard pour la tension 220kv en Algérie.

Case 2 : Configuration verticale simple 90 kV

Cette ligne passe dans un terrain relativement plat .Sa conception est en nappe verticale. Elle assure la liaison entre Mdjez EL Safa et EL-HADJAR. Les résultats de mesures pour ce cas sont représentés dans le tableau (V.2).L'arrangement en nappe verticale des conducteurs avec une distance entre phases de 3,25 m nous a été confirmé par les ingénieurs du bureau de dispatching du poste.

Case 3: Configuration triangle 90 kV.

Cette ligne passe dans une zone urbaine et assure la liaison entre Annaba ville et le poste El-Hadjar. Sa configuration en triangle avec trois conducteurs de hauteurs différentes. Les quantités de charge électrique et magnétique mesurées sous cette ligne sont représentées dans le tableau (4.3).

Case 4: circuit de deux lignes horizontales 220 kV :

Ces lignes passent dans un terrain relativement plat .comme c'est mentionné dans la figure (V.5), ce circuit est une combinaison de deux lignes 220 kV en nappe horizontale fonctionnant dans des couloirs parallèles. Les résultats de mesures pour ce cas sont représentées dans le tableau (V.5) .Les caractéristiques géométriques des conducteurs ont été confirmés par le bureau d'étude GRTE Annaba.

Case 5: circuit de lignes double 60 kV

Ce circuit est une combinaison de lignes de tension 60kV aboutissant dans un même portique et situées l'une a quelques mètres de l'autre. Les résultats de mesure expérimentales sont reportés dans le tableau (V.6).La géométrie des pylônes et les distances qui les séparent ont été relevées sur le terrain par les techniciens du poste électrique El-Hadjar , Plusieurs difficultés ont été rencontrées lors des mesures des intensités de champs a cause de leurs emplacement à proximité de la clôture du poste pylônes et des obstacles qu'on a rencontré (caisses métalliques lourdes, clôture et herbes cachant des changements dans le niveau de la terre).

Case 6: Configuration horizontale simple 90 kV.

Cette ligne passe dans un terrain relativement plat .Sa conception est en nappe simple. Elle assure la liaison entre EL KALA et le poste EL-HADJA. Les résultats de mesures pour ce cas sont représentés dans le tableau (V.6). La ligne est montée sur un pylône conçues pour une tension 220 kV .Ce qui explique les incertitudes sur les intensités de champs mesurés sous la ligne, vu ses caractéristiques géométriques (hauteur, distance entre phases).

Tableau V.3 : Champs électrique et magnétique mesurés pour Configuration horizontale simple et en faisceau 220 KV (cas1)

Cas 1 : Configuration en nappe horizontale 220Kv					
Ligne simple			Ligne en faisceau (n=2)		
Distance x en (m)	Champ E (V/m)	Champ B (μT)	Distance x en (m)	Champ E (V/m)	Champ B (μT)
-40	415.6	0.741	-40	211.9	0.370
-35	545.3	0.829	-35	278.1	0.414
-30	718.1	0.937	-30	366.7	0.468
-25	935.1	1.069	-25	475.9	0.533
-20	1169	1.229	-20	592.8	0.614
-14	1336	1.453	-14	672.6	0.726
-12	1321	1.531	-12	661.5	0.765
-10	1247	1.606	-10	622.5	0.802
-8	1111	1.673	-8	553.1	0.836
-6	912.2	1.730	-6	454.6	0.865
-4	662.2	1.774	-4	333.4	0.889
-2	388.4	1.803	-2	205.4	0.902
0	213.2	1.811	0	130.7	0.905
2	388.4	1.796	2	205.4	0.901
4	662.2	1.763	4	333.4	0.885
6	912.3	1.729	6	454.6	0.864
8	1111	1.673	8	553.4	0.835
10	1247	1.595	10	622.5	0.803
12	1321	1.532	12	661.5	0.765
14	1338	1.452	14	672.6	0.727
20	1169	1.258	20	592.8	0.616
25	935	1.099	25	475.9	0.535
30	718	0.960	30	366.0	0.469
35	545.3	0.846	35	278.1	0.414

Tableau V.4 : Champs électrique et magnétique mesurés pour la Configuration verticale simple 90 kV et la Configuration triangle 90 kV (cas2et 3)

Cas 2 et 3 : Lignes 90 KV verticale et triangle					
Ligne 90 KV en nappe verticale			Ligne 90 KV en triangle		
Distance x en (m)	Champ E (V/m)	Champ B (μT)	Distance x en (m)	Champ E (V/m)	Champ B (μT)
-40	44.33	0.066	-40	93.42	0.695
-35	46.24	0.081	-35	121.1	0.788
-30	44.72	0.102	-30	162.2	0.904
-25	35.91	0.129	-25	223.5	1.050
-20	14.86	0.167	-20	308.8	1.231
-14	12.74	0.231	-14	427.1	1.479
-12	90.35	0.257	-12	456.7	1.560
-10	130.9	0.284	-10	472.2	1.634
-8	177.2	0.313	-8	467.8	1.693
-6	226.5	0.342	-6	441.7	1.733
-4	274.7	0.368	-4	399.2	1.752
-2	316.2	0.390	-2	354.6	1.749
0	344.9	0.405	0	337.6	1.729
2	355.6	0.410	2	356.4	1.695
4	346.8	0.406	4	399.9	1.651
6	319.8	0.392	6	442.5	1.602
8	279.4	0.372	8	468.8	1.543
10	231.4	0.346	10	472.9	1.479
12	182.5	0.317	12	457.5	1.410
14	135.3	0.288	14	427.8	1.336
20	32.36	0.210	20	309.1	1.115
25	11.03	0.161	25	223.7	0.953
30	38.04	0.125	30	162.6	0.823
35	45.32	0.098	35	121.4	0.719
40	46.09	0.079	40	93.67	0.637

Tableau V.5: Champs électrique et magnétique mesurés pou le circuit de deux lignes horizontales 220 KV (cas4)

Cas 4 : Circuit de deux lignes voisines 220KV l'une simple et l'autre en faisceaux					
x(distance en mètre)	Champ E (V/m)	Champ B (μT)	x(distance en mètre)	Champ E (V/m)	Champ B (μT)
-45	243.6	1.251	0	761.2	1.549
-40	256.1	1.269	2	710.4	1.428
-38	314.1	1.354	4	662.1	1.288
-36	348.7	1.398	6	614.8	1.132
-34	387.5	1.445	8	567.0	0.979
-32	430.8	1.491	10	520.6	0.823
-30	559.4	1.614	12	484.2	0.695
-28	558.3	1.641	14	471.8	0.608
-26	648.4	1.689	16	495.5	0.592
-24	710.2	1.733	20	633.2	0.752
-22	770.8	1.775	24	782.3	0.998
-20	851.8	1.809	26	842.4	1.115
-18	907.9	1.848	28	876.0	1.217
-16	924.4	1.847	30	874.4	1.36
-14	925.3	1.841	32	855.8	1.369
-12	921.3	1.829	35	795.4	1.437
-10	912.4	1.814	40	652.5	1.479
-8	899.2	1.794	42	592.8	1.475
-6	881.7	1.767	43	563.8	1.469
-4	861.6	1.735	45	508.2	1.453
-3	837.9	1.699	48	432.6	1.419
-2	813	1.656	49	409.4	1.409
-1	787.2	1.608	50	388.3	1.392
0	761.2	1.549	55	296.4	1.315

Tableau V.4 : Champs électrique et magnétique mesurés pour le circuit de deux lignes 60 KV en nappe horizontale (cas5)

Cas 5 : Circuit de lignes double 60 KV			
Distance x en (m)	Champ B en (μT)	Distance x en (m)	Champ E En (V/m)
-40	25	-40	121.5
-35	28	-35	163.9
-30	30	-30	224.6
-25	35	-25	309.9
-20	1.037	-20	420.4
-18	1.106	-18	467.8
-16	1.184	-16	512.6
-14	1.269	-14	548.5
-12	1.362	-12	568.3
-10	1.459	-10	569.6
-8	1.555	-8	522.7
-6	1.641	-6	443.3
-4	1.704	-4	324
-2	1.731	-2	174.2
0	1.716	0	40.61
2	1.658	2	175.4
4	1.569	4	325.1
6	1.465	6	444.2
8	1.368	8	523.8
10	1.293	10	563.6
12	1.253	12	569.2
14	1.256	14	549.3
16	1.293	16	513.2
18	1.368	18	468.5
20	1.465	20	421.8
25	1.692	25	310.5
28	1.731	28	255.9
30	1.704	30	225.2
35	1.508	35	164.2
40	1.269	40	121.7

Tableau V.5 : Champs électrique et magnétique mesurés pour le circuit de ligne simple horizontale 90KV (cas 6)

Cas 6 : Ligne 90KV en nappe horizontale			
Distance x en (m)	Champ B en (μT)	Distance x en (m)	Champ E En (V/m)
-26	0.87	-26	387
-23	0.93	-23	462
-21	1.35	-21	619
-20	1.78	-20	624
-18	1.18	-18	479
-16	1.05	-16	462
-14	0.92	-14	445
-12	0.74	-12	387
-10	0.67	-10	330
-8	0.59	-8	173
-5	0.50	-5	127
-2	0.48	-2	32.81
0	0.34	0	8.37
1	0.35	1	14.72
2	0.34	2	41
3	0.34	3	78
4	0.35	4	164.93
5	0.36	5	267
7	0.38	7	401
10	0.49	10	329
12	0.63	12	305
14	0.76	14	203
16	0.81	16	269
18	1.30	18	466
20	2.81	20	327
23	1.27	23	183
25	0.87	25	140
27	0.69	27	27
29	0.56	29	12
30	0.48	30	10
32	0.39	32	6.51
34	0.32	34	4.26
36	0.29	36	2.93

V.3.2.5 Analyse et évaluation

Différentes configurations existantes de lignes (60kV, 90 kV et 220 kV) ont été incluses dans la mesure actuelle des champs électrique et magnétique. Les mesures relevées sous ces dernières confirme la prédite variation inversement proportionnelle entre les quantités de champs rayonnées et la distance qui sépare les conducteurs au point de mesure.

