

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

THESE



En vue de l'obtention du Doctorat en Génie Electrique

Option : Electrotechnique

Titre de la thèse :

Compatibilité électromagnétique : Etude de l'environnement électromagnétique généré par les lignes haute tension

Présenté par : **ALI RACHEDI Billel**

Sous la direction de : **Pr. BABOURI Abdesselam**

Jury

Pr. NEMAMCHA Mohamed	Professeur, Université de Guelma	Président
Pr. BABOURI Abdesselam	Professeur, Université de Guelma	Rapporteur
Pr. HEROUS Lazhar	Professeur, Université d'Annaba	Examineur
Pr. OMEIRI Amar	Professeur, Université d'Annaba	Examineur
Dr. AZZAG El Bahi	M.C.A, Université d'Annaba	Examineur

2016

REMECIEMENTS

Le travail présenté dans cette thèse s'inscrit dans le cadre des travaux de recherche du laboratoire de génie électrique de Guelma (LGEG) de l'Université 8 mai 1945 Guelma, Algérie.

A l'issue de ce travail, je tiens à adresser ma reconnaissance et mes remerciements à toutes les personnes qui ont contribué, chacune à sa manière, à l'accomplissement de cette thèse.

Tout d'abord, Je tiens à remercier très chaleureusement mon directeur de thèse, Monsieur **Abdesslam BABOURI**, Professeur à l'Université de Guelma, pour son encadrement, son suivi permanent et ses précieux conseils.

Je tiens également à remercier vivement les membres de jury pour avoir accepté d'évaluer ce travail et cette thèse :

Monsieur **Mohamed NEMEMCHA**, Professeur à l'Université de Guelma, d'avoir accepté de juger mon travail et de présider le jury de soutenance de cette thèse.

Messieurs **HEROUS Lazhar**, Professeur à l'Université de Annaba, **Amar OMEIRI**, Professeur à l'Université de Annaba et **El Bahi AZZAG**, Maître de conférences à l'Université de Annaba pour m'avoir fait l'honneur d'accepter d'être les examinateurs de cette thèse.

Je voudrais remercier toute ma très nombreuse famille, pour son soutien de tous les instants, qui m'a encourager à poursuivre mon chemin. Avec une attention particulière pour mes parents; toujours présentent à mes coté pour soutenir mes ambitions et m'aider à accomplir mes rêves.

A tous mes amis et mes collègues et à toute l'équipe de laboratoire de Génie électrique de Guelma (LGEG).

ملخص الأطروحة:

عرفت العقود الأخيرة تطورا سريعا في جميع مجالات الهندسة الكهربائية، حيث أصبحت البيئة المحيطة بنا بحرا من الإشارات الكهربائية والمغناطيسية مما أدى إلى طرح العديد من التساؤلات حول التأثيرات المحتملة للحقول الكهرومغناطيسية، ليس فقط على الإنسان ولكن أيضا على المعدات الكهربائية والإلكترونية.

رغم أن العواقب الصحية ليست مؤكدة بعد، قامت التوصيات العالمية بتحديد قيم دقيقة لكل من المجال المغناطيسي (H)، المجال الكهربائي (E) وكثافة التيار داخل جسم الإنسان والذي يجب عدم تخطيها.

علاوة على ذلك، إهتمام كبير أعطي لشبكات نقل الطاقة الكهربائية بسبب القيم العالية لكميات الكهربائية. الحاجة لتقدير وإتقان مستويات الحقول الكهربائية و المغناطيسية بجوار الشبكات العالية التوتثر أصبح ضروريا، هذه الأطروحة خصصت لدراسة البيئة الكهرومغناطيسية ذات التردد المنخفض المجاورة للمصادر العالية التوتثر (سونلغاز) في المناطق الحضرية وكذا المناطق المهنية.

ركزنا في الدراسة البيولوجرافية على آثار المجالات الكهرومغناطيسية على الصحة وكذلك على أجهزة تنظيم نبضات القلب، كذلك على الدراسات التي أجريت لتقييم التلوث الكهرومغناطيسي الصادر عن خطوط النقل الكهربائي والمحطات العالية التوتثر بالإضافة إلى الطرق الرقمية الأكثر إستعمالا في مجال الإلكترومغناطيسية.

طرحنا صياغة رقمية للعناصر المحدودة 2D إنطلاقا من النماذج الكهروستاتيكية والمغناطيسية لبرنامج المحاكاة (COMSOL Multiphysics) ،

بالمقارنة مع نتائج القياس المحصل عليها بجوار خط كهربائي ذو تشكيل بسيط، تحققنا من فعالية هذه الطريقة. قمنا بإجراء عمليات محاكاة مختلفة على العديد من نماذج خطوط نقل الكهرباء العالية التوتثر والتي تبين آثار البارامترات الكهربائية و الهندسية، وكذا تحشد العديد من خطوط النقل المتوازية، أحد ظواهر الجهد الزائد (Effet Ferranti) وتواجد العوائق، على توزيع الحقول الكهرومغناطيسية. النتائج المحصل عليها قورنت بحدود السلامة للجمهور الكبير التي أوصت بها المعايير الدولية.

أخيرا، قمنا بإجراء دراسة تجريبية للإشعاعات الكهرومغناطيسية في الممرات الخاصة بالعمال داخل محطة نقل الطاقة العالية التوتثر (220/90/60/ 30 kV) مكنتنا من تحديد المخاطر الناجمة عن هذه الإشعاعات بعد مقارنة النتائج مع حدود السلامة الدولية الموصى بها للعمال.

الكلمات المفتاحية: المجالات الكهرومغناطيسية، المجال والصحة، التوافق الكهرومغناطيسي، التردد المنخفض، خطوط النقل عالية التوتثر، المحطات عالية التوتثر.

Abstract:

The last decades have seen a rapid progress in the various domains of electrical engineering, so that our environment has become a sea of electric and magnetic signals, this raises questions about the possible effects of electromagnetic fields, not only on humans but also on the electrical and electronic equipment. Although the health consequences are not confirmed yet, the World recommendations precise especially values of magnetic field H , electric field E and the current density J in human body to not exceed. Furthermore, a particular interest is given to the transmission networks of electric energy due to very high values of electrical quantities. The need for quantification and master the level of electric and magnetic field radiated in the vicinity of high-voltage networks has become indispensable, this thesis is devoted to the study of low frequency electromagnetic environment in the vicinities with high voltage sources (SONELGAZ) in urban and professionals areas.

The literature survey focuses on the effects of fields on health and pacemaker, the state of the art on the evaluation of electromagnetic pollution generated by high voltage lines and sub-stations, and the most analytical and numerical methods used in electromagnetism.

The analysis by classical analytical method of the field produced near a single power line allowed us to see the difficulty of applying this method on complex models.

Then a numerical 2D finite element formulation is developed from electrostatic and magneto static modules of COMSOL- MULTIPHYSICS software, comparisons with experimental results obtained in the vicinity of a line that has a simple configuration, provide some validation.

Several simulations performed on multiple models of high voltage lines illustrate the effects of electrical and geometrical parameters, the Trooping of several parallel lines, of a phenomenon of internal overvoltage "Ferranti effect" and the presence of obstacles, on the electromagnetic field distribution in the vicinities of these lines. The obtained results are compared with the safety limits recommended by international standards for general public exposure.

Finally, an experimental study of electromagnetic radiation inside an open-type high voltage sub-station (220/90/60/30 kV) have enabled us to determine the risk of this radiation on workers, after a comparison with the security limits recommended for the professionals.

Key words: Electromagnetic field, Field and health, Electromagnetic compatibility, low frequency, high voltage, HT transmission line, HT substation.

Résumé :

Les dernières décennies ont connu des progrès rapides dans les différents domaines de génie électrique de sorte que notre environnement est devenu une mer de signaux électriques et magnétiques, ceci soulève des questions sur les éventuels effets des champs électromagnétiques ; non seulement sur l'homme mais aussi sur les appareils électriques et électroniques. Bien que les conséquences sur la santé ne soient pas encore confirmées, des recommandations mondiales précisent notamment des valeurs de champ magnétique H, de champ électrique E, et de densité de courant induit J dans le corps à ne pas dépasser. Par ailleurs, un intérêt particulier est donné aux réseaux de transport d'énergie électrique en raison des valeurs très importantes des grandeurs électriques. La nécessité de quantifier et maîtriser le niveau du champ électrique et magnétique rayonné au voisinage des réseaux de haute tension est devenue indispensable, ce travail de thèse est consacré à l'étude de l'environnement électromagnétique basse fréquence au voisinage des sources à haute tension (SONELGAZ), dans les régions urbaines et professionnelles.

L'étude bibliographique fait le point sur les effets des champs sur la santé et sur les stimulateurs cardiaques, l'état de l'art sur l'évaluation de la pollution électromagnétique générée par les lignes et les postes haute tension, et les méthodes numériques les plus utilisées en électromagnétisme.

L'analyse par une méthode analytique classique du champ produit à proximité d'une seule ligne haute tension nous ont permis de voir la difficulté d'appliquer cette méthode sur des modèles complexes.

Puis une formulation numérique éléments finis 2D est développée à partir des modules électrostatiques et magnéto-statiques du logiciel COMSOL- MULTIPHYSICS, des comparaisons avec les résultats expérimentaux obtenus au voisinage d'une ligne qui possède une configuration simple, apportent une certaine validation.

Diverses simulations réalisés sur plusieurs modèles des lignes haute tension illustrent les effets des paramètres électriques et géométriques, de l'assemblage de plusieurs lignes parallèles, d'un phénomène de surtension interne « effet ferranti » et de la présence des obstacles, sur la distribution du champ électromagnétique au voisinage de ces lignes. Les résultats obtenus sont comparés avec les limites de sécurité du grand public recommandées par les normes internationales.

Enfin, une étude expérimentale des rayonnements électromagnétiques à l'intérieur d'un poste haute tension aérienne (220/90/60/30 kV) nous ont permis de constater le risque lié

à ces rayonnements sur les travailleurs, après une comparaison avec les limites de sécurité recommandées pour les professionnels.

Mots-clés : Champ électromagnétique, Champ et santé, Compatibilité électromagnétique, Basse fréquence, Haute tension, Ligne de transport HT, Poste HT.