Les amplitudes maximales des champs CE et CB ont été relevées au milieu des structures. Les résultats expérimentaux mentionnés dans les tableaux précédents montrent également que l'augmentation du niveau de tension des lignes et l'optimisation de l'arrangement de leurs phases affectent énormément les intensités de champs rayonnés à leur voisinage.

La conception de la ligne a un grand effet sur la distribution des charges électriques et magnétiques émises. Ceci peut être vu clairement en comparant les mesures relevées dans le cas 1 pour les deux conceptions de la ligne 220Kv lisse et en faisceau. Ainsi augmenter le nombre de conducteurs par phase de la ligne peut être utiliser comme une des options de réduction de son rayonnement électromagnétique.

Les résultats de l'investigation expérimentale conduite pour les (cas 4 et 5) présentant des circuits de lignes doubles 220 kV fonctionnant dans des couloirs parallèles, évoquent le principe couplage électromagnétique en mode galvanique par diaphonie inductive et capacitive et fait ressortir les effets des couplages capacitif et inductif entre les phases des lignes sur les profils latéraux des champs électromagnétiques résultant.

V.4 Validation des résultats expérimentaux

V.4 .1 Modèle Analytique

La métrologie concernant les champs électromagnétiques rayonnés par les lignes électriques haute tension présentant des tailles physiques importantes des pylônes comparées aux petits rayons des conducteurs est délicate. On peut facilement relever des valeurs expérimentales, mais il est difficile de dire que ces dernières sont exactes.

Pour valider les résultats expérimentaux, une caractérisation analytique du champ électromagnétique au voisinage du circuit de lignes proposé a été réalisée. Bien que les

champs électriques et magnétiques générés par les lignes électriques sont découplés, du fait qu'à la fréquence industrielle les champs varient lentement dans le temps de sorte que les équations de Maxwell sont généralement converties en des équations d'électrostatique et de magnétostatique. La (Figure.4) représente le modèle analytique développé en utilisant les dimensions physiques réelles des pylônes pour contrôler les champs de fuite au voisinage du circuit de lignes proposées. Les amplitudes des champs sont calculées aux niveaux **0m, 1m, 1.5m et 1.8m** au dessus du sol qui présentent des parties sensibles du corps humain comme les organes de fonctions principales (tête, le cœur, le pelvis et les pieds) (Figure.2) dans le cas de l'exposition de basse fréquence.

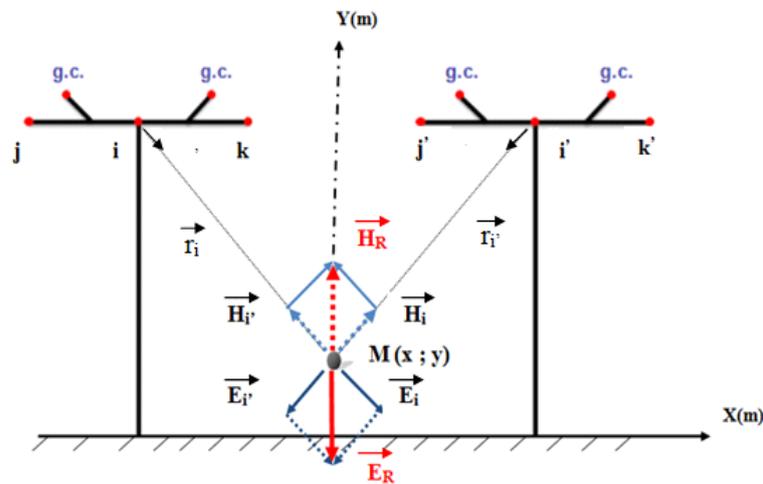


Fig. .10 Modèle Analytique pour le calcul du champ électromagnétique

V.4 .1.1 Calcul du champ électrique

Pour le calcul du champ électromagnétique sous les lignes électriques HT, les conducteurs des phases des lignes sont considérés uniformément chargés. Les champs électriques à proximité de ces lignes sont calculés en absence de tout écran électrostatique. Chaque conducteur de ligne y compris ceux mis à la terre est soumis à un potentiel complexe donné par :

$$V = V_r + jV_i \quad (1)$$

Les charges dans les conducteurs \mathbf{Q} sont données par les équations matricielles exprimant la relation entre les tensions des lignes et les coefficients potentiels de Maxwell \mathbf{P} calculés à partir des coordonnées géométriques des conducteurs des phases et des câbles de garde.

$$[\mathbf{Q}] = [\mathbf{P}]^{-1} \cdot [\mathbf{V}] \quad (2)$$

Avec, $[\mathbf{V}]$ la matrice de la phase de potentiel (vers la terre) et $[\mathbf{P}]$ est la matrice des coefficients Potentiels sous forme de :

$$P_{ij} = a \ln \frac{D'_{ij}}{D_{ij}} \quad (3)$$

$$P_{ii} = a \ln \frac{D'_{ij}}{r_{oi}} \quad (4)$$

Avec:

D_{ij} = La distance entre les conducteurs i et j

D'_{ij} = La distance entre les conducteurs i et j et leurs images i' et j'

r_{oi} = Le rayon du conducteur i

Pour le circuit de deux lignes 220 kV proposé, le calcul du profil latéral du champ électrique en un point M au-dessus du sol est une simplification considérable de la méthode générale de calcul de champ basé sur la loi de Gauss. En fait, le champ électrique en un point M du sol est la résultante des champs générés par les lignes A et B phases avec le même ordre de phase telle que cela est représenté sur la (figure. 4) et est donné par l'expression suivante :

$$E_i = \frac{q_{ri} + jq_{ii}}{2\pi\epsilon_0} \frac{2Y_i}{(X_i - X_M)^2 + (Y_i - Y_M)^2} \quad (5)$$

Ou q_{ri} et q_{ii} sont les parties réelles et imaginaires de la charge du conducteur d'ordre i et $(X_i - X_M)$ and $(Y_i - Y_M)$ représentent respectivement l'éloignement horizontal et vertical entre le conducteur, i , et le point M de calcul du champ E . Le champ électrique total au point M est la somme des contributions de tous les conducteurs des deux lignes 220 kV (i, j, k, i', j' et $K' \dots$).

$$\left. \begin{aligned} \vec{E}(M) &= \sum_{m=i}^{k'} \vec{E}_m(M) \\ \vec{E}(M) &= \sum \vec{E}_{(i,j,\dots,k)}(M) \end{aligned} \right\} \quad (6)$$

Avec, $\vec{E}_m(\mathbf{M})$ est le champ électrique généré par la charge des phases m ($m= i, j... k'$) au point, M , ou le champ est calculé.

V.4 .1.2 Calcul du champ magnétique

Du fait de la nature quasi-statique du comportement électromagnétique des sources à la fréquence industrielle, le champ magnétique des lignes triphasées est généré uniquement par les courants circulants dans les conducteurs. L'intensité du champ magnétique autour des conducteurs est obtenue par application de la loi d'Ampère, puis par superposition des résultats partiels. Le champ magnétique au point M de coordonnées (X_M, Y_M) à une distance r à partir d'un conducteur chargé a la notation vectorielle suivante:

$$\vec{H}_i = \frac{I_i}{2\pi r_i} \vec{\phi}_i \quad (7)$$

$\vec{\phi}_i$ est le vecteur unitaire dans la direction du produit du vecteur courant et le vecteur segment \vec{r}_i . Le champ magnétique résultant au point M est la somme de toutes les contributions des courants de la phase de deux lignes de 220 kV:

$$\vec{H}(M) = \sum_{m=i}^{k'} \vec{H}_m(M) \quad (8)$$

V.4 .1.3 Résultats analytiques

Comme on peut le voir dans (figures 5), les intensités de champ électrique calculées à 1m de niveau au-dessus du sol par exemple, atteignent les valeurs maximales à la position médiane de la structure (2995 V / m) et les champs forces diminuent sous les centres de pylônes (1760 V / m). En même temps, les valeurs maximales du champ magnétique (Fig. V.7) calculées sont plus élevé que celles sous les pylônes A et B et inférieur au milieu de la structure (15m).

À 1 (m) de hauteur au-dessus du sol par exemple les valeurs correspondantes sont respectivement (2.73μT et 2,41 μT). Les profils du champ magnétique relevés pour les quatre niveaux (0m, 1m, 1.5m et 1.8m) au-dessus du sol mettent en évidence le couplage inductif le plus élevé entre les deux structures lorsqu'on approche les conducteurs des lignes.

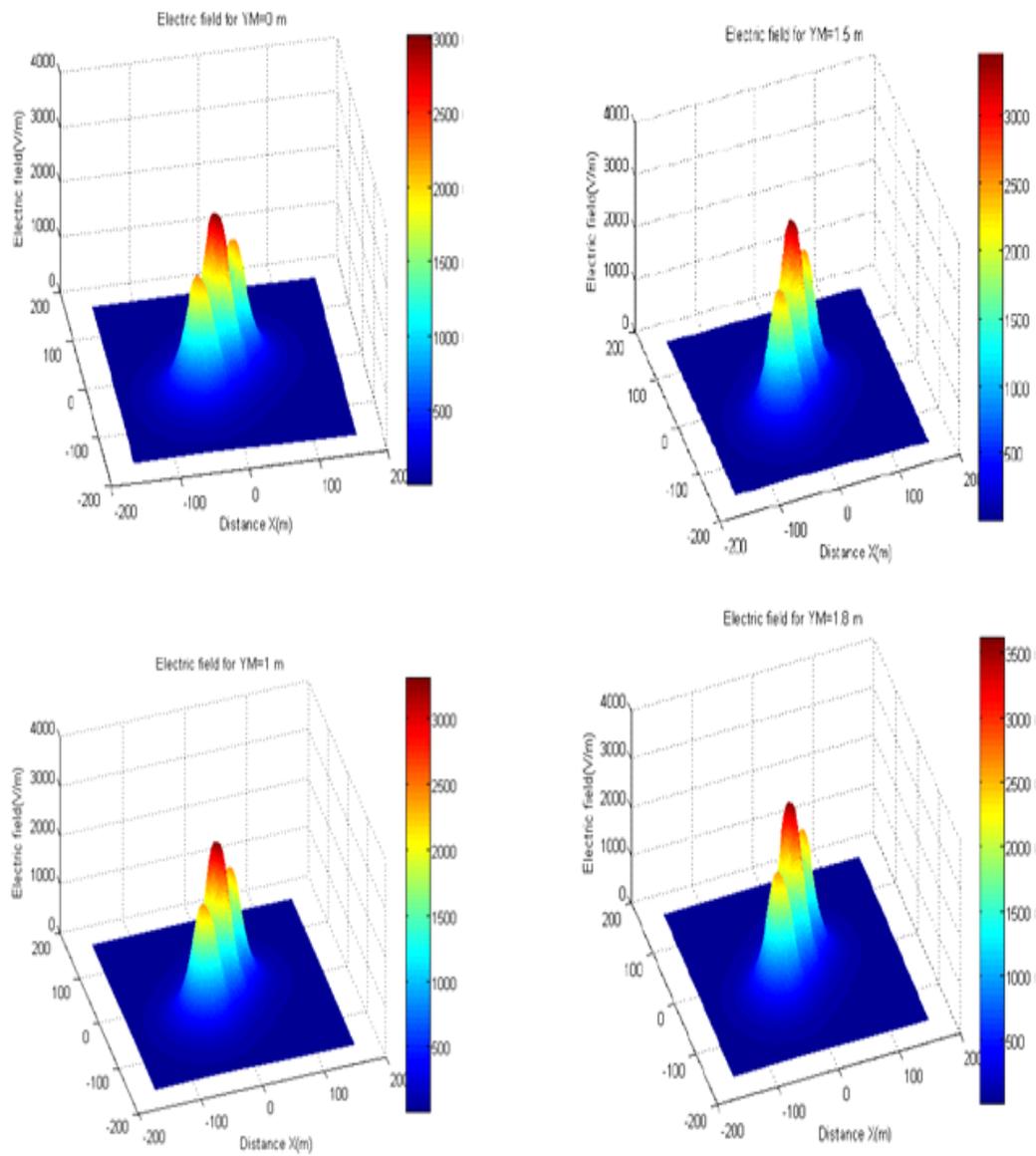


Fig. V. 11 Distribution du champ électrique pour les hauteurs (0m, 1m, 1.5m, et 1.8m)

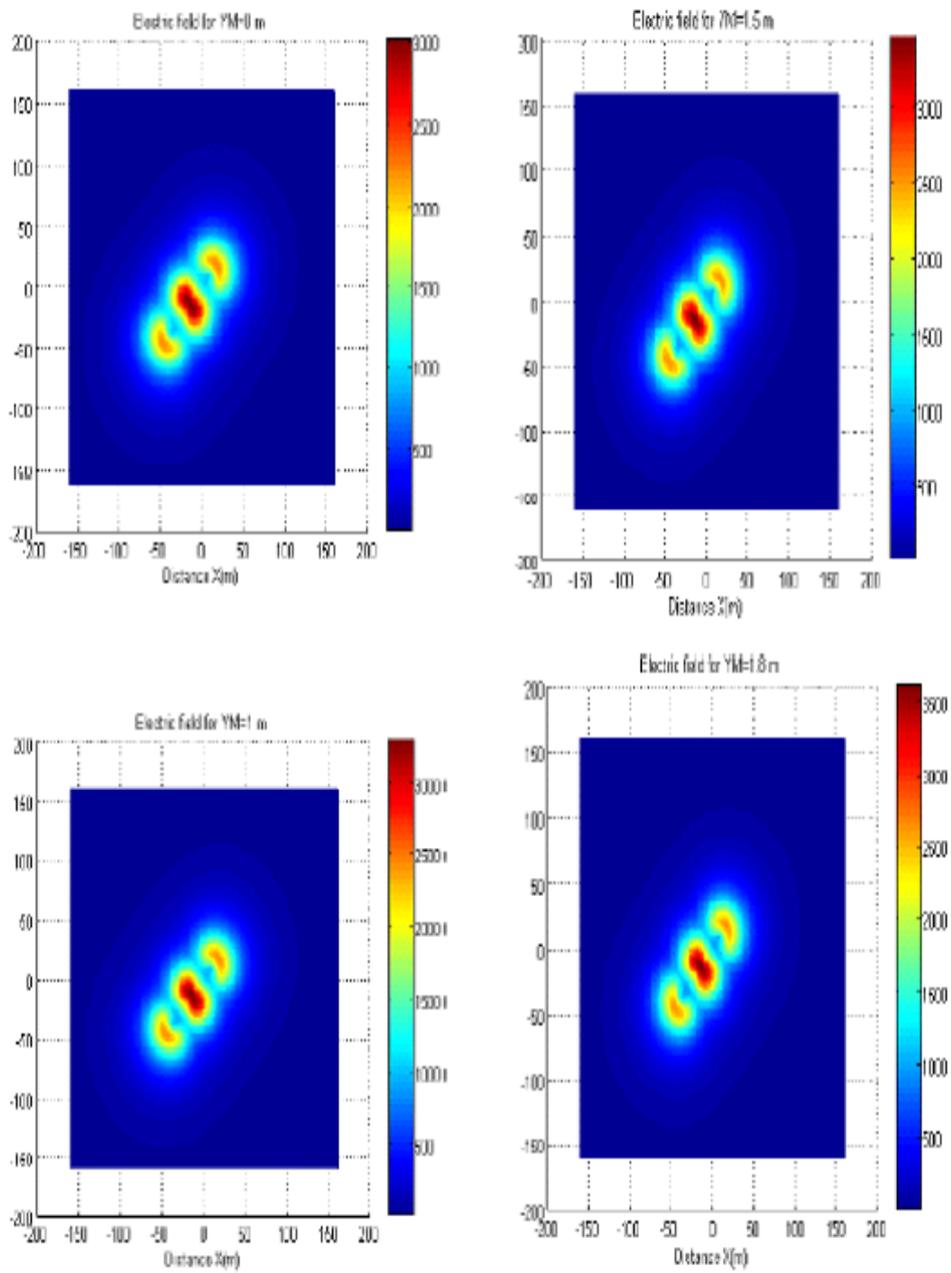


Fig.. V.12 Distribution du champ électrique dans le plane X-Y, pour les 4 niveaux

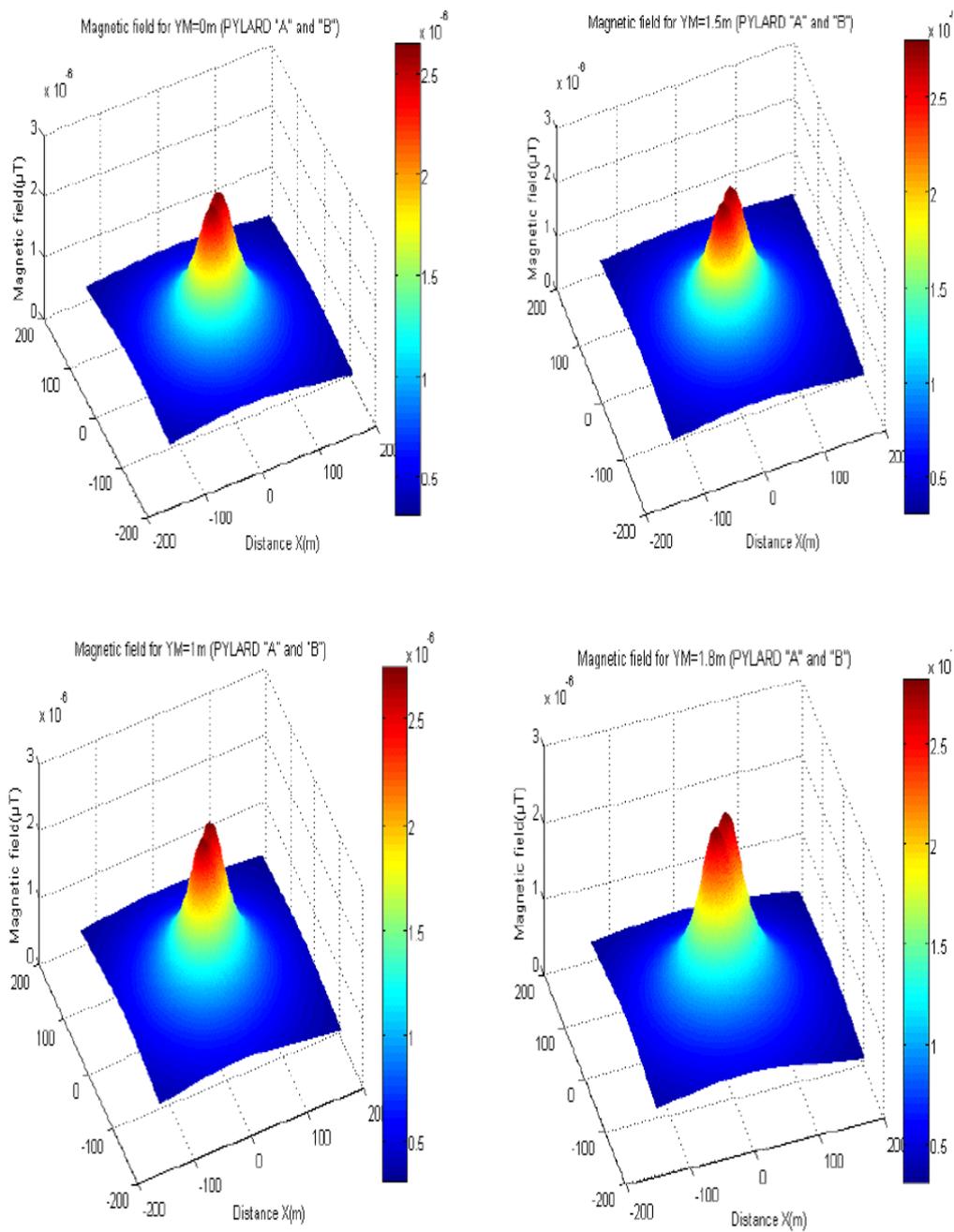


Fig. V.13 Distribution du champ magnétique pour les hauteurs (0m, 1m, 1.5m, et 1.8m)