Liste des tableaux ;

1. Recommandations des limites d'exposition du public au champ électrique et magnétique pour la fréquence 50 Hz.....	3
1.1 Ordres de grandeurs des champs électromagnétiques des lignes aériennes.....	7
1.2. Champ magnétique moyen rayonné par certains appareils domestiques.....	7
1.3. le seuil de perception du champ magnétique.....	10
1.4. Les niveaux de référence pour l'exposition du grand public aux champs électriques et magnétiques variables dans le temps, ICNIRP 1998.....	19
1.5. Les niveaux de référence pour l'exposition professionnelle aux champs électriques et magnétiques variables dans le temps, ICNIRP 1998.....	20
1.6. Les niveaux de référence pour l'exposition professionnelle aux champs électriques et magnétiques variables dans le temps, ICNIRP 2010.....	21
1.7. Les niveaux de référence pour l'exposition du grand public aux champs électriques et magnétiques variables dans le temps, ICNIRP 2010.....	21
2.1. Niveaux des hautes tensions (SONELGAZ).....	37
4.1. Symboles des travées de lignes 220 kV	107
4.2. Symboles des travées de lignes 60 kV.....	109
4.3. Variation du courant pendant la période de mesure (poste 220 kV).....	114
4.4. Variation du courant pendant la période de mesure (primaire de transformateurs 220 kV).....	117
4.5. Variation du courant pendant la période de mesure (poste 60 kV).....	120
4.6. Variation du courant pendant la période de mesure (poste 60 kV).....	120

Liste des figures

Chapitre -1:

1.1 Différentes sources des champs électromagnétiques.....	6
1.2. Interférence corps humain - champ électrique 50 Hz	8
1.3. Interférence corps humain - champ magnétique 50 Hz.....	9
1.4. Présentation de la problématique des interactions sources implants.....	14
1.5. Transmission des perturbations.....	15
1.6. Classification des modes de couplages.....	17
1.7. ICNIRP (1998), modélisation simplifiée : le corps humain (le disque) est soumis à un champ magnétique uniforme et perpendiculaire.....	18

Chapitre - 2:

2.1. Modèles de pylônes de dimensions (m) réelles	34
2.2. Différents types de pylônes.....	38

Chapitre-3:

3.1. Géométrie du modèle étudié (Ligne- Post El Hadjar /Arcelor Métal (Annaba))...41	
3.2. Schémas utilisés pour le calcul du champ magnétique.....42	
3-3. Champ magnétique de la ligne (I=270 A) calculé à (0m ; 1,5m ; 1,8m) au-dessus du sol.....43	
3.4. Conducteurs et ses images.....44	
3.5. Schémas utilisés pour le calcul du champ électrique (méthode des images).....45	
3.6. Champ électrique de la ligne à 0, 1,5 m, 1.8 m au-dessus du sol.....46	
3.7. Application de la méthode DF en 2D et 3D.....48	
3.8. Application de la méthode FDTD- maillage de Yee.....49	
3.9. Représentation 3D et 2D d'un réseau électrique représentatif d'une matière vivante (Application des lois de Kirchhoff).....51	
3.10. Description de la méthode- résolution d'un système physique par EF.....53	
3.11. Différents cas du maillage.....54	
3.12. Élément triangulaire à base de nœud. Les nœuds sont numérotés dans le sens antihoraire.....55	

3.13. Illustration des fonctions de base de nœuds sur la base $N_i^e(x,y)$ pour un élément triangulaire, et l'approximation linéaire (A-c) des fonctions de base linéaire N_1^e, N_2^e et N_3^e l'approximation linéaire (d) $\sum \phi_i^e N_i^e(x,y)$	56
3.14. Logiciel d'éléments finis.....	57
3.15. Présentation du logiciel: a) Géométrie du modèle, b) Application du Maillage, c) simulation en 2D, d) simulation en 3D, e) Application Zoom, t) Résultat sous forme de courbe.....	58
3.16. Organigramme de calcul numérique.....	61
3.17. Géométrie de la ligne étudier (ligne de 400 kV, Drawech –Ramdan Djamel).....	62
3.18. Equipement de mesures.....	62
3.19. Position de mesures, au voisinage du pylône	63
3.20. Conditions aux limites, champ électrique.....	64
3.21. Conditions aux limites, champ magnétique.....	65
3.22. Profile du champ électrique, résultats de mesures.....	65
3.23. Profile du champ électrique, calculs numériques.....	66
3.24. Profil du champ magnétique, résultats de mesures.....	67
3.25. Profil du champ magnétique, calculs numériques.....	67
3.26. Positions de mesures, au voisinage de la flèche maximale.....	69
3.27. Profil du champ électrique, résultats de mesures au voisinage de la flèche maximale	69
3.28. Profil du champ magnétique, résultats de mesures au voisinage de la flèche maximale	70
3.29. Profils des champs électrique à 0m, 1.5 m et 1.8 m au-dessus de sol.....	71
3.30. Profils de champ électrique entre 2 à 10 m au-dessus de sol	72
3.31. Profils de champ électrique entre 11 à 19 m au-dessus de sol.....	72
3.32. Profils de champ électrique entre 21 à 30 m au-dessus de sol	73
3.33. Profils de champ magnétique à 0 m, 1.5m et 1.8m au-dessus de sol.....	74
3.34. Profils de champ magnétique de 2 à 10 m au-dessus de sol	74
3.35. Profils de champ magnétique de 11 à 19 m au-dessus de sol	75
3.36. Profils de champ magnétique de 21 à 30 m au-dessus de sol.....	75
3.37. Influence de la tension sur la distribution du champ électrique.....	76
3.38. Influence des courants dans les phases sur la distribution du champ magnétique.....	77
3.39. Dispositions des phases	78
3.40. Influence de la disposition de phases sur la distribution du champ électrique.....	78
3.41. Modèle de deux lignes haute tension 220 kV parallèles.....	79

3.42. Profils du champ électrique au niveau du sol.....	80
3.43. Profils du champ électrique à 1.5 m et 1.8 m au-dessus du sol.....	80
3.44. Profils du champ électrique de 2 m à 10 m au-dessus du sol.....	81
3.45. Profils du champ électrique de 11 à 19 m au-dessus du sol	81
3.46. Profil de champ magnétique au niveau du sol.....	82
3.47. Profils de champ magnétique à 1.5 m et 1.8 m au-dessus du sol.....	83
3.48. Profils de champ magnétique de 2 à 10 m au-dessus du sol.....	83
3.49. Profils de champ magnétique de 11 à 19 m au-dessus du sol.....	84
3.50. Le model étudié (6 lignes parallèles).....	85
3.51. Géométrie du model étudié.....	86
3.52. Conditions aux limites, calcul du champ électrique.....	86
3.53. Conditions aux limites, calcul du champ magnétique.....	87
3.54. Profils du champ électrique pour les trois niveaux (0 m-1,5 m-1,8 m).....	88
3.55. Profils du champ électrique à (12m-14m).....	89
3.56. Profils du champ électrique à (16 m-19 m).....	90
3.57. Profils du champ magnétique (0 m-1,5 m-1,8 m).....	91
3.58. Profils du champ magnétique pour les niveaux (12m-14m).....	92
3.59. Profils du champ magnétique pour les niveaux (16 m-19 m).....	92
3.60. Régions de calculs	94
3.61. Schéma équivalent : Ligne à paramètres distribués.....	94
3.62. Augmentation de la tension de la ligne.....	96
3.63. Profils du champ électrique pour les régions (extrémité 01, extrémité 02, mi- portée).....	97
3.64. Ligne 220 kV avec obstacle métallique.....	98
3.65. Profil du champ électrique avec et sans obstacle.....	99
3.66. Deux lignes parallèles avec obstacles.....	100
3.67. Profils du champ électrique au niveau du sol sans et avec obstacle.....	100
3.68. Profils du champ électrique à 0 m, 1.5 et 1.8 m, présence d'une barre d'acier relier à la terre	101
3.69. Profils du champ électrique à 16 m, 17 et 18 m, présence d'un obstacle (potentiel flottant).....	102
3.70. Profils du champ électrique à 12 m, 13 m et 14 m, présence d'un obstacle (potentiel flottant).....	102

Chapitre - 4:

4.1. Architecture simplifié du poste El-Hadjar.....	106
4.2. Poste 220 kV avec les points de mesures dans les différents passages.....	108
4.3. Passage des transformateurs.....	109
4.4. Poste 60 kV avec les points de mesures dans le passage.....	110
4.5. Photo du passage.....	110
4.6. Profils du champ électrique dans les quatre premiers passages du poste 220 kV.....	111
4.7. Profils du champ électrique dans les quatre derniers passages du poste 220 kV.....	112
4.8. Profil du champ électrique dans le passage 09 du poste 220 kV.....	113
4.9. Profil du champ magnétique dans les quatre premiers passages du poste 220 kV.....	114
4.10. Profils du champ magnétique dans les quatre derniers passages du poste 220 kV.....	114
4.11. Distribution du champ magnétique dans le passage 09 du postes 220 kV.....	116
4.12. Distribution du champ électrique dans le passage des transformateurs 220/60 kV.....	117
4.13. Distribution du champ magnétique dans le passage des transformateurs 220/60 kV	118
4.14. Distribution du champ électrique dans le passage du poste 60 kV.....	119
4.15. Distribution du champ magnétique dans le passage du poste 60 kV.....	120

Table Des Matières

INTRODUCTION GENERALE.....	1
----------------------------	---

CHAPITRE - 1

1- EFFETS DES CHAMPS ELECTROMAGNETIQUES SUR LA SANTE

1.1. Introduction.....	5
1.2. Sources de champs rayonnés.....	5
1.3. Effets à court terme du champ sur la santé.....	8
1.4. Effets à long terme du champ sur la santé.....	10
1.5. Effets du champ magnétique basse fréquence sur les stimulateurs cardiaques.....	13
1.6. Bibliographie sur la CEM des stimulateurs cardiaques.....	14
1.7. La compatibilité électromagnétique (CEM).....	15
1.7.1. Aspects fondamentaux de la CEM.....	16
1.7.2. Les modes de couplage.....	16
1.8. Contexte normatif.....	17
1.8.1. Les recommandations ICNIRP du 1998.....	17
1.8.2. Les recommandations ICNIRP du 2010	17
1.9. Normes sur les implants.....	21
1.10. Conclusion.....	22

CHAPITRE – 2

2- ETAT DE L'ART ET GENERALITES SUR LES LIGNES HT

2.1. Introduction.....	24
2.2. Etat de l'art.....	24
2.2.1. Champs générées par les lignes HT (exposition du grand public).....	24
2.2.2. Champs générées par des postes HT (exposition des professionnels).....	27
2.3. Les lignes haute tension.....	32

2.4. Modèles des lignes haute tension utilisés par SONELGAZ.....	37
2.4.1. Niveaux des tensions.....	37
2.4.2. Configurations des supports (pylônes).....	37
2.5. Conclusion.....	38

CHAPITRE - 3

3- METHODES ET CALCULS DES CHAMPS ELECTROMAGNETIQUES AU VOISINAGE DES LIGNES HAUTE TENSION

3.1. Introduction.....	40
3.2. Calcul analytique du champ électromagnétique générée par une ligne 220 kV.....	40
3.2.1. Caractéristique de la ligne étudiée.....	40
3-2-2. Champ magnétique.....	41
3-2-3. Champ électrique.....	43
3.2.3.1. Calcul des charges superficielles.....	44
3.2.3.2. Modèle de calcul de champ électrique.....	45
3.3. Méthodes numérique en électromagnétisme.....	47
3.3.1. Différence finie (DF).....	47
3.3.2. La méthode FDTD.....	48
3.3.2.1. Critère de stabilité.....	50
3.3.3. La Méthode des impédances.....	51
3.3.4. Eléments finis (FEM).....	52
3.4. Formulation numérique (éléments finis).....	58
3.4.1. Formulation de calcul du champ électrique.....	59
3.4.2. Formulation de calcul du champ magnétique.....	60
3.5. Mesure et calcul du champ électrique et magnétique au voisinage d'une ligne de 400 kV.....	61
3.5.1. Géométrie de la ligne étudiée.....	61
3.5.2. Equipement de mesure.....	62
3.5.3. Méthodologie de mesure.....	63
3.5.4. Simulation numérique.....	64
3.5.5. Résultats.....	65

3.5.5.1. Champ électrique.....	66
3.5.5.2. Champ magnétique.....	66
3.5.6. Mesure du champ au voisinage de la flèche maximale de la ligne 400 kV.....	68
3.5.6.1. Champ électrique.....	69
3.5.6.2. Champ magnétique.....	70
3.6. Cas d'une seule ligne HT.....	71
3.7. Influence de plusieurs paramètres sur la distribution de champ électromagnétique.....	76
3-7-1. Influence de paramètres physiques.....	76
3.7.1.1. Impact de la tension sur la distribution de champ électrique.....	76
3.7.1.2. Impact du courant sur la distribution de champ magnétique.....	77
3.7.1.3. Influence de la géométrie de la ligne.....	77
3-8. Cas de deux lignes parallèles.....	78
3-9. Cas de 6 lignes parallèles.....	84
3.9.1. Résultats et discussion.....	87
3.9.1.1. Comportement de champ électrique.....	87
3.9.1.2. Comportement de champ magnétique.....	91
3-10. Evaluation des champs électromagnétique basse fréquence générée par une ligne ouverte	93
3.10.1. Régions de calculs	93
3.10.2. Calcul numérique.....	94
3.10.3. Résultats et discussion.....	97
3.11. Influence des obstacles sur les distributions des champs électromagnétiques.....	98
3-12. Conclusion.....	103

CHAPITRE - 4

4- ETUDE EXPERIMENTALE DE L'ENVIRONNEMENT ELECTROMAGNETIQUE DANS UN POSTE HAUTE TENSION

4.1. Introduction.....	105
4.2. Description du poste étudié.....	106
4.3. Méthode de mesures.....	107
4.3.1. Mesures dans la sous- station 220 kV.....	103
4.3.2. Passage des transformateurs 220/60 kV.....	108

4.3.3. Mesures dans le poste 60 kV.....	109
4.4. Résultats et discussion.....	111
4.4.1. Dans le poste 220 kV	111
4.4.1.1. Comportement du champ électrique.....	111
4.4.1.2. Comportement du champ magnétique.....	113
4.5. Dans le passage des transformateurs 220/60 kV.....	116
4.5.1. Comportement du champ électrique.....	116
4.5.2. Comportement du champ magnétique.....	117
4.6. Dans la sous-station 60 kV.....	118
4.6.1. Comportement du champ électrique.....	118
4.6.2. Comportement du champ magnétique.....	119
4.7. Conclusion.....	121
CONCLUSION GENERALE.....	122
BIBLIOGRAPHIE.....	125

Notations importantes:

CEM : Compatibilité électromagnétique

HT : Haute tension

THT : Très haute tension

EF : Élément finis

DF : Différence finis

FDTD : Différences finis dans le domaine du temps

U : Tension électrique

E : Champ électrique

D : Induction électrique

H : Champ magnétique

B : Induction magnétique

A : potentiel vecteur magnétique

ϵ : Permittivité

ϵ_0 : Permittivité dans le vide

ϵ_r : Permittivité relative

μ : Perméabilité magnétique

μ_0 : Perméabilité dans le vide

μ_r : Perméabilité relative

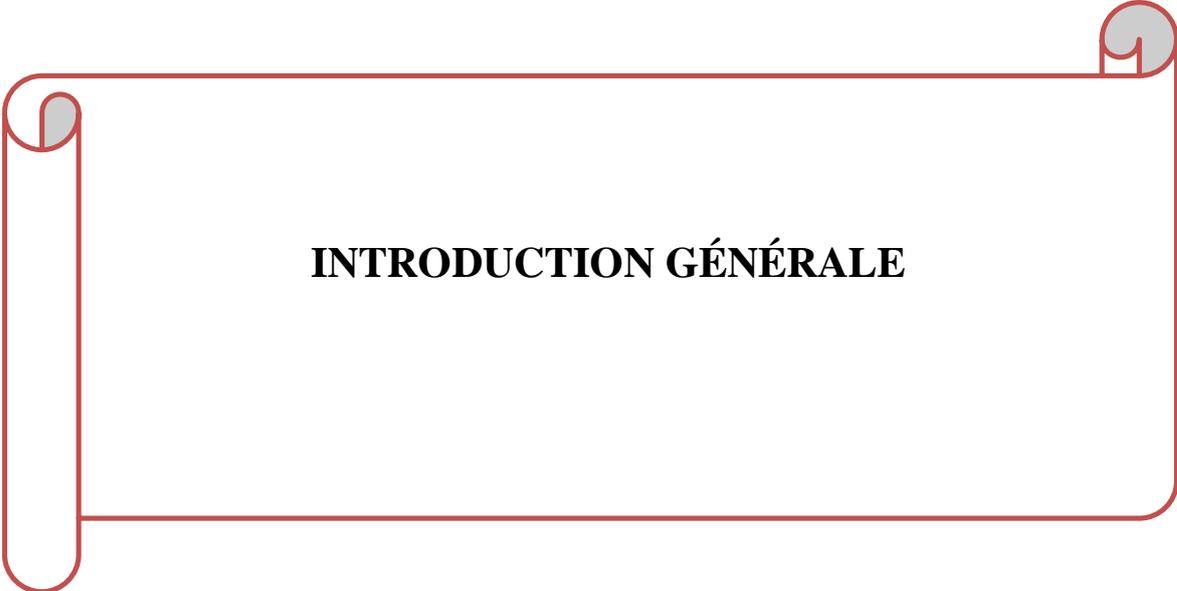
f : Fréquence

I : Courant

J : Densité de courant

σ : Conductivité électrique

P : Densité de charge



INTRODUCTION GÉNÉRALE

Introduction générale

Dans la vie de tous les jours nous sommes exposés en permanence à des champs électromagnétiques d'origine naturelle, mais aussi artificielle. Ces derniers résultent de l'utilisation toujours croissante de l'énergie électrique. Ceci soulève des questions sur les éventuels effets de l'exposition à ces champs sur la santé humaine. Les interactions de ces champs électromagnétiques avec les tissus biologiques provoquent des effets sanitaires non seulement sur les tissus, mais aussi sur les appareils électroniques.

Plusieurs tentatives ont été effectuées pour harmoniser la normalisation européenne relative aux basses fréquences. En effet, en novembre 1984, la commission européenne a chargé pour la première fois le comité européen de Normalisation pour l'Électrotechnique (CENELEC [1]) de mettre en place des normes CEM harmonisées au niveau européen. Puis en 1989, elle promulgué la directive "89/336/CEE" concernant le rapprochement des législations des différents états membres relatives à la compatibilité électromagnétique. Cette directive a été transposée en droit français en 1992 (puis modifié en 1995) [2], et depuis le 1^{er} janvier 1996, elle est obligatoire. D'autres organismes sont également mandatés pour la mise en place de ces normes comme la CEI (Comité Electrotechnique International) [3], ou encore ICNIRP (Commission Internationale de Radioprotection sur les Rayonnements Non-Ionisants). Dans un rapport rendu public [4], l'Académie Nationale des Sciences des États-Unis a conclu que *"l'ensemble des éléments dont on dispose actuellement ne montre pas que l'exposition résidentielle aux champs électrique et magnétique de fréquence industrielle présente un danger pour la santé de l'homme"*. En revanche, les effets biologiques dus aux courants induits sont bien connus. Ce sont des effets réversibles de stimulation des cellules nerveuses et cardiaques. Pour éviter ces effets, l'organisation mondiale de la santé [5] a proposé dès 1989 une valeur limite de courant induit dans le corps humain $10mA/m^2$. En s'inspirant de cette proposition et d'une recommandation similaire de l'ICNIRP [6], la commission européenne adopte (juin 1999) une recommandation du conseil relative à la limitation de l'exposition du public aux champs électromagnétiques basse fréquence (tableau ci-dessous).

INTRODUCTION GENERALE

Tab1 : Recommandations des limites d'exposition du public au champ électrique et magnétique pour la fréquence 50 Hz.

	Champ électrique	Champ magnétique
Exposition résidentielle (24h/24h)	5kV/M	100 μ T
Exposition professionnelle (8h/j)	10kV/m	500 μ T

L'étude du comportement des éléments distincts des réseaux électriques (les lignes, les sous-stations et les différents postes de transformation, d'interconnexion, d'alimentation et de distribution) a permis de voir le risque de rayonnement électromagnétique généré par ces lignes non seulement sur les vivants (être humain, animaux, plantes... etc.), mais aussi sur les appareils électroniques et électriques (professionnels ou bien domestiques).

Pour cette raison plusieurs études ont été effectuées pour confirmer cette hypothèse dans ces dernières décennies. La plupart des résultats de recherches ont indiqué qu'il existe une relation entre certains types de maladies épidémiologiques et l'exposition du corps humain aux champs électromagnétiques 50 Hz, et que ces champs interfèrent avec les implants médicaux, en particulier les stimulateurs cardiaques, ce qui a comme effet de perturber leurs fonctionnements.

La nécessité de quantifier et maîtriser le niveau du champ électrique et magnétique rayonné par les dispositifs haute tension (lignes HT, Transformateurs) dans les milieux urbains et professionnels est devenu indispensable. Pour ce faire, trois voies sont possibles. Les techniques de mesure expérimentales, l'utilisation des méthodes analytiques basées sur des théorèmes de calculs des champs électromagnétiques basses fréquences (comme la méthode de simulation de charge [7] dans le cas de calcul du champ électrique, les théorèmes de Biot et Savart et d'Ampères dans le cas de calcul du champ magnétique) et la simulation numérique pour des géométries complexes. En effet, la littérature scientifique a prouvé l'efficacité des méthodes numériques pour la résolution des équations de Maxwells. Parmi ces méthodes les plus utilisées, on peut citer : la méthode des éléments finis, la méthode de différence finie, la méthode des différences finies dans le domaine du temps (FDTD) ainsi que la méthode des impédances [8].