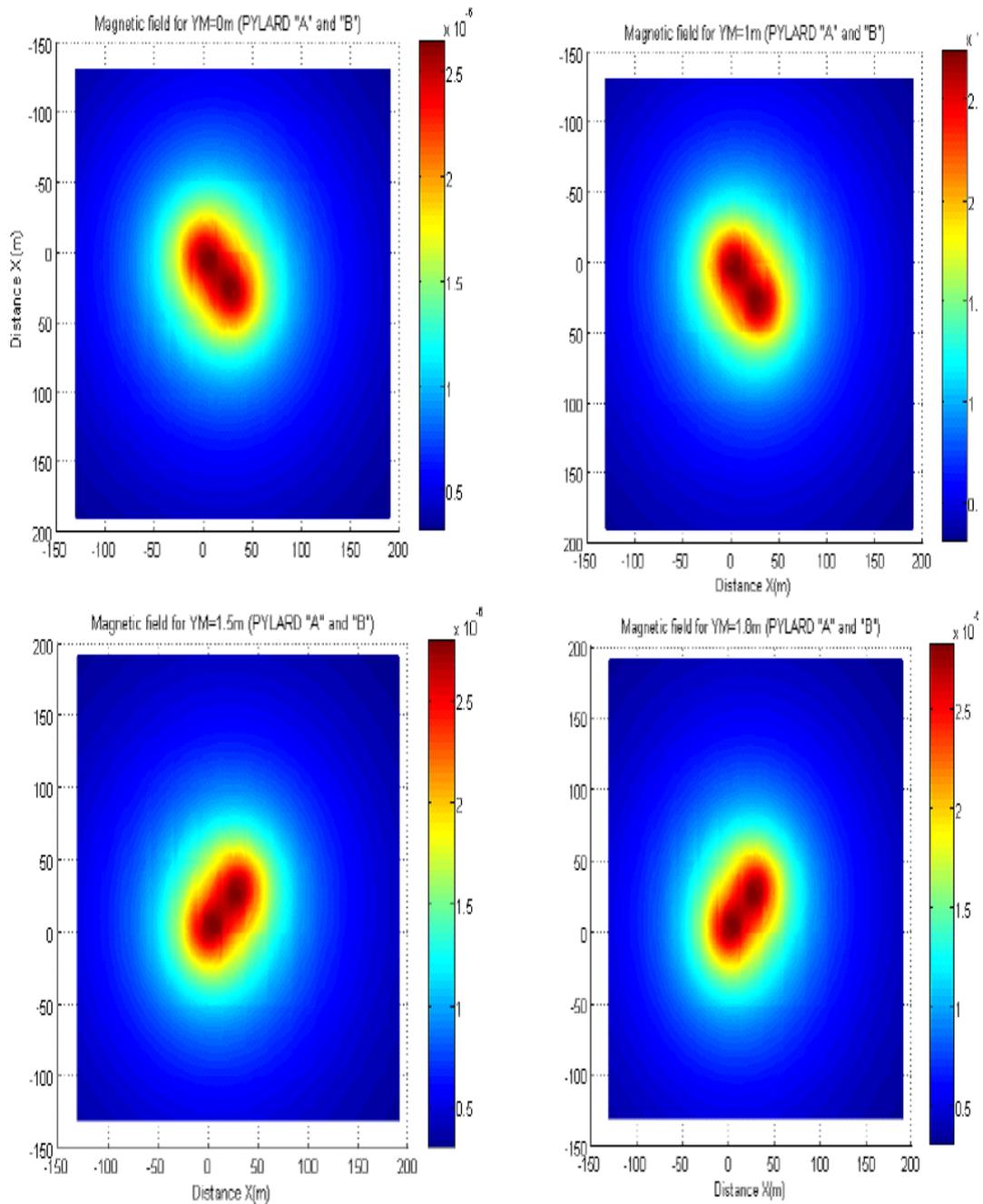


Fig. V.14 Distribution du champ magnétique dans le plan X-Y, pour les 4 niveaux

Les figures (V.6 et V. 8) visualisent respectivement le couplage capacitif et inductif entre les deux structures dans le plan XY, ils mettent en évidence l'effet des hauteurs au-dessus du sol sur la répartition du champ électrique et magnétique au voisinage des deux lignes 220 kV. Il ya une légère différence entre les intensités de champ mesurées et celles calculées (6%), cette différence ne doit pas être attribué au modèle de calcul, mais aux hypothèses simplificatrices et au processus de chaque technique. Les valeurs des champs calculés pour les niveaux 0m, 1m, 1.5m et 1.8m-dessus du sol restent très inférieures à la limite maximale (5 kV / m) établie par les normes de l'ICNIRP [5].

V.4 .2 Simulation numérique

V.4 .2.1 logiciel de simulation

Les champs électromagnétiques ont également été analysés on se basant sur la simulation numérique pour plusieurs niveaux de garde au sol, à savoir [10m-20m]. Ces hauteurs par rapport au sol représentent l'emplacement à partir du point de la flèche maximal et se déplaçant vers l'emplacement de la tour, les niveaux souvent fréquentés par les travailleurs de l'entretien lors des tâches spécifiques. Un programme puissant COMSOL Multi physiques a été dédié a la simulation numérique. C'est un logiciel composé de paquet solveur d'élément fini pour diverses applications d'ingénierie et de physique, en particulier les phénomènes couplés dans le temps.

V.4 .2.2 Résultats de simulation numérique

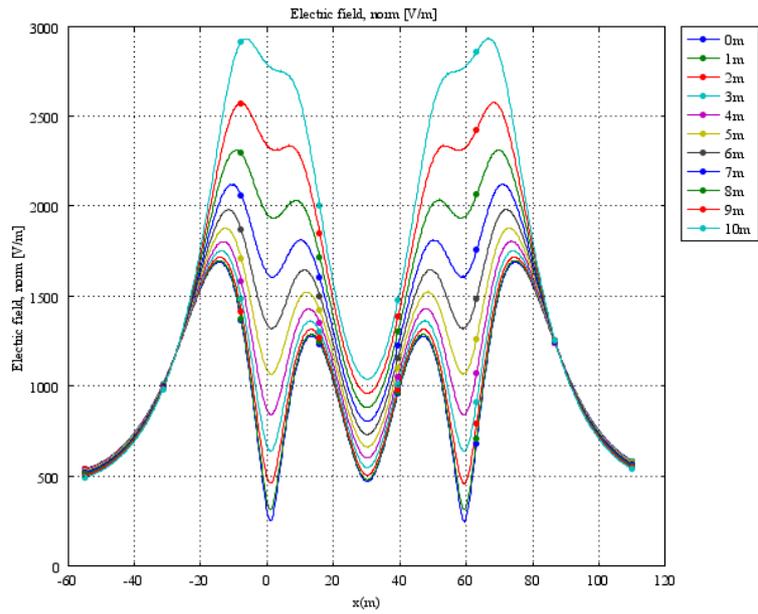
Les figures (8, 9,10 et 11) illustrent les résultats de simulation numérique des intensités de champs EMF générées par le modèle étudié. Dans cette simulation Le potentiel électrique de la terre a été supposé égal à zéro et tous les résultats ont été obtenus pour une période à 50Hz, en commençant par le niveau (0m) qui représente le sol jusqu'au niveau le plus proche de l'emplacement des phases de lignes (20m).

➤ Comportement du champ électrique

Figure.(5, 6 et Fig.7 montrent les profils latéraux du champ électrique relevés en fonction de la distance d'éloignement par rapport à la structure pour différentes hauteurs par rapport au sol (0m) jusqu'à (20m) emplacement des phases. Pour une bonne visualisation des résultats numériques nous les avons déroulés sur trois intervalles de garde au sol. En approchant les conducteurs des lignes les intensités de champs simulées augmentent rapidement par contre les couplages capacitifs entre les deux structures diminuent de façon remarquable. L'intensité de champ simulée à 0m est du même ordre que celle calculée.

➤ Comportement du champ magnétique

La même modélisation numérique du champ magnétique est illustrée par les figures (8, 9 et 10). Les amplitudes des champs augmentent à proximité des conducteurs des lignes entre temps les couplages inductifs entre les deux circuits de lignes diminuent au delà de 11m. Au niveau du sol (0m). Il existe une légère différence entre les résultats de simulation numérique et ceux expérimentaux ; cet écart ne peut être attribué au module de calcul et reste dépendant de la procédure et des hypothèses simplificatrices de chaque technique.