INTRODUCTION GENERALE

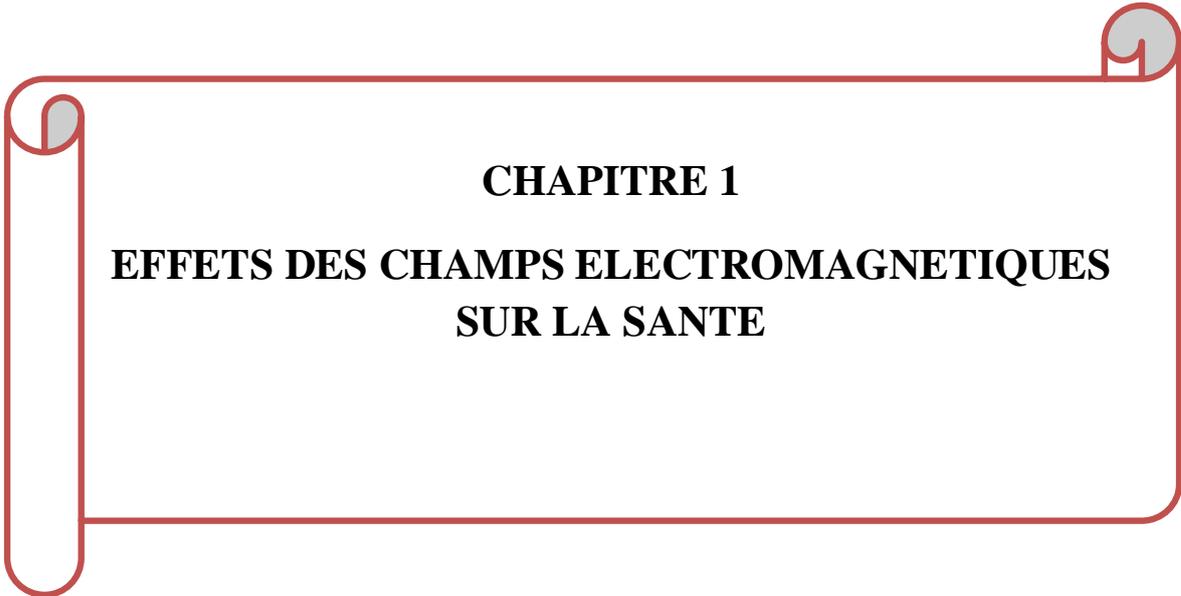
Ces travaux de recherche s'inscrivaient dans la continuité d'une première thèse [Tourab, 2016], qui a été menée en collaboration avec la Société Algérienne de l'Électricité et du Gaz (SONELGAZ). Dans ce contexte, nous avons utilisé dans ce présent travail de recherche les trois voies mentionnées précédemment, pour évaluer les champs électriques et magnétiques au voisinage des lignes haute tension dans les régions urbaines et professionnelles, dont le but est de comparer les résultats avec les normes internationales concernant l'exposition de l'être humain à ce type de champ et de trouver des solutions pour minimiser ce risque.

Dans le premier chapitre, nous avons effectué des études bibliographiques sur le thème « Effet du champ sur la santé », avec une attention particulière pour les effets biologiques. Nous avons ensuite discuté les contextes normatifs établis par l'organisation mondiale les plus récents (INCRIP 1998 et ICNIRP 2010).

Dans le deuxième chapitre, nous avons présenté l'état de l'art concernant l'évaluation des champs électromagnétiques au voisinage des lignes et des postes haute tension. En plus, pour bien situer le contexte de nos travaux, nous avons présenté les différents niveaux de tension et les configurations des lignes haute tension appliquées par SONELGAZ.

Dans le troisième chapitre, nous avons étudié le champ électrique et magnétique généré par des modèles des lignes réelles en utilisant des méthodes analytiques classiques. En effet, après la présentation des méthodes numériques les plus utilisées en électromagnétisme, nous avons élaboré un modèle de simulation éléments finis bidimensionnels (2D) basé sur les modules électrostatique et magnéto-statique du logiciel COMSOL Multi-Physics, en vue d'étudier l'environnement électromagnétique à proximité des lignes haute tension, prenant en compte l'influence des paramètres physiques et géométriques, le cas des lignes parallèles, l'influence d'un phénomène de surtension et des obstacles sur la distribution du champ électromagnétique. Les résultats que nous avons trouvés ont été comparés avec les normes internationales de l'exposition de public aux champs électromagnétiques basse fréquence.

Dans le dernier chapitre, nous avons effectué une étude expérimentale intensive de l'environnement électromagnétique à l'intérieur d'un milieu professionnel. Il s'agit du poste d'interconnexion 220/90/60/30 kV à El Hadjar-Annaba-Algérie, dont le but est de voir si les valeurs des champs électriques et magnétiques dépassent les limites d'expositions professionnelles à ce genre de pollution (10 kV/m pour le champ électrique, 500 μ T pour le champ magnétique).



CHAPITRE 1
EFFETS DES CHAMPS ELECTROMAGNETIQUES
SUR LA SANTE

1.1. Introduction

Ce premier chapitre est consacré à l'étude des effets résultent de l'interaction des champs électromagnétiques de fréquence industrielle (50 Hz) avec le corps humain et les implants médicaux. L'être humain vit dans un « environnement électromagnétique ». Bien que les effets à court terme d'une telle exposition soient assez bien connus, la communauté scientifique n'est pas unanime en ce qui concerne les effets à long terme sur la santé.

Certaines recherches confirment la possibilité d'attribuer des maladies de plus en moins graves résultant de l'exposition du corps humain aux champs électromagnétiques, et en particulier la leucémie chez l'enfant [9], et la leucémie et le cancer chez les travailleurs des métiers de l'électricité [10], [11]. Cependant, autre recherches réalisées dans des pays développés comme les Etats Unis, le Canada et la France [12], [13], [14] fournissent des résultats discordants, et ne permettent pas de tirer une conclusion sur l'association entre le champ électromagnétique et ses maladies.

De plus, les interférences entre les champs magnétiques basse fréquence et les implants médicaux, notamment les stimulateurs cardiaques, peuvent dégrader leurs activités, ce qui conduit à mettre en danger la vie des patients [15], [16].

1.2. Sources de champs rayonnés

Dans notre environnement, les champs électromagnétiques sont engendrés par des sources naturelles et artificielles. En basse fréquence, le champ électrique E et le champ magnétique H sont partiellement indépendants. Les champs électriques et magnétiques terrestres sont des champs continus générés par les charges électriques présentes dans l'atmosphère (champ électrique), ou par les courants magmatiques, l'activité solaire et atmosphérique (champ magnétique). Ces champs sont de l'ordre de 100-150 V/m pour le champ électrique atmosphérique (il peut atteindre 20 kV/m sous un orage), et environ 40 μT pour le champ magnétique. À ceux-ci s'ajoutent des champs naturels alternatifs de valeur très faible : 1 mV/m à 50 Hz, 0,013 à 0,017 μT avec des pics à 0,5 μT lors d'orages magnétiques (champs de fréquence supérieure à 100 kHz) [17]. D'autre part, les champs électromagnétiques artificiels dont la plupart alternatives.

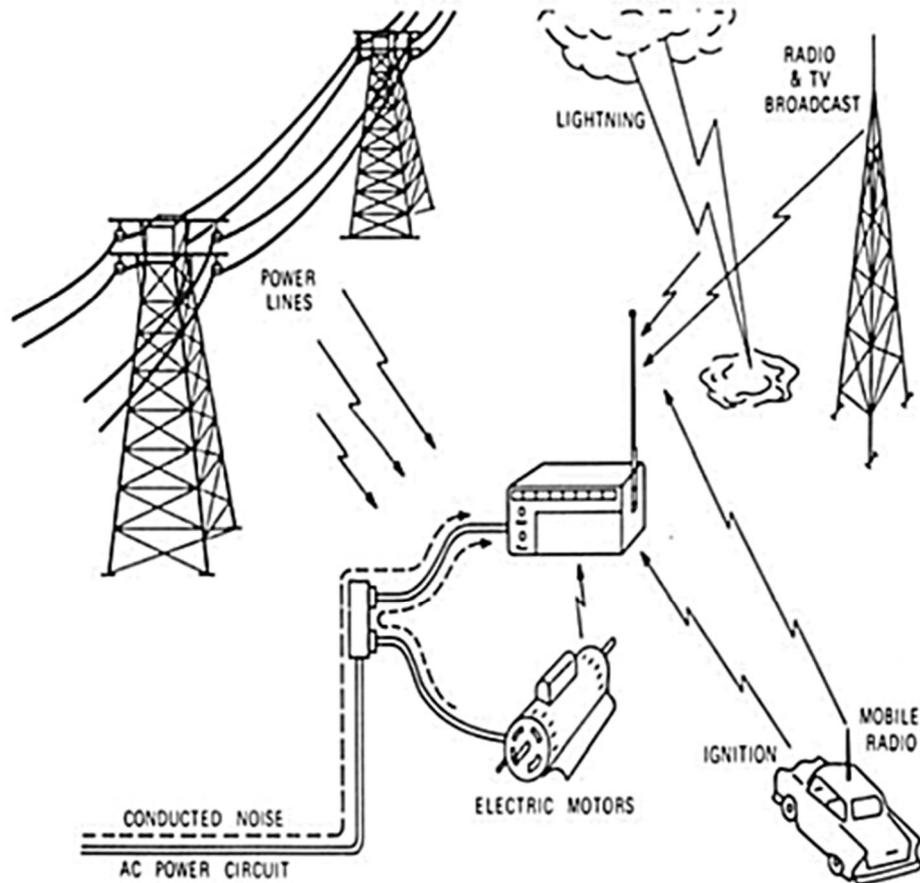


Fig. 1.1 : Différentes sources des champs électromagnétiques

Les réseaux électriques à haute et à très haute tension constituent la principale source de champ électrique. L'émission d'un champ magnétique n'est pas liée à la tension, mais au courant qui traverse un conducteur, qu'il s'agisse d'un câble haute tension, des câbles distribuant le 230 V dans une habitation, ou encore le câblage électrique d'un appareil. Les réseaux à haute tension, en raison des intensités des courants élevées qui y circulent, sont une source de champs magnétiques à 50 Hz. Cependant leur intensité décroît rapidement de manière inversement proportionnelle à la distance des conducteurs ($1/d^\alpha$). Pour les appareils électroménagers, leurs champs décroissent d'une manière similaire ($1/d^\beta$). Le champ électrique généré par les réseaux HT et THT, ainsi par les réseaux de distribution, décroît aussi rapide au fur et à mesure qu'on s'éloigne des conducteurs ($1/d$) [18]. Les tableaux 1.1 et 1.2 donnent les ordres des grandeurs des champs électriques et des champs magnétiques publiés par EDF, France [19], [20].

Chapitre 1- Effets des champs électromagnétiques sur la santé

Tab 1.1 : Ordres de grandeur des champs électromagnétiques des lignes aériennes

Champs Lignes électriques	Champ électrique (V/m)	Induction magnétique (μ T)
400kV	(1) - 5000	(1) - 30
	(2) - 2000	(2) - 12
	(3) - 200	(3) - 1,2
225 kV	(1)- 3000	(1) - 20
	(2) - 400	(2) - 3
	(3) -40	(3) - 0,3
90 kV	(1)-1000	(1)-10
	(2)-100	(2)-1
	(3)-10	(3)-0.1
20 kV	(1)-250	(1)-6
	(2)-10	(2)-0.2
	(3)-Négligeable	(3)-Négligeable
230 V	(1) - 9	(1) - 0,4
	(2) - 0,3	(2) -Négligeable
	(3) -Négligeable	(3) -Négligeable

(1) -sous la ligne;(2) - à 30 m de la ligne;(3) –à 100 m de la ligne

Tab 1.2 : Champ magnétique moyen rayonné par certains appareils domestiques

Source de champ magnétique	Induction magnétique
Téléviseur	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 15cm
Fer à repasser	0,1 μ T à 30 cm
	0,8 μ T à 15cm
Ecran de micro-ordinateur	0,5 μ T à 30 cm
	1,4 μ T à 15cm

1.3. Effets à court terme du champ sur la santé

L'interférence du corps humain avec un champ électrique induit à la surface du corps exposé une charge superficielle. Ce phénomène se traduit à l'intérieur du corps par l'apparition de courants, nécessaires pour déplacer les charges électriques à la surface du

Chapitre 1- Effets des champs électromagnétiques sur la santé

corps (Figure 1.2). Même dans un champ de 50kV/m (bien supérieur à la plus haute valeur d'un champ présent sous une ligne haute tension), les courants induits sont si faibles qu'ils ne peuvent pas se faire sentir. Dans un milieu où il existe un champ E de plusieurs kV / m, les personnes sensibles peuvent ressentir des vibrations mineures de la peau, de cheveux ou de vêtements. La plupart des gens sont capables de percevoir des champs électriques de 50/60 Hz d'intensité supérieure à 20 kV.m^{-1} et seule une infime minorité peut percevoir des champs d'intensité inférieure à 5 kV.m^{-1} [21].

Certaines personnes peuvent ressentir de petits chocs en touchant de gros objets mis à la terre exposés aux champs électriques. Ces effets sont inoffensifs, mais peuvent être irritants, surtout si l'expérience est persistante.

Les champs magnétiques alternatifs induisent également de très faibles courants électriques à l'intérieur du corps humain (Figure 1.3).

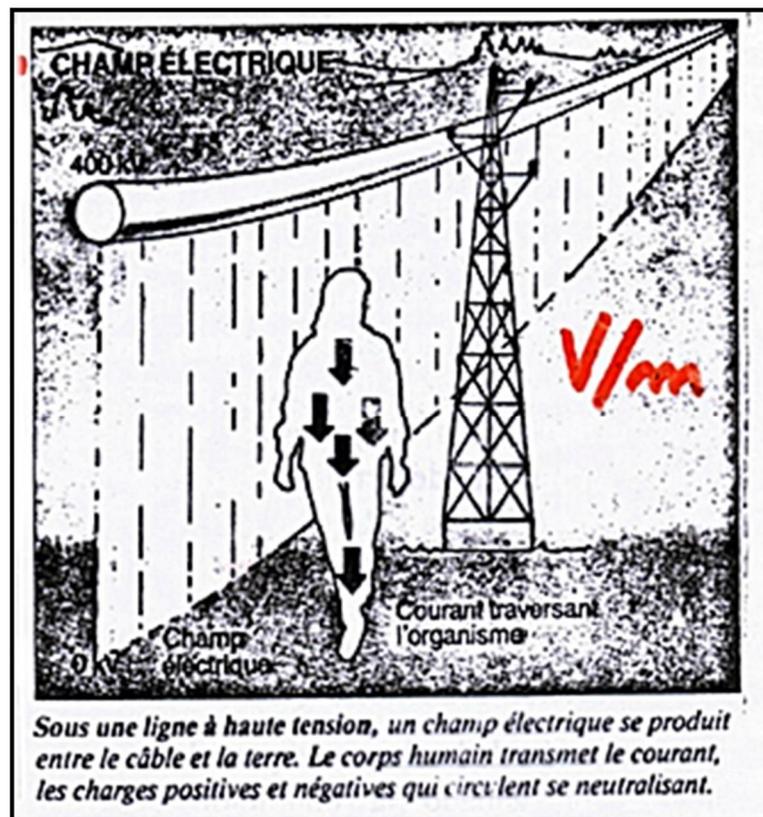


Fig1.2: Interférence corps humain - champ électrique 50Hz [22].

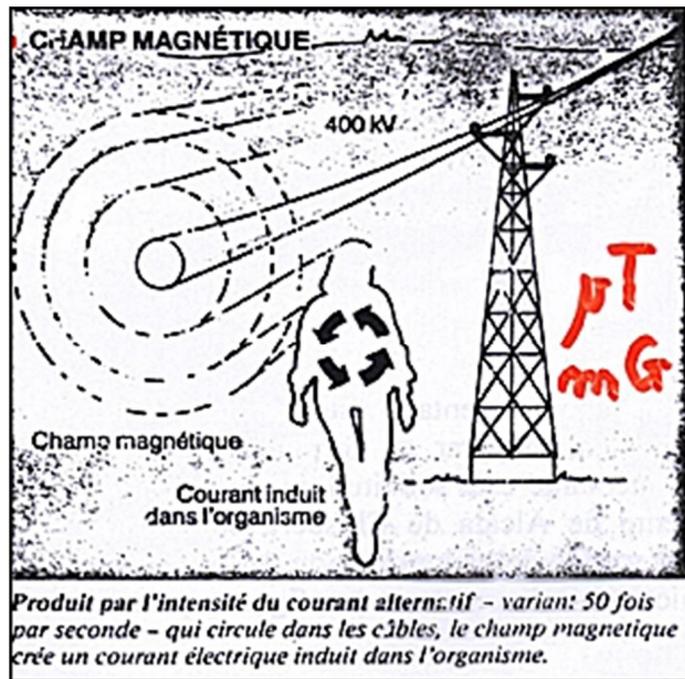


Fig1.3 : Interférence corps humain - champ magnétique 50Hz [22].

Les courants induits par des champs magnétiques alternatifs (pour les valeurs d'exposition usuellement rencontrées) sont de faible intensité et ne sont pas perceptibles. Par contre, l'exposition à des champs magnétiques intenses peut provoquer des perceptions immédiates. Les seuils de perception en fonction de la densité de courant induit, et en fonction du champ magnétique retenu par l'OMS se trouvent dans le tableau 1.3.

L'exposition à des champs électriques et magnétiques combinés de 60 Hz (9 kV.m^{-1} , $20 \mu\text{T}$) provoque une légère modification de la fonction cardiaque. Au repos, le rythme cardiaque était légèrement réduit (de 3 à 5 battements par minute) pendant ou immédiatement après l'exposition. Mais cette réaction n'était pas observé lors de l'exposition à des champs plus fort (12 kV.m^{-1} , $30 \mu\text{T}$) ou plus faible (6 kV.m^{-1} , $10 \mu\text{T}$) [18].

Tab 1.3 : Seuil de perception du champ magnétique [23]

Champ magnétique (50/60Hz) (mT)	Densité de courant induit (mA/m ²)	Le seuil de perception
0,5 – 5	1 – 10	Effets biologiques mineurs. Effets bien établis sur le système nerveux et la vision.
5 -50	10 – 100	Stimulation des tissus excitables et dommages possibles sur la santé.
50 – 500	100 – 1000	Fibrillation ventriculaire et des extrasystoles – effets aigus.
>500	>1000	

1.4.Effets à long terme du champ sur la santé [24].

Depuis la publication en 1979 [9] de la première étude ayant suggéré une association entre les champs électriques et magnétiques d'extrêmement basse fréquence (EBF) et la leucémie de l'enfant, de nombreuses études épidémiologiques, de plus en plus élaborées, ont examiné cette association. Des articles de revue en grand nombre, des méta-analyses, et plus récemment deux analyses « poolées » (une démarche statistique combinant les résultats d'une série d'études indépendantes sur un problème donné) regroupant les données de plusieurs études épidémiologiques, ont été publiées. Dans l'une de ces analyses « poolées », fondées sur les 9 principales études sur la leucémie de l'enfant, toutes de bonne qualité sur le plan méthodologique [25], [26], on a pu observer que les expositions à des champs magnétiques EBF à des niveaux inférieurs à 0,4 μ T n'entraînent pas d'augmentation du risque, mais qu'au-dessus de 0,4 μ T le risque de leucémie de l'enfant est multiplié par 2. Cette augmentation du risque concernerait 0,6% de la population européenne exposée à ce niveau, ce chiffre pouvant varier sensiblement d'un pays à l'autre. La seconde analyse « poolée » comporte 15 études sélectionnées selon des critères moins restrictifs, et utilise la valeur de 0,3 μ T pour définir les niveaux d'exposition les plus élevés. Les résultats de ces deux analyses sont totalement cohérents.

Il est important de noter que les niveaux d'exposition estimés, en particulier la valeur critique de 0,4 μ T (ou 0,3 μ T dans la seconde analyse), correspondent à une valeur moyenne

pondérée sur toute la durée d'exposition des sujets. Par ailleurs ces niveaux sont estimés à partir de méthodes différentes selon les études. Dans les études scandinaves [27], ils correspondent à un calcul historié d'exposition aux champs magnétiques provenant des lignes haute-tension à proximité des lieux de résidence, alors que dans les études canadiennes par exemple [28], utilisant des dosimètres individuels, ils intègrent l'ensemble des sources d'exposition possibles.

À l'inverse de ces résultats qui concernent les champs magnétiques EBF, les éléments d'évaluation scientifique permettant de relier les champs électriques à la leucémie de l'enfant sont insuffisants. Les études portant sur les tumeurs du cerveau chez l'enfant, ou sur des cancers d'autres localisations, n'ont pas permis d'observer des relations consistantes avec les champs électriques et les champs magnétiques EBF. Toutefois, ces études sont généralement de plus petite taille, et ont été de moins bonne qualité.

L'association entre la leucémie de l'enfant et l'exposition à des niveaux élevés de champs magnétiques n'est certainement pas une observation liée à l'effet du hasard, mais il est possible que certains biais aient pu renforcer ce résultat. Des biais de sélection, en particulier, peuvent expliquer en partie l'association observée. Ces biais sont particulièrement susceptibles de survenir dans les études cas-témoins basées sur des mesures à domicile, du fait des taux de participation peu élevés obtenus pour plusieurs d'entre elles. Les études conduites dans les pays scandinaves, dans lesquelles l'exposition historiée aux champs magnétiques est calculée, ne sont pas sujettes à des biais de sélection, mais ont l'inconvénient de ne porter que sur de très petits effectifs de sujets exposés. Les techniques d'évaluation des champs électriques et magnétiques ont connu des améliorations très importantes au cours du temps, mais des erreurs de classement ont pu survenir dans toutes les études. Comme nous l'avons évoqué ci-dessus, des erreurs de classement non différentielles (survenant avec la même probabilité chez les cas et chez les témoins) ont toute chance de biaiser les résultats vers l'absence d'association. Enfin, il est peu vraisemblable que des biais liés à des facteurs de confusion puissent expliquer entièrement les effets observés. Toutefois, il est possible qu'un certain niveau de confusion, lié à d'autres facteurs de risque de la leucémie, soit présent dans les études, agissant dans le sens d'une sur-estimation ou d'une sous-estimation des risques. On ne peut pas exclure non plus qu'une combinaison de biais de sélection, d'un certain degré de confusion, et de hasard explique les résultats observés. Si la relation observée entre la leucémie de l'enfant et l'exposition aux champs magnétiques était de nature causale, le risque associé à l'exposition pourrait également être plus élevé que ce qui a été décrit et inversement. Dans un rapport publié en juin 2002, trois experts du « *California Department of*

Health Services » concluaient « *qu'ils étaient enclins à croire que les champs électromagnétiques peuvent entraîner une augmentation du risque de leucémie de l'enfant et d'autres pathologies* ». Ils concluaient également « *croire fortement que les champs électromagnétiques ne sont pas des cancérrogènes universels, car de nombreux types de cancers ne sont pas associés avec l'exposition* » [29].