FigV.15 Profil du champ électrique pour des niveaux entre 0 m and 10 m

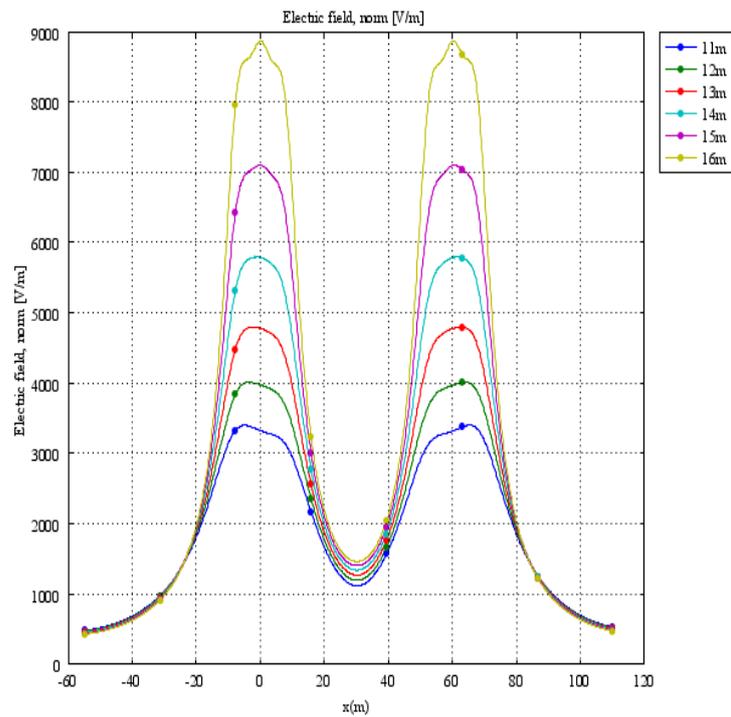


Fig.V.16 Profil du champ électrique pour des niveaux entre 11 m and 16 m

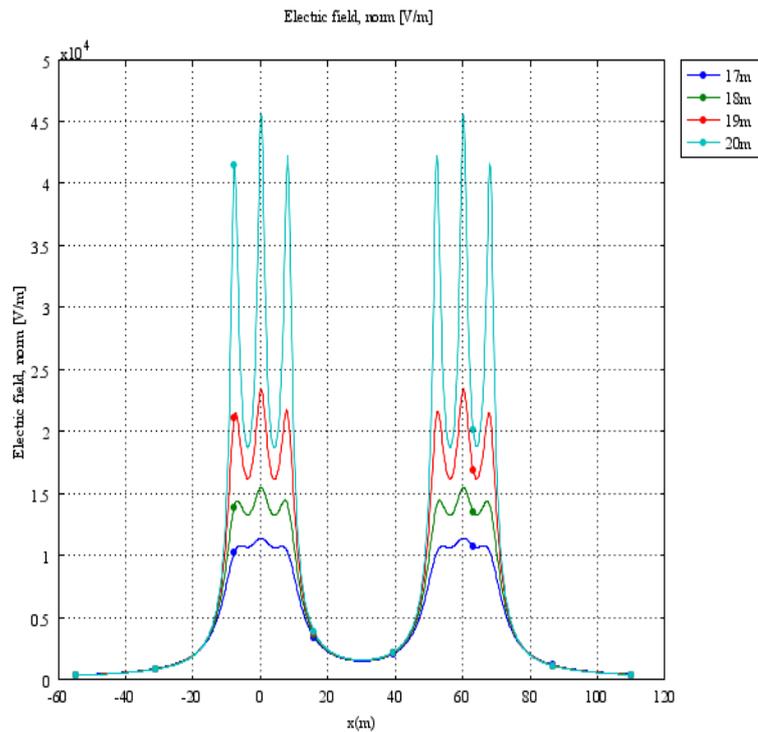


Fig.V.17 Profil du champ électrique pour des niveaux entre 17 m et 20 m.

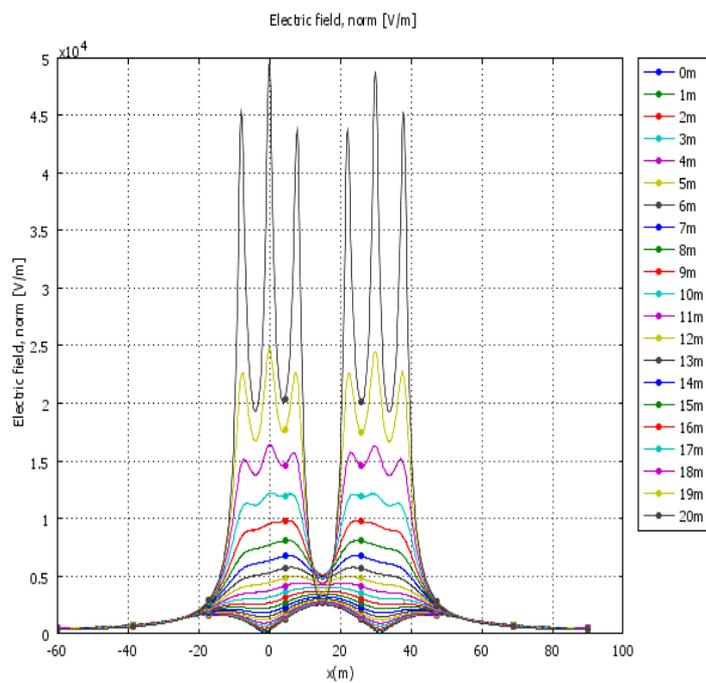


Fig.V.18. Simulation du champ électrique pour les hauteurs 0 m à 20 m

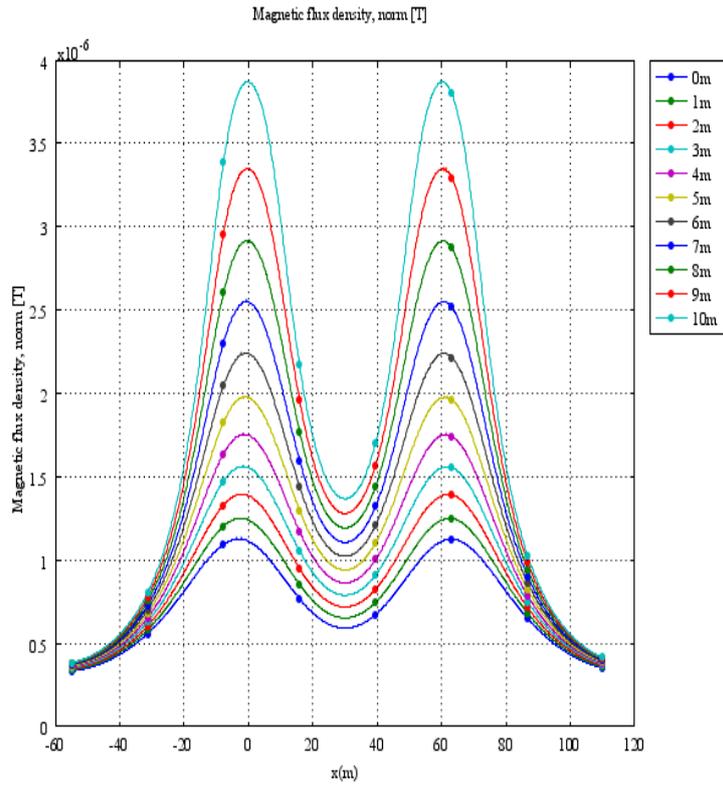


Figure.19. Profil pour le densité du flux magnétique pour des niveaux entre 0 et 10 m

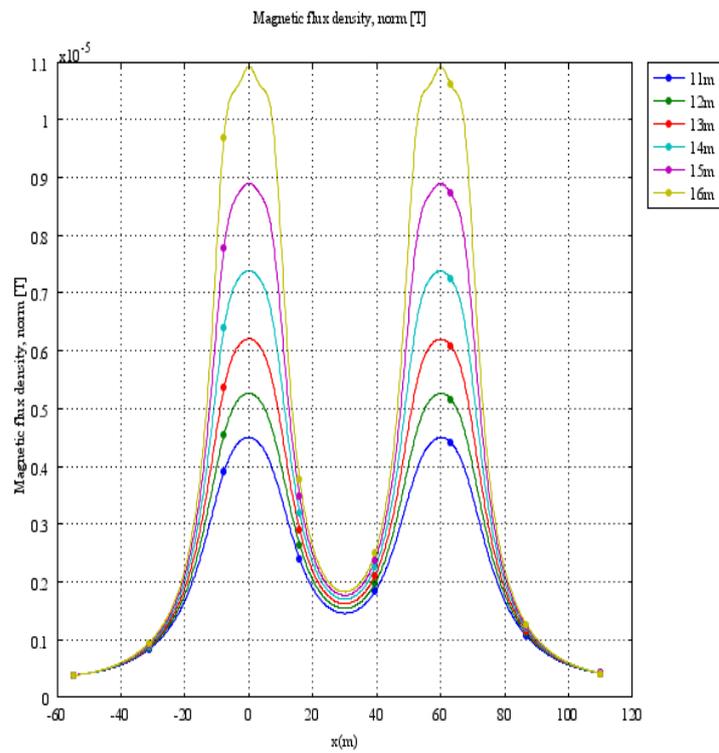


Figure.20. Profil pour le densité du flux magnétique pour des niveaux entre 11 et 16 m

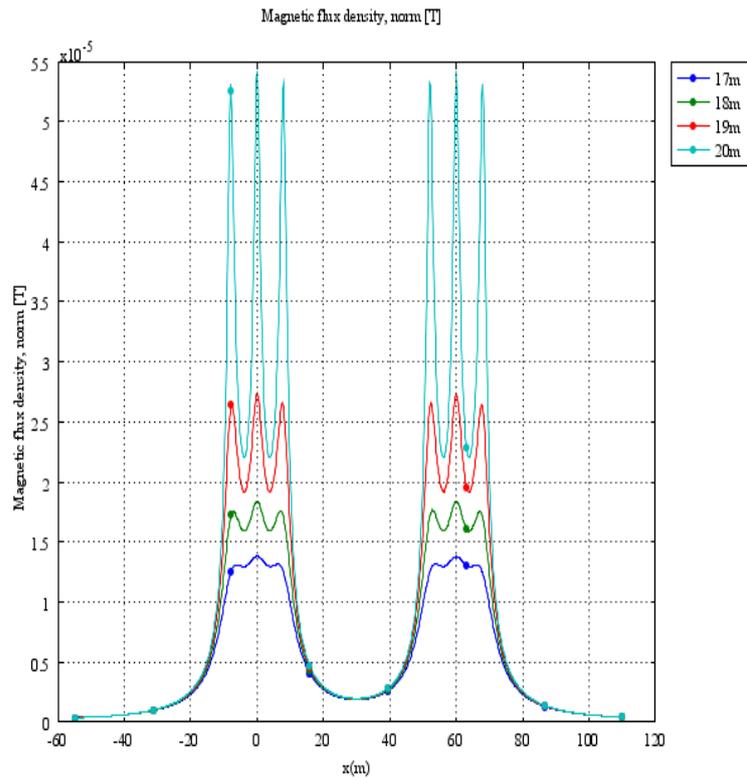


Figure.21. Profil pour le densité du flux magnétique pour des niveaux entre 17 et 20 m

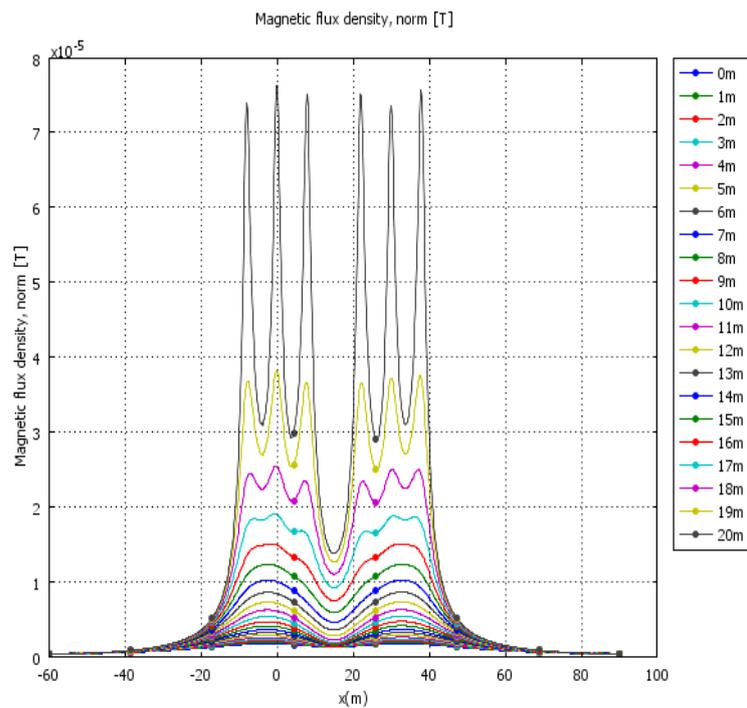


Figure.22. Simulation du champ magnétique pour les hauteurs 0m to 20m

V.5 Conclusion

Ce chapitre investie les niveaux de distribution des intensités de champs électrique et magnétique à fin de Contrôler la pollution électromagnétique et d'estimer l'exposition professionnelle à l'intérieur du poste électrique El-Hadjar caractérisé par sa large gamme de tension et son emplacement dans une zone urbaine. Pour cela une caractérisation expérimentale et théorique des champs émanant du poste ont été conduites.