L'ensemble des éléments disponibles, et notamment les analyses groupées portant sur la leucémie de l'enfant, ont conduit le CIRC (Centre International de Recherche sur le Cancer, IARC en anglais) à considérer qu'il existait une évidence limitée d'un risque accru de leucémie de l'enfant lié à l'exposition aux champs magnétiques EBF, et à classer cette exposition dans la catégorie 2B des cancérrogènes possibles. Les données disponibles portant sur les autres types de cancer de l'enfant ou chez l'adulte, ainsi que sur l'exposition aux champs électriques EBF, ont été jugées inadéquates.

➤ **Etudes sur les professionnels**

Un grand nombre d'études épidémiologiques ont été menées pour évaluer les liens possibles entre l'exposition aux champs électromagnétiques et le risque de cancer chez les travailleurs dans les professions électriques. La première étude de ce type a profité d'une base de données des certificats de décès qui comprenait les deux titres, d'emploi et les informations sur la mortalité par cancer. En tant que méthode brute d'évaluation de l'exposition, Milham [30] a classé les titres d'emploi en fonction de l'exposition au champ magnétique présumé et a trouvé un excès de risque de leucémie chez les ouvriers en électricité. Des études ultérieures (Savitz et Ahlbom 1994) [31] ont utilisé des bases de données similaires; les types de cancer pour lesquels les taux élevés ont été observés variaient selon les études, en particulier lorsque les sous-types de cancers ont été caractérisés. Des risques accrus de divers types de leucémie et de tumeurs des tissus nerveux et dans quelques cas, les deux types de cancer de sein (mâle et femelle), ont été rapportés (Demers et al 1991 [32]; Matanoski et al 1991 [33]; Tynes et al 1992 [34]; Loomis et al ; 1994 [35]). Ainsi que la production des résultats un peu contradictoires, ces études ont souffert d'évaluation de l'exposition très brute et de l'absence de contrôle des facteurs de confusion telle que l'exposition au solvant benzénique dans le lieu de travail.

Trois études ont tenté de surmonter certaines des lacunes dans les travaux antérieurs en mesurant l'exposition ELF sur le terrain au lieu de travail et en prenant la durée du travail en considération (Floderus et al 1993 [36]; Theriault et al 1994 [10]; Savitz et Loomis 1995

[11]). Un risque élevé de cancer chez les personnes exposées a été observé, mais le type de cancer, dont cela était varié d'une étude à l'autre. Pour les sous-types de leucémie, il y avait encore plus d'incohérence, mais les chiffres de l'analyse étaient petits. Pour les tumeurs du tissu nerveux, Floderus et al. (1993) ont constaté un excès de glioblastome (astrocytome III-IV), tandis que les deux Theriault et al. (1994) et Savitz et Loomis (1995) ont constaté que des preuves suggérant une augmentation de gliome (astrocytome I-II). S'il y a vraiment un lien entre l'exposition professionnelle aux champs magnétiques et le cancer, une plus grande cohérence et des associations plus fortes seraient attendues de ces études basées sur des données d'exposition plus sophistiquées. Les chercheurs ont également étudié la possibilité que les champs électriques ELF puissent être liés au cancer. Les trois utilitaires qui ont participé aux études des champs magnétiques, ont analysé les données de champ électrique aussi (Theriault et al., 1994). Les travailleurs atteints de leucémie à l'un des utilitaires ont été signalés à être plus susceptibles d'avoir été exposés à des champs électriques que les travailleurs de contrôle. En outre, l'association était forte dans un groupe qui avait été exposé à des champs électriques et magnétiques élevés combinés (Miller et al. 1996) [37]. Lors de la deuxième utilité, les chercheurs n'ont rapporté aucune association entre la leucémie et l'exposition cumulative plus élevée aux champs électriques en milieu de travail, mais quelques-unes des analyses ont montré une association avec le cancer du cerveau (Guenel et al., 1996) [38]. Une association entre la maladie d'Alzheimer et l'exposition professionnelle aux champs magnétiques a été récemment suggérée (Sobel et Davanipour 1996) [39]. Cependant, cet effet n'a pas été confirmé.

1.5. Effets du champ sur les stimulateurs cardiaques

Les stimulateurs cardiaques sont parmi les implants médicaux les plus répandus. En France par exemple, plus de 180 000 patients sont porteurs d'un stimulateur cardiaque et plus de deux millions de porteurs sont recensés dans le monde entier. Avec cette quantité importante qui ne cesse de croître, le stimulateur cardiaque est devenu un objectif de recherche très important pour améliorer la sécurité et le confort des personnes porteuses de ces implants.

Ces implants présentent des avantages indéniables quant à l'amélioration de la qualité de vie des patients, leur fonction d'écoute des signaux cardiaques aussi bien que leur configuration géométrique, les rendent particulièrement sensibles aux interférences électromagnétiques. Même si de nos jours, ces systèmes utilisent des algorithmes

d'identification des signaux cardiaques relativement sophistiqués, il est important de quantifier ces risques d'interférence. Ces derniers sont par ailleurs accrus par l'augmentation et la sophistication des sources potentiellement interférentes que l'on rencontre dans la vie courante par exemple les sources domestiques utilisant les technologies de l'induction ou l'utilisation généralisée des dispositifs de détection antivol. La caractérisation du comportement des stimulateurs cardiaques lorsqu'ils sont soumis à un champ électromagnétique relève d'un problème de compatibilité électromagnétique. Les difficultés engendrées par le développement important des sources potentiellement interférentes rendent délicate toute formalisation du problème, ce qui implique des études ciblées. La figure 1.4 ci-dessous, illustre une présentation des différents facteurs liés à la problématique CEM des stimulateurs cardiaques [40].

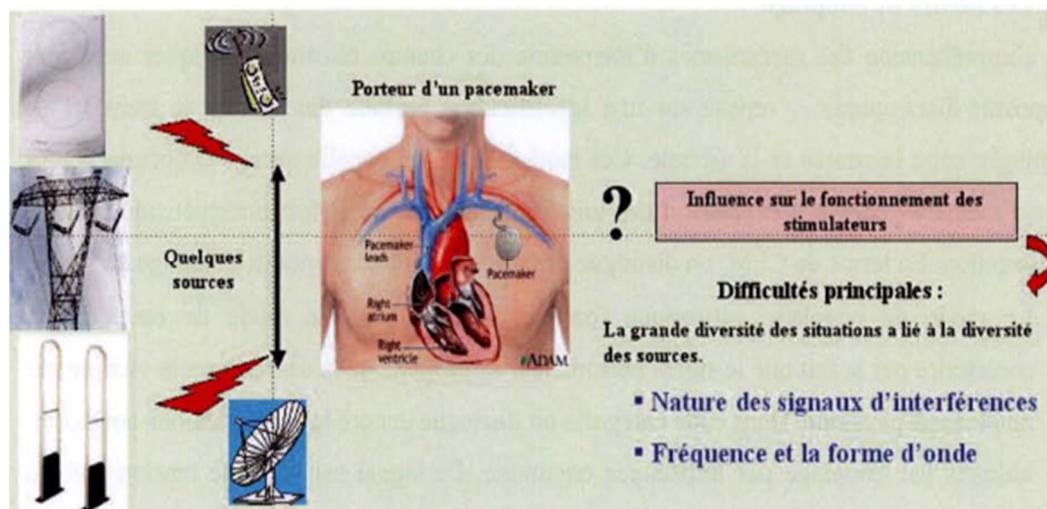


Fig1.4 : présentation de la problématique des interactions sources implants.

1.6. Bibliographie sur la CEM des stimulateurs cardiaques

Dans ce paragraphe nous présentons l'état de l'art de la compatibilité électromagnétique des stimulateurs cardiaques. De nombreuses études comportant des tests in vivo et in vitro ont été publiées et concernent les interférences dues aux différents types de sources, nous allons présenter une bibliographie des principaux travaux regroupés.

En ce qui concerne la fréquence 50 et 60 Hz du réseau de distribution électrique, nous citerons des études sur le comportement des stimulateurs cardiaques exposés à un champ magnétique [41, 42] et une étude clinique in vivo sur plusieurs marques de stimulateurs

cardiaques a été publié par le Dr Trigano et al [43] dans cette étude la source de perturbation est une bobine d'Helmholtz qui peut générer un champ magnétique homogène entre 0 et $100\mu\text{T}$, la fréquence étudiée est 50 Hz. Des études ont été publiées et portent sur l'exposition des stimulateurs cardiaques à un champ électrique [44], par un courant électrique d'une fréquence 60Hz [45]. Des autres études portent sur l'exposition des stimulateurs cardiaques aux deux champs électrique et magnétique [46] et champ électrique, champ magnétique et contact par un courant électrique [47] cette étude est une modélisation numérique: STACHL et KAVET proposent un modèle d'un être humain dérivé par IRM, ce modèle est un homme de taille moyenne et de 81 tissus avec des conductivités électriques différentes. Cette modélisation comporte trois expositions: le modèle portant le stimulateur cardiaque est exposé à un champ électrique de 1 kV/m de fréquence 60Hz. Ensuite le modèle portant le stimulateur cardiaque est exposé à un champ magnétique de 0.1 mT toujours à la même fréquence 60Hz. Dans la troisième étude, le modèle est en contact avec un courant électrique de 0.1 mA.

On peut citer d'autres travaux qui ont été publiés sur le réseau de distribution électrique Butrous et al [48], Kaye et al [49], Souques et al [50].

1.7. La compatibilité électromagnétique (CEM)

La CEM est une science relativement récente en tant que telle. Elle représente une technique qui permet de rendre compatibles deux appareils fonctionnant ensemble dans un milieu donné. 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 ».

1.7.1 Aspects fondamentaux de la CEM

Lors de l'analyse d'un problème de perturbation électromagnétique, on constate que le problème englobe trois éléments : une source de perturbation qui émet de l'énergie électromagnétique, un canal de couplage au travers duquel l'énergie de ces perturbations se propage et enfin un récepteur qui capte cette énergie, la traite et la superpose à sa fonction

normale. Si les perturbations reçues par ce dernier sont trop élevées et provoquent des interférences, alors on parle de victime de ces perturbations.

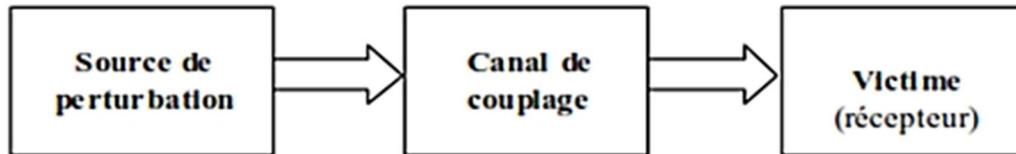


Fig1.5 : Transmission des perturbations

1.7.2 Les modes de couplage

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.

La figure 1.6 résume les principaux mécanismes de couplage. L'interprétation de ces trois modes de couplage est étroitement liée au comportement général des sources de rayonnement électromagnétique.

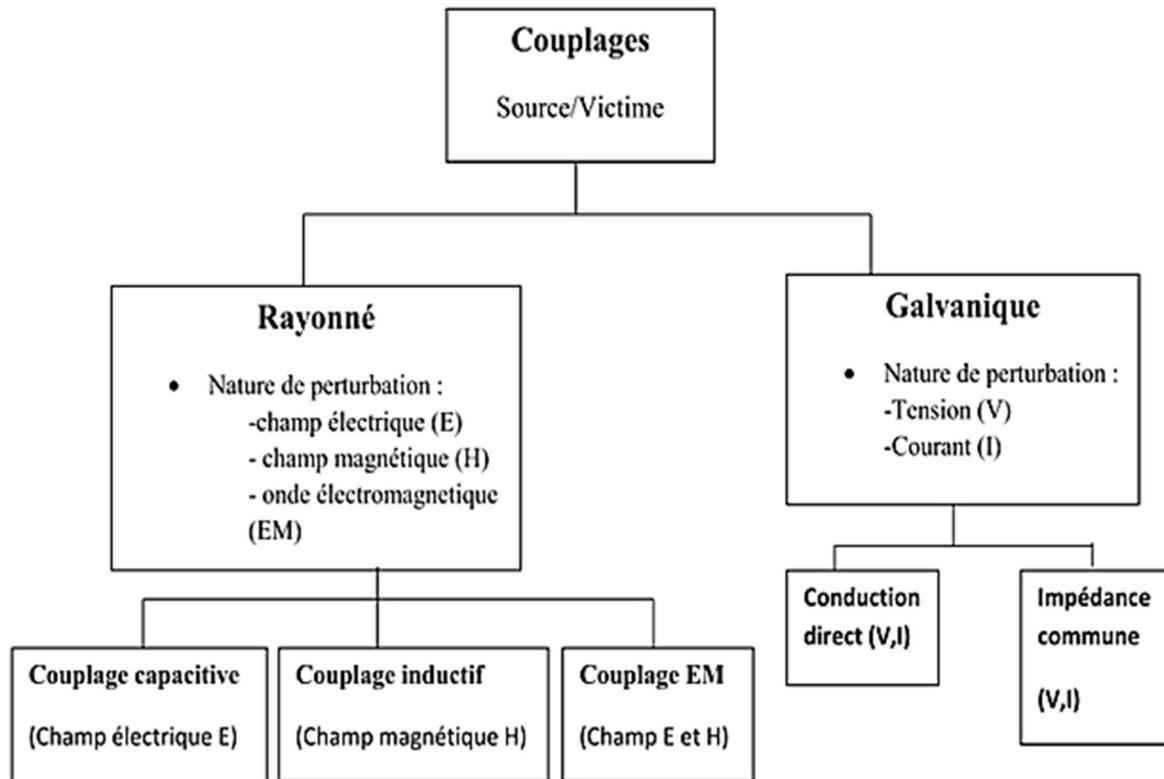


Fig1.6 : Classification des modes de couplages

1.8. Contexte normatif

Sur la base du principe de précaution, plusieurs organisations mondiales ont établi des normes visant à limiter l'exposition humaine aux champs électromagnétiques basses fréquences.

Parmi ces organisations, on peut citer, la commission internationale de radioprotection sur les rayonnements non ionisants (ICNIRP) et IEEE [51]. Les normes de l'ICNIRP et d'IEEE ont largement implémenté dans plusieurs pays. À la fréquence de 50 Hz, les standards ICNIRP, sont les plus soutenus.

1.8.1. Les recommandations ICNIRP du 1998

Les normes d'ICNIRP [6] sont basées sur les effets à court terme faisant l'objet d'un consensus scientifique. En basse fréquence, la grandeur considérée comme référence est la densité de courant J . À la fréquence industrielle (50Hz), la valeur de J induite dans le corps

humain ne doit pas dépasser 10 mA/m² pour les professionnels, et 2 mA/m² pour le grand public.

Les tableaux 1.4 et 1.5 résument les niveaux de référence pour l'exposition du grand public et l'exposition professionnelle, respectivement. Les niveaux de référence sont destinés à être des valeurs moyennes spatiales sur tout le corps de la personne exposée, mais à la condition importante que les restrictions de base relatives à l'exposition localisée ne sont pas dépassées.

Les modèles de champ magnétique basse fréquence supposent que le corps humain a une conductivité homogène et isotrope, ainsi on le représente par un disque homogène, exposé à un champ uniforme et perpendiculaire ; pour un champ purement sinusoïdal à la fréquence f dérivées de la loi de Faraday de l'induction, la densité de courant J est donnée par [52]:

$$J = \pi R f \sigma B$$

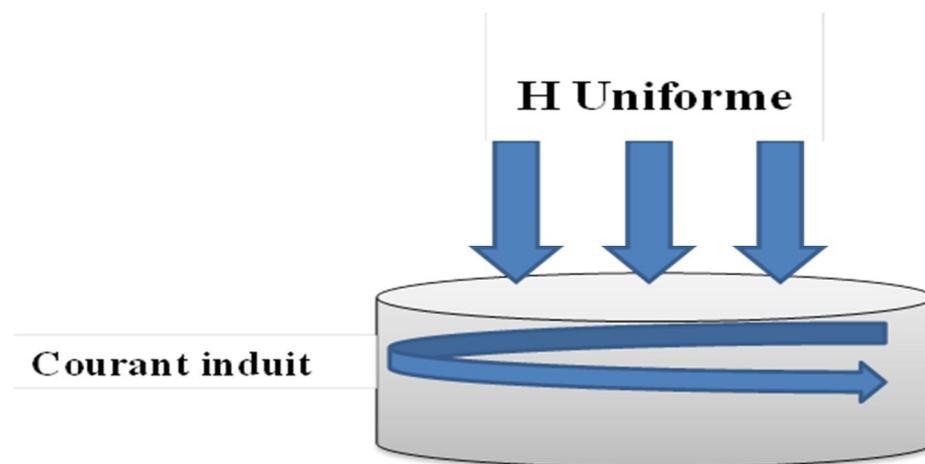


Fig1.7:ICNIRP (1998), modélisation simplifiée : le corps humain (le disque) est soumis à un champ magnétique uniforme et perpendiculaire.

A titre indicatif, à la fréquence industrielle (50 Hz) le niveau de référence pour l'induction magnétique est de 500 μ T dans le cadre professionnel, et 100 μ T pour le grand public.

Les modèles de champs électriques doivent tenir en compte du fait que selon les conditions d'exposition et de la taille, la forme et la position du corps exposé dans le domaine, la densité de charge de surface peut varier considérablement, ce qui entraîne une répartition des courants variables et non uniforme à l'intérieur du corps.

Tab1.4 : Les niveaux de référence pour l'exposition du grand public aux champs électriques et magnétiques variables dans le temps, ICNIRP 1998 [6]

Domaine de fréquences	Intensité de champ-E (V m ⁻¹)	Intensité de champ-H (A m ⁻¹)	Intensité de flux magnétique-B (μT)
Jusqu'à 1Hz	—	1.63×10^5	2×10^5
1–8 Hz	20,000	$1.63 \times 10^5/f^2$	$2 \times 10^5/f$
8–25 Hz	20,000	$2 \times 10^4/f$	$2.5 \times 10^4/f$
0.025-0.82 kHz	$500/f$	$20/f$	$25/f$
0.82-65 kHz	610	24.4	30.7
0065-1 MHz	610	$1.6/f$	$2.0/f$
1-10 MHz	$610/f$	$1.6/f$	$2.0/f$

Dans la gamme de fréquences jusqu'à 1 kHz, les niveaux de références du champ électrique, pour le grand public sont la moitié des valeurs fixées pour l'exposition des professionnelles. La valeur 10 kV.m⁻¹ pour 50 Hz ou 8,3kV.m⁻¹ pour 60 Hz concernant l'exposition des travailleurs, comprend une marge de sécurité suffisante pour éviter les effets de stimulation des courants de contact dans toutes les conditions possibles. La moitié de cette valeur a été choisie pour les niveaux de référence du grand public, 5 kV.m⁻¹ pour 50 Hz et 4.2 kV.m⁻¹ pour 60 Hz, pour prévenir les effets nocifs indirects pour plus de 90% des personnes exposées.

Tab1.5 : Les niveaux de référence pour l'exposition professionnelle aux champs électriques et magnétiques variables dans le temps, ICNIRP 1998 [6]

Domaine de fréquences	Intensité de champ-E ($V m^{-1}$)	Intensité de champ-H ($A m^{-1}$)	Intensité de flux magnétique-B (μT)
Jusqu'à 1Hz	—	3.2×10^4	4×10^4
1–8 Hz	10,000	$3.2 \times 10^4/f^2$	$4 \times 10^4/f^2$
8–25 Hz	10,000	$4,000/f$	$5,000/f$
0.025-0.82 kHz	$250/f$	$4/f$	$5/f$
0.8-3 kHz	$250/f$	5	6.25
3-150 kHz	87	5	6.25
0.15-1MHz	87	$0.73/f$	$0.92/f$
1–10 MHz	$87/f^{1/2}$	$0.73/f$	$0.92/f$

1.8.2. Les recommandations ICNIRP du 2010

En 2010, ICNIRP a publié des nouvelles normes, qui remplacent la partie basse fréquence des directives de 1998 [53]. Les niveaux de référence supposent une exposition par un champ uniforme (homogène) par rapport à l'extension spatiale du corps humain.

Les tableaux 1.6 et 1.7 résument les niveaux de référence pour l'exposition des professionnelles et du grand public, respectivement.