Dans une première étape, une investigation expérimentale a été faite in situ sous un circuit de lignes double 220kV sélectionné, conformément aux normes IEEE et au moyen d'un mesureur de champ du type PMM8440 étalonné.

Les intensités de champs CE et CB ont été mesurées à une hauteur de 1.5m par rapport au sol, ce niveau représente l'exposition du personnel du poste dans la position debout les pieds en contact avec le sol pendant les tâches de travail ordinaires et celle en position isolé par rapport au sol (**hot-stick position**) en cas d'intervention sur terrain (**live-working conditions**). Les intensités de champs relevées sont au dessous des limites admissibles imposées par les normes ICNIRP.

La validation des résultats expérimentaux a été réalisée par une modélisation analytique en deux étapes:

Dans la première étape un code de calcul analytique développé dans l'environnement Matlab a permis de calculer les intensités de champs générés par le modèle étudié pour différentes hauteurs par rapport au sol (0m 1m 1.5m et 1.8m), ces niveaux représentent les parties sensibles du corps humain (pieds ventre cœur et cerveau) dans le cas de l'exposition basse fréquence.

Dans la deuxième étape la simulation numérique de ces champs avec le logiciel COMSOL Multiphysics à base d'éléments finis pour différentes hauteurs au sol [0m, 20m] niveaux souvent fréquentés par les techniciens du poste qui assurent des tâches d'entretien et de maintenance (**barre hand position**) sur les phases des lignes pour de longues périodes de temps.

Les intensités de champs mesurées à une hauteur de 1.5m sont en bon accord avec celles analytiques l'écart mentionné (6%) et peut être attribué aux hypothèses simplificatrices et a la procédure de chaque technique. Les hauteurs approchant les phases des lignes sont caractérisées par des distributions de quantités de charges électrique et magnétique qui excèdent les seuils normatifs et présente un danger dans le cas de l'exposition professionnelle.

VI. CONCLUSION GENERALE ET PERSPECTIVES

VI.1 Conclusion

Dans le cadre de cette thèse nous avons présenté le diagnostic et le contrôle de la pollution électromagnétique à l'intérieur d'un poste électrique d'interconnexion El-Hadjar couvrant plusieurs gammes de tensions [220 kV, 90 kV, 60 kV et 30 kV] et situé dans une zone urbaine. En vue de recueillir les données sur la répartition des quantités de champs électrique et magnétique au voisinage des lignes électriques HT implantées à l'intérieur du poste et d'établir les niveaux d'exposition des ouvriers dans les différentes tâches au niveau du poste de travail.

Dans un premier temps nous avons passé en revue la bibliographie sur 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 transferts énergétiques entre les sources de ces champs et les paramètres environnementaux pris en considération (victime).

Dans un deuxième temps nous avons rappelé que l'exposition en basse fréquence, a lieu en conditions de champ proche ,et donc la détermination des quantités de charges électrique et magnétique rayonnées au voisinage de la source du champ est très compliquée , et en générale ne peut être réalisé analytiquement .Dans le cas des champs électromagnétiques émanant des lignes HT cette difficulté réside dans le petit rayon du conducteur par rapport a la grande taille physique du pylône. Ce qui justifie le choix de la technique expérimentale pour la caractérisation des champs électromagnétiques au voisinage des lignes haute tension.

Les ouvriers exerçant dans et autour des installations électriques doivent être avisés des risques potentiels des champs électromagnétiques et informés et sensibilisés afin de prendre les mesures de protection nécessaires contre l'exposition à ces champs EMF.

Par exemple, un programme de sécurité pourrait être établi pour protéger le personnel d'entretien à l'intérieur des postes lors de l'exécution des réparations sur les phases de ligne présentant souvent un couplage par diaphonie inductive et capacitive.

Les effets nocifs des champs électromagnétiques 50 Hz sur la santé humaine sont un sujet de controverse. Sur la base « du principe de précaution », des limites d'exposition, basées sur les effets réversibles à court terme, quantifiés par la dosimétrie théorique ou expérimentale ont été définies.

Au cours de ce travail nous avons 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 lignes électrique haute tension. Nous avons comparé les résultats obtenus avec les normes internationales et nous avons procédé à une comparaison avec les résultats d'autres travaux publiés.
- Un protocole de mesure conformément aux normes IEEE avec des conditions précises d'exposition. Ce qui permettra de quantifier les quantités de charges électriques et magnétiques sous des circuits de lignes de géométrie complexe. Malgré l'absence de la simulation numérique de nos résultats expérimentaux, ces derniers peuvent être utilisés dans un contexte industriel pour la caractérisation des lignes haute tension comme sources de perturbation électromagnétique des implants médicaux.

VI.2 Perspectives :

Les effets des champs électromagnétiques de basse fréquence, et la compatibilité électromagnétique constituent un axe de recherche fondamental pour notre laboratoire (LGEG)

- Notre thèse s'inscrit dans les objectifs de recherche établit, en étudiant un cas pratique et réel (Poste El Hadjar). Et présente un intérêt multiple :
- Etablissement d'une banque de données sur l'environnement électromagnétique au voisinage des lignes électriques haute tension dans les agglomérations urbaines régionales.
- Acquisition d'une expertise locale en matière de mesure et de contrôle des interférences CEM- Environnement.

-
- Caractérisation des lignes électriques haute tension comme sources de perturbations électromagnétiques des implants médicaux.
 - Réalisation d'études de vérification et de contrôle des normes internationales en matière d'exposition aux CEM, à la demande de partenaires, de collectivités et des institutions.
 - Développement de coopération scientifique et partenariat avec des acteurs dans le domaine de l'énergie électrique en particulier avec l'opérateur historique : SONELGAZ.
 - A l'avenir nous allons procéder à l'acquisition de logiciel de simulation numérique, qui sans remplacer les méthodes théoriques (simples et peu coûteuses), permettront la validation de nos résultats expérimentaux.

BIBLIOGRAPHIE

- [1] **David. Andrew, M.c Namee, Alexander. G. Legros. Daniel. R . Krewski.** The cardiovascular effects of exposure to extremely low frequency electromagnetic fields .International Archives of Occupational and Environmental Health Volume: 82, Issue: 8, Pages: 919-933. 2009.
- [2] **Maria. Feychting, Anders .Ahlbom and Leeka.; Kheifets .** EMF and Health. Annual Review of Public Health .Vol. 26: 165-189, Avril 2005.
- [3] **Institute of Electrical and Electronics Engineers,** «Standard for safety levels with respect to human exposure to radio frequency electromagnetic fields. 3 KHz-300GHz”. IEEE std c95.1, 1999.
- [4] **International Commission on Non-Ionizing Radiation Protection,** “Guidelines for limiting exposure to time-varying electric, magnetic and electromagnetic fields (up to 300GHz)”.Health. Phys.(74: 494-552), 1998.
- [5] **Chiang.K.H and K.W. Tam,** “Electromagnetic Assessment on Human Safety of Mobile Communication Base Stations at University of Macau” . Am. J. Applied Sci.5: 1344-1347. DOI:10.3844.1344.1347,2008.
- [6] **Djalel ,D., H. Ali and C. Fayçal,** “The Return-Stroke of Lightning Current, Source of Electromagnetic Fields (Study, Analysis and Modeling)”. Am. J. Applied Sci., 4: 42-48. DOI: 10.3844/.42.48, 2007.
- [7] **Les champs électromagnétiques Eurobaromètre Spécial 272a/ Vague 66.2 – TNS,** Volume5.N°2,43-53, Janvier-Février 2006.
- [8] **A.Babouri, A. Hedjiedj and L. Guendouz** "Experimental and theoretical investigation of implantable cardiac pacemaker exposed to Low Frequency Magnetic Field" Journal of clinical Monitoring and computing " Springer 23:63-73,2009.
- [9] **A. Babouri, A. Hedjeidj** “In vitro Investigation of Eddy current Effect on Pacemaker Operation Generated by Low Frequency Magnetic Field. 29th IEEE EMBS Annual International Conference . Lyon, August 23-26, 2007.
- [10] **A.Rakov.** The state of health of persons working in electric fields of outdoor 400-500kV switchyards. Gig Trud Prof Zabol. (10):50-52. 1966.
- [11] **AFSSET** (Agence Française de Sécurité Sanitaire de l’Environnement et du Travail). Avis relatif à la Synthèse de l’expertise internationale sur les effets sanitaires des champs électromagnétiques extrêmement basses fréquences. Maison Alfort ; 2010.
- [12] **S A. Duanping L. Sastre A.** Magnetic Field Exposure and Cardiovascular Disease Mortality among Electric Utility Workers. American Journal of Epidemiology. vol149(2). pp135-42 ; 1999.

-
- [13] **O.Johanson ,Z.Davanipour ,Z. Xu Z. et al.** Arguments pour des seuils de protections du public fondés sur les effets biologiques des rayonnements électromagnétiques (EBF).Rapport BioInitiative. 31aout 2007.
- [14] **L. Denis ,P. Fews** .Health Effects of High Voltage Power lines. Electromagnetic Environments and Health in Building.Routledge: Derek Clements-Croome; p. 560 pages. 2012.
- [15] **A. Marincu, M. Greconici and S. Musuroi:** “The electromagnetic field around a high voltage 400kvelectrical overhead Lines and the influence on the biological systems” .Ser. elec. energy. vol. 18, No. 1, (105-111), April 2005.
- [16] **C. Hender, S. Soltan.**“ Aspects on the Influences of the High Voltage Power Lines on the Environment ” Univ. Timișoara, Volume 52 issue 66, 1-2, 2007.
- [17] **Mohamad Nor.N, R. Rajab and K. Ramar,** “Validation of the Calculation and Measurement Techniques of Earth Resistance Values”. Am. J. Applied Sci., 4: 42-48. DOI: 10.3844/.1313.1317, 2008.
- [18]**Paraskevopoulos AP,Bourkas** .Karagianopoulos CG.(2009) Magnetic induction measurement in high voltage centers of 150/20 Kv.Measurement; 42:1188-94.
- [19] **C P. Cipo, M .Barneshi, L. Ahma, E. Hamiti** “calculation and measurement of the magnetic field of power transmission lines” cigre sk c3 – 1, 2005 .
- [20] **O.Kilgour .National Radiation Laboratory (NRL)** ,“ Measurement of extremely low frequency electric and magnetic fields beneath 66 KV power lines at Burnside Park Christchurch”. www.nrl.moh.govt.nz/faq/burnsidepark.pdf, 2005.
- [21] **OMS98 Organisation Mondiale de la Santé** “Champs électromagnétiques et santé publique :fréquence extrêmement basses(ELF).Aide mémoire No :205,1998 .
- [22] **ICNIRP.** Guidelines for limiting exposure to time-varying electric, magnetic and electromagnetic fields (1Hz to 100kHz). Healt.Phys. Vol.99,No 6, 818-836, Dec.2010.
- [23] **AFSSET Agence française de sécurité de l’environnement et du travail.** Exposition aux champs électromagnétiques ,2008.
- [24] **Emmanuelle Conil** . Propagation électromagnetique en milieu complexe : du champ proche au champ lointain.Physics .Institut National Polytechnique de Grenoble-INPG, 2005 .
- [25] **B.Vincent.** Identification des sources électromagnétiques multipolaires équivalentes par filtrage spatial : Application a la CEM rayonnée pour les convertisseurs d’électronique de puissance. Thèse de doctorat tel-00473780, version 2 , 2010 .
- [26] **Lakhdar .Bouchlouk** . Conception et validation de sondes pour les mesures en champs proche. Mémoire de these de l’université d’Orsay, Paris 2006.
- [27] **Philippe. Rosnet.** Eléments de propagation électromagnétique. Ellipses Edition, ISBN 2-7298-1110-9, Paris 2002.

-
- [28] **T. ELFouly, E. ELSaadany, M. Salama, T. Abdelgalil and I. Habiballah** : “Power transmission lines generated électrique and magnetic fields calculation” Conference Boston 2005 . <http://cds.comsol.com/access/dl/papers/1196>.
- [29] **Salma Abu Izzeddin, Kamal Berbari, Hiba Obeid** “ Electromagnetic Fields from Power Transmission Lines”, American University of Beirut, Lebanon, Mai 2006.
- [30] **Le. Ha Hoang**. Contribution a la modélisation tridimensionnelle des interactions champ électromagnétique - corps humain en basses fréquences. Thèse de doctorat N0 d'ordre : E.C.L 2007-32.
- [31] **Hydro Québec**. <http://hydroquebec.com/comprendre/champs/index.html>
- [32] **Laurent Bernard**. Caractérisation électrique des tissus biologiques et calcul des phénomènes induits dans le corps humain par des champs électromagnétiques de fréquence inférieure au GHz. Thèse de doctorat N0 d'ordre : E.C.L 2007-19.
- [33] **Ward, S. A., Ghania, S. M., & Shaalan, E. M.** Assessment of Electric Field Distribution Inside 500/220 kV Open Distribution Substations during Working Conditions. TELKOMNIKA Indonesian Journal of Electrical Engineering, 12(4), p : 701-708. 2014.
- [34] **F.Miron, M.Purcar et C.Munteanu**. Numerical Computation of the Electromagnetic Fields inside a High Voltage Substation. ACTA ELECTROTECHNICA. Vol (56), N(4) ,2015 .
- [35] **Monica, A . Mugurel ,R .** « Electromagnetic field radiation near power lines and its environmental impact » U.P.B. Sci. Bull., Series C, Vol. 74, Iss. 1, ISSN 1454-234 x ; 2012.
- [36] **Noviadi ,A R .Agus. R,Ade .R.** « Modeling of electric field around 100 MVA 150/20 KV power transformer using charge simulation method». Mechatronics, electrical power, and vehicular technology.04 (2013) 33-40 .ISSN 2088-6985.
- [37] **Paraskevopoulos AP, Bourkas Karagianopoulos CG.**(2009) Magnetic induction measurement in high voltage centers of 150/20 Kv. Measurement; 42:1188-94.
- [38] **M. Milutinov, A. Juhas, and M. Prša**, “Electric and magnetic field in vicinity of overhead Multi-line power system” Conference on modern power system MPS 2008, 12-14 november 2008, Romania .
- [39] **Korpinen L, Kuisti H, Paakkonen R et al** Occupational exposure to electric and magnetic fields while working at switching and transforming stations of 110 Kv. Ann Occup Hyg;55:526-36 ,2011.
- [40] **Munteanu, C., Visan, G., & Pop, I. T.**. Electric and magnetic field distribution inside high voltage power substations. Numerical modeling and experimental measurements. IEEE Transactions on Electrical and Electronic Engineering, 5(1), 40-45, 2010.
- [41] **O. Okun, S. Shevchenko, L. Korpinen**, A comparison of magnetic fields inside and outside high-voltage urban 110-kV power substations with the exposure recommendations of the Ukrainian regulatory authorities, Radiation Protection Dosimetry, 154, 4, 417, 2013.

[42] **Pop, I. T., Topa, V., Munteanu, C., Racasan, A., & Merdan, E.** Human exposure to power frequency electric field inside very high voltage substations. *Environmental Engineering and Management Journal*, 10(4), 499-504, 2011.

[43] **Müller, R and H.J. Forsterr:** “22. Standard measurements Electric fields due to high voltage equipment”. http://www.nardasts.de/pdf/niederfrequenz/22_felda.pdf, 1999.

[44] **Victor Angelo C. Margallo, M.Sc,** 2009. Extremely low frequency (ELF) magnetic field exposure assessment of tow 100 MVA electric power substations in the Philippines. *Congress of Medical Physics. Asia Oceania* , 2009.

[45] **A. Bendaoud, K.. Medles, H. Sayah, K .Senoussi:** “Reduction of magnetic field under the H .V transmission line”, *Journal of electrical & electronics engineering*, volume 6 (139 - 145), 2006.

[46] **T. ELFouly, E. ELSaadany, M. Salama, T. Abdelgalil and I. Habiballah :** “Power transmission lines generated électrique and magnetic fields calculation” *Conference Boston 2005* , <http://cds.comsol.com/access/dl/papers/1196>.

[47] **M.Greitans, E.Hermanis, A.Selivanovs :** “Sensor Based Diagnosis of Three-Phase Power Transmission Lines”. *Electronic and Electrical Engineering* ISSN. N°2 (1392 – 1215), 2009.

[48] **M. Brahami, M.Ghezaili, A. Bendaoud, M. Miloudi, H. Sayah,** “Lignes de transport d’énergie et champs électromagnétiques”, 6ème conférence régionale des comités CIGRE des pays arabes, Caire-Egypt 21-23 Novembre 2005.

[49] **S. Pasare.** Calcul du champ électrique et des capacités partielles d’une ligne électrique aérienne a haute tension. *University of Craiova, Electrical Engineering series*, No. 32; ISSN 1842-4805, 2008.

[50] **A. Marincu, M. Greconici and S. Musuroi:** “The electromagnetic field around a high voltage 400kvelectrical overhead Lines and the influence on the biological systems” .*Ser. elec. energy*. vol. 18, No. 1, (105-111), April 2005.

[51] **J.M. Bakhawain, M.H.Shwehdi. U.M.Johar, and A.A.El-Naim** Magnetic field measurement and evaluation of EHV transmission lines in Saudi Arabia. *Proceedings of the international conference on non ionizing radiations at Uniten, ICNIR 2003*.

[52] **A. Staselis** .Evaluation of electromagnetic pollution by high voltage aria power Lines. *Environmental research, engineering and management*, No.2 (36), P.31-36, 2006.

[53] **K.Hameyer, R.Mertens, R.Belmans** . Computation and measurement of electromagnetic fields of AC-High-Voltage Transmission Lines. In *AC and DC Power Transmission*, Sixth International Conference on (Conf. Publ. No. 423) (pp. 52-57). IET, 1996 .

[54] **C. Lemos. Antunes** “ELF magnetic field Security zones around high voltage power lines”. 11th chilies conference , Zaragoza, Spain 2009.

-
- [55] **C. Hender, S. Soltan** “ Aspects on the Influences of the High Voltage Power Lines on the Environment ” Univ. (Timișoara) Volume 52(66), 1-2, 2007.
- [56] **J.L.Lilien. Dular, P., Sabariego, R., Beauvois, V., Barbier, P.P., & Lorphevre, R.** Effects of extremely low frequency electromagnetic fields on human beings. REE Revue de l'Electricite et de l'Electronique, (5), 65-76 , 2010 .
- [57] **Dib .Djalel, Mordjaoui . Mourad.** Study of the influence high-voltage power lines on environment and human health (case study: The electromagnetic pollution in Tebessa city, Algeria).Journal of Electrical and Electronic Engineering.2(1):1-8, 2014. DOI:10.11648.
- [58] **R.Djekidel, D. Mahi A. Ameer, A. Ouchar:** Calcul et réduction du champ électrique au voisinage d'une ligne de transport d'énergie électrique HT. ACTA ELECTROTEHNICA , vol 55,page 1-2, 2014.
- [59] **AH. Bendakir, H. Belila, T. Ruibah, S. Bensiammar.** Calcul du champ électromagnétique transitoire dans un poste électrique THT/HT. CNCEM'09 – 1ère Conférence Nationale sur la Compatibilité électromagnétique, Tiaret, 22-24 novembre 2009.
- [60] **W. Tourab, A. Babouri, M. Nemamcha.** “ 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.
- [61] **Ecole Supérieure de Plasturgie .Compatibilité électromagnétique :** couplages des perturbations. 2001.
- [62]**G.Pinson .Physique appliquée. Compatibilité électromagnétique.** www.syscope.net/elec/A15.pdf
- [63] **P. Poulichet.** Chapitre 1: base de la compatibilité électromagnétique. Groupe ESSIE Paris 2005.
- [64] **Y. Mori.** Compatibilité électromagnétique, une introduction. Lavoisier, Hermès sciences, p.446 ,2007.
- [65] **J.D. Jackson.** Electrodynamique classique, 3^{ième} Edition, pp.407-456,1998.
- [66] **Sandrine Roblot.** Caractérisation des couplages électromagnétiques dans les réseaux filaires cuivre en vue d'optimiser les transmissions a haut débit. Thèse de doctorat N^o 2007-52, université de Limoge, 2007.
- [67] **Institut national de recherche et de sécurité.** ED 4215 Champs électromagnétiques, Paris, 2008.
- [68] **Riccardo Scorretti.** Caractérisation numérique et expérimentale du champ magnétique B.F.Généré par des systèmes électrotechniques en vue de la modélisation des courants induits dans le corps humain. Thèse de doctorat N^o d'ordre : E.C.L 200 3-38 ,2003.

[69] **BBMG** (Belgian Bio-Electro-Magnetic Group), électricité et santé. <http://www.bbemg.ulg.ac.be/indexfr.htm>, 2003.

[70] **Kovač.N, Goran Petrovič, Branislav Jajac and Neda Grulovič-Pavljanič** .Magnetic fields of Power lines related to maximal sag position. Proceedings of the 4th WSEAS I. Conference Electromagnetic, Wireless and Optical Communications, pages 22-25; ISBN: 960-8457-56-4, 2006.

[71]**Ecole Supérieure de Plasturgie** .Compatibilité électromagnétique : couplages des perturbations, 2001.

[72] **C P. Cipo, M.Barneshi, L. Ahma, E. Hamiti.** calculation and measurement of the magnetic field of power transmission lines, cigre sk c3 – 1, 2005 .

[73] **N. Wertheimer et E. Leeper** . Electrical wiring and childhood troubles. American Epidemiology 109, 273- 284.

[74] **M.S. Linet , E.E. Hatch and R.A. Kleinerman.** Residential exposure to magnetic fields and acute lymphoblastic in children . The new Engl J of Medicine,vol 337:1-8,1997.

[75] **G. Theriault, M.Goldberg, A.B. Miller.** Risks associated with occupational exposure to magnetic fields among electric utility workers in Quebec, Canada and France:1970-1989. American journal of epidemiology.Vol 139,No 6, P 550-572, 1994.

[76] **D.A.Savitz, D.P.Loomis.** Magnetic field exposure in relation to risk mortality among electric utility worker . American journal of epidemiology. Vol 141, No 2, P123-134, 1995.

[77] **R. Mandeville, E. Franco, S. Sidrac-Ghali.** Evaluation of the potential carcinogenicity of 60 Hz linear sinusoidal continuous –wave magnetic fields in fisher F344 rates.The FASEB journal, Vol 11, P1127- 1136, 1997.

[78] **M.Yasui , T. Kikuchi , M. Ogawa, Y. Otaka** . Carcinogenicity test of 50 Hz sinusoidal magnetic fields in rats. Bioelectromagnetics , vol 18, issue 8, P 531- 540, 1997.

[79] **N. Zoppetti, D. Andreuccetti.** Quasi-static electromagnetic dosimetry International Journal of Occupational Safety. Vol 12, issue 2:201-15, 2006.

[80] **R.Feynman,R.Leighton,M.Sands.**Le cours de physique Feynman. Electromagnétisme 1, Dunod, Paris, 1999.

[81]**J.Ben. HadjSlam.** Modélisation du rayonnement électromagnétique des circuits d'électronique de puissance. Application a un hacheur. Thèse de doctorat N⁰ d'ordre : E.C.L 1997-40, 1997.

[82] **Guissard et R. Priées.** Electricité et Magnétisme, Université Catholique de Louvain, Faculté des Sciences Appliquées, 1998.

[83] **T. Debu.** Lignes aériennes, paramètres électrique .Technique de l'ingénieur, Traité Génie électrique. D 4 435 – 1 ,2005 .

-
- [84] A.Staselis. Evaluation of electromagnetic pollution by high voltage aria power Lines. Environ. Res. Eng. Manage No.2(36), P.31-36,2006
- [85] **A. Taflove et S.C.Hagness**. Computational electromagnetics : the finite- difference time domain method.Artech House,Boston (USA),2ieme edition,2000 .
- [86] **K.J.Binns, P.J.Lawrenson et C.W.Trawbridge**. The analytical and numerical solution of electric and magnetic fields,chapter 8, page 227-231.John Wiley& sons,Chichester(UK), 1994 .
- [87]**Kane S.YEE**. Numerical Solution of Initial Boundry Value Problems Involing Maxwell's Equations in isotropic Media.IEEE Tran on antennas and propagation, VOL.AP-14,.3- 1966.
- [88] **J.F.Deford and OM.P.Gandhi**. An impedance method to calculate currents induced in biological bodies exposed to quasi-static electromagnetic fields.IEEE Trans.EMC, 27(3) :168-173, 1985.
- [89] **G.Dhatt, G. Touzot et E. Lefrançois** , Méthode des éléments finis. Hermès science 2005.
- [90] **Philippe. Rosnet**. Eléments de propagation électromagnétique. Ellipses Edition, ISBN 2-7298-1110-9, Paris 2002.
- [91] **S. Pasare**. Calcul du champ électriques et des capacités partielles d'une ligne électrique aérienne a haute tension. University of Craiova, Electrical Engineering series, No. 32; ISSN 1842-4805, 2008.
- [92] **D.W. Deno, L.E. Zaffanella**. Transmission line reference book – 345KV and above Électromagnétisme 1, Dunod, Paris, 1999.
- [93] **C.L.Antunes**. ELF magnetic field Security zones around high voltage lines. <http://www.aedie.org/11chliepapers/203-Lemos.pdf> ,2005.
- [94] **IEEE** Standard Procedures for Measurement of Power Frequency Electric and Magnetic Fields From AC Power Lines, IEEE Std. 644- 1994.
- [95]**M.Greitans, E.Hermanis, A.Selivanovs** : Sensor Based Diagnosis of Three-Phase Power Transmission Lines. Electronic and Electrical Engineering, ISSN. N°2 (1392 – 1215), 2009.
- [96] **W.Tourab, A. Babouri and M. Nemamcha**. 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.
- [97] **M.Nemamcha, AA. Boulahbal, A.Babouri et W. Tourab**. PNR (Projets Nationaux de Recherché).Compatibilité électromagnétique: étude de risques des champs électromagnétiques générés par les lignes haute tension . Laboratoire de Génie Electrique de Guelma (LGEG), université 8 Mai 1945 Guelma ,2008.
- [98] **User's Manual PMM 8053B**. System for the Electromagnetic Fields Measurement. Document 8053 BEN-80805-3.03; NARDA 2007.

Webographie

Anses (Agence nationale de sécurité sanitaire, de l'alimentation, de l'environnement et du travail). Effets sanitaires des champs électromagnétiques extrêmement basses fréquences, Rapport d'expertise collective, mars 2010, 181 p.

www.anses.fr/sites/default/files/documents/AP2008et0006Ra.pdf

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

www.who.int/peh-emf/about/WhatisEMF/fr/

Champs électromagnétiques et sante publique. Exposition aux champs de fréquence extrêmement basse, Aide-mémoire n° 322, juin 2007.

www.who.int/peh-emf/publications/facts/fs322/fr/index.html

Environmental Health Citerai 238, Extremely low frequency fields .

www.who.int/peh-emf/publications/Comple DEC 2007.pdf

ICNIRP (International Commission on Non-Ionizing Radiation Protection)

www.icnirp.de/PubEMF.htm

AFSSET (Agence Française de Sécurité Sanitaire de l'Environnement et du Travail). Avis relatif à la Synthèse de l'expertise internationale sur les effets sanitaires des champs électromagnétiques extrêmement basses fréquences. Maison Alfort ; 2010.

https://fr.wikipedia.org/.../Agence_française_de_sécurité_sanitaire_de_l'environnement_et_du_travail.

INRS (Institut national de recherche et de sécurité). Les mécanismes d'interaction avec le corps humain, Collection Champs électromagnétiques, ED 4215, mars 2008, 4 p.

www.inrs.fr/accueil/produits/mediatheque/doc/publications.

Lignes directrices pour l'établissement de limites d'exposition aux champs électriques et magnétiques variables dans le temps (fréquences de 1 Hz a 100 kHz), Points de repéré, 2011, 21 p.

www.inrs.fr/accueil/produits/mediatheque/doc/publications.

CGEDD (Conseil général de l'environnement et du développement durable)

Rapport de maitrise d'urbanisme autour des lignes de transport d'électricité, aout 2010, 56 p.

www.cgedd.developpement-durable.gouv.fr/IMG/pdf/007318-01_rapport_cle2f931a.pdf

SENAT (Office parlementaire d'évaluation des choix scientifiques et technologique.

Les effets sur la sante et l'environnement des champs électromagnétiques produits par les lignes a haute et très haute tension) ; Rapport n° 506 (2009-2010) de M. Daniel RAOUL, fait

au nom de l'Office parlementaire d'évaluation des choix scientifiques et technologiques,
déposé le 27 mai 2010.

www.senat.fr/rap/r09-506/r09-506_mono.html

RTE – EDF (Brochures et sites d'information des producteurs et distributeurs d'énergie).

www.clefdeschamps.info/?utm_source=rss&utm_medium=rss&utm_campaign=site-internet-la-clef-des-champs-electromagnetiques

Les champs électromagnétiques de très basse fréquence, 2005 (schéma page 18).

www.rtefrance.com/uploads/Mediatheque_docs/environnement/champs_electromagnetiques/Brochure_Champs_Electromagnetiques_TBF.pdf

HQ (Hydro Québec Champs électriques et champs magnétiques).

www.hydroquebec.com/developpementdurable/champs/index.html

Elia Belgique (Brochure sur les Champs électriques, magnétiques et liaisons a haute tension, 28 p.)

www.elia.be/~media/files/Elia/publications-2/brochures/ELIA