Tab1.6 : Les niveaux de référence pour l'exposition professionnelle aux champs électriques et magnétiques variables dans le temps, ICNIRP 2010 [53]

Domaines de fréquences	Intensité de champ- E (V m ⁻¹)	Intensité de champ- H (A m ⁻¹)	Densité de flux magnétique-B (T)
1 Hz-8 Hz	20	$1.63 \times 10^5/f^2$	$0.2/f^2$
8 Hz-25 Hz	20	$2 \times 10^4/f$	$2.5 \times 10^{-2}/f$
25 Hz-300 Hz	$5 \times 10^2/f$	8×10^2	1×10^{-3}
300 Hz – 3 kHz	$5 \times 10^2/f$	$2.4 \times 10^5/f$	$0.3/f$
3 kHz-10 MHz	1.7×10^{-7}	80	1×10^{-4}

Tab1.7 : Les niveaux de référence pour l'exposition du grand public aux champs électriques et magnétiques variables dans le temps, ICNIRP 2010 [53]

Domaines de fréquences	Intensité de champ- E (V m ⁻¹)	Intensité de champ- H (A m ⁻¹)	Densité de flux magnétique-B (T)
1 Hz-8 Hz	5	$3.2 \times 10^4/f^2$	$4 \times 10^{-2}/f^2$
8 Hz-25 Hz	5	$4 \times 10^3/f$	$5 \times 10^{-3}/f$
25 Hz-50 Hz	5	1.6×10^2	2×10^{-4}
50 Hz – 400 Hz	$2.5 \times 10^2/f$	$1.6 \times 10^5/f$	2×10^{-4}
400 Hz – 3 kHz	$2.5 \times 10^2/f$	$6.4 \times 10^4/f$	$8 \times 10^{-2}/f$
3 kHz-10 MHz	8.3×10^{-2}	21	2.7×10^{-5}

1.9. Normes sur les implants

A ce jour, il n'existe pas de normes spécifiques pour la mesure des champs électromagnétiques basses fréquences, en particulier sur le risque d'exposition des implants médicaux aux champs électromagnétiques. Plusieurs normes préliminaires cherchent de définir les seuils d'interférence électromagnétique (EMI) des implants médicaux: EN 45502-1 :1997[54], EN 45502-2-1 :2003 [55], EN 45502-2-2 :1998 [56], ISO 14708-1 :2000 [57], EN50061:1988 [58] et ANSI/AAMI PC69: 2000 [59]. D'autres standards préliminaires aussi sont disponibles, mais ces standards ne couvrent pas une gamme de 46 problématiques générales des interactions entre les champs électromagnétiques et les stimulateurs cardiaques

de fréquence spécifique. Plusieurs standards sont en cours de révision (ANSI/AAMIPC69 : 2000, ISO 14708-1 : 2000, EN45502-2-2 : 1998). Le standard préliminaire EN45502-2-1 : 2003 spécifie des tests pour la protection des stimulateurs cardiaques contre les radiations électromagnétiques non ionisantes. Par exemple dans la gamme de fréquences de 16.6 Hz-167 KHz, le préliminaire EN45502-2-1 : 2003 est spécifié pour des signaux expérimentaux atteignant 1 Vpp au maximum, pour une source électromagnétique qui donne un champ magnétique entre 760 A/m et 18800 A/m pour la bande de fréquence entre 0.3 KHz et 7.4KHz, la tension induite EMI par une boucle de surface 225 cm² est 1V.

1.10 Conclusion

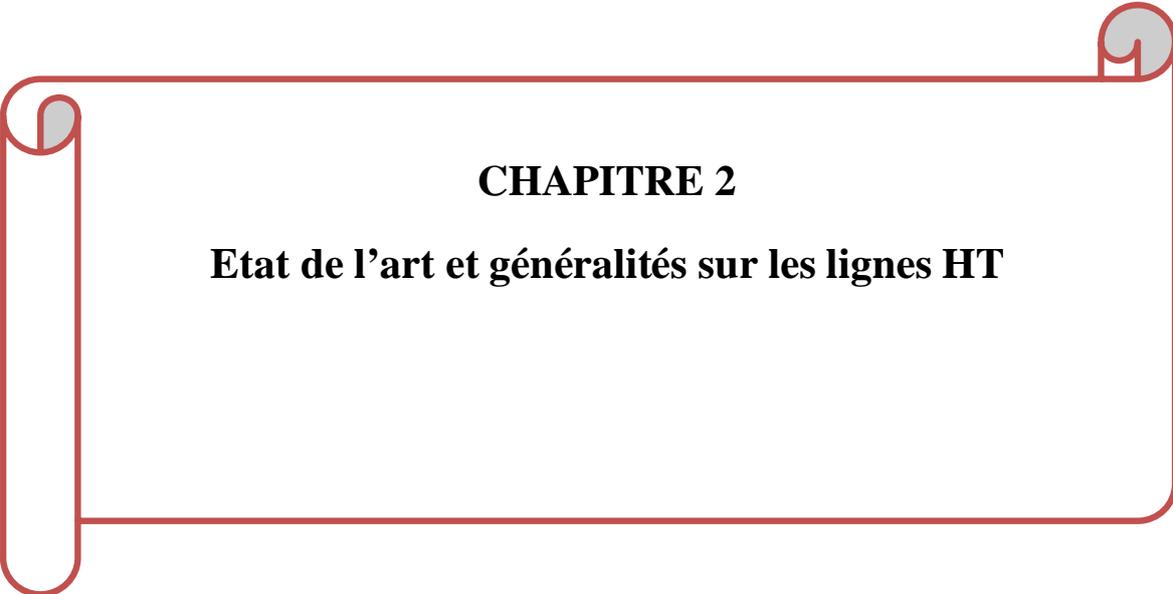
L'utilisation de l'énergie électrique est croissante dans plusieurs domaines (domestique, industriel et médical) sous différentes formes (sinusoïdale, modulé, pulsé...Etc.) et dans une large gamme de fréquences dans notre vie où nous sommes exposés à plusieurs sources. Une inquiétude du public sur les éventuels risques liés aux rayonnements électromagnétiques. Plusieurs organismes ont essayé de déterminer les seuils d'avoir un risque pas seulement sur les vivants, mais aussi sur les implants médicaux soumis à ces sources de rayonnements et d'établir des normes internationales. En dépit de nombreuses études menées depuis plus de 40 ans, les résultats demeurent controversés, en particulier sur d'éventuels effets cancérigènes des ondes électromagnétiques basses fréquences.

En plusieurs pays développés, des normes qui définissent les valeurs limites pour le champ magnétique et le champ électrique (valeurs de référence) et pour les courants induits dans le corps humain (restrictions de base) ont été appliquées. Ces normes sont divisées en deux types :

Normes pour les professionnels et normes pour le grand public.

Avec le développement des réseaux électriques, et comme ils sont considérés comme une source importante de la pollution électromagnétique basse fréquence, il est essentiel de déterminer la répartition du champ rayonné par les lignes haute tension, afin d'éviter ou atténuer certains effets gênants ou dangereux sur l'agglomération.

Une étude bibliographie intense concernant ce problème sera présentée dans le second chapitre.



CHAPITRE 2

Etat de l'art et généralités sur les lignes HT

2.1. Introduction

Les influences du champ électromagnétique des lignes électriques aériennes sur l'environnement sont bien connues et analysés dans plusieurs travaux de recherche, les méthodes comportent, en principal, de calcul analytique et expérimental, ainsi que de calcul numérique. Un intérêt particulier présente les effets négatifs sur la santé humaine.

Dans la première partie de ce chapitre, nous présentons la bibliographie existant dans le domaine de quantification des champs électromagnétiques à proximité des réseaux de transport, dans les milieux urbains (exposition des grands publics), aussi bien que dans les milieux professionnels (exposition des travailleurs).

Dans la deuxième partie, nous rappelons les caractéristiques des lignes HT et THT, ainsi que les niveaux de tension et les types de pylônes utilisés par la société algérienne de l'électricité et de gaz (SONELGAZ).

2.2. Etat de l'art

2.2.1 Champs générées par les lignes HT (exposition du grand public)

Dans la littérature, plusieurs méthodes ont été proposées pour quantifier les champs électromagnétiques basse fréquence au voisinage des lignes hautes tension. Concernant les méthodes analytiques et numériques on peut citer :

Pour le calcul des champs électriques et magnétiques à proximité du sol, la méthode d'image complexe est largement utilisée [60], [61]. Dans les simulations tridimensionnelles, plusieurs méthodes sont largement utilisées à savoir : la méthode du procédé de simulation de charge [62], [63], des différences finies [64], des éléments finis [65], [66] ainsi que la méthode des éléments frontières [67], [68].

Un autre moyen expérimental de quantification des champs électriques et magnétiques à proximité de lignes électriques, autres que la mesure des niveaux du champ sur place, est d'utiliser des modèles réduits. Spécifiquement, un modèle à l'échelle de ligne de transmission à haute tension a été utilisé par Estacio et al [69] comme un outil de conception pour déterminer à la fois la distribution du champ électrique et magnétique autour de la ligne. En utilisant un modèle réduit, les auteurs ont étudié les changements de l'arrangement des phases ainsi que les variations de courant, et ils ont évalué les différentes techniques d'atténuation disponibles pour réduire les niveaux du champ électrique et magnétique. Les résultats de mesures trouvées dans les deux cas sont en bonne concordance.

Tupsie et al. [70] ont présenté un modèle mathématique pour calculer les champs électromagnétiques au voisinage des lignes de transmission. Un modèle mathématique des champs électriques et magnétiques rayonnant autour d'une ligne de transmission comprend la solution d'une équation aux dérivées partielles du second ordre, où le champ électrique est généralement exprimé sous la forme de l'équation de Helmholtz dérivé de la loi de Faraday, et le champ magnétique dans la forme de l'équation de Helmholtz dérivée de la loi d'Ampère.

Ahmed et al. [71] étendent le concept de potentiel vecteur magnétique pour une ligne de transmission à deux fils de longueur infinie dans le but est de déterminer la distribution du champ magnétique d'une ligne haute tension multi-phase comprenant plusieurs conducteurs. La méthode proposée est ensuite testée intensivement sur un certain nombre de lignes triphasées (simple et double circuit) opérant aux différents niveaux de tension.

Enfin, des données disponibles des champs mesurés sont comparées avec les résultats obtenus à partir de leur méthode et cela afin d'établir sa validité. Cette approche nécessite la connaissance des courants de ligne et l'écartement de conducteur. L'approche développée par ces chercheurs a été appliquée sur plusieurs modèles des lignes THT. Comme des résultats des champs magnétiques mesurés au voisinage d'une ligne de 765 kV étaient disponibles, ils ont été comparés avec ceux obtenue par cette méthode.

Après le succès dans le domaine du calcul des champs des lignes hautes tension, plusieurs chercheurs ont utilisé des techniques différentes pour produire une réduction des champs électriques et magnétiques générés par ces lignes. Rahman et al. [72] ont essayé de réduire l'impact de l'exposition à la haute intensité du champ magnétique des lignes hautes tension, en utilisant des applications logicielles industrielles basées sur les champs électromagnétiques. Le régime de réduction qu'ils utilisent comprend l'incrément de la hauteur et l'écartement de phase. Les résultats susmentionnés ont indiqué que les modifications des structures de pylônes sont viables pour réduire les radiations magnétiques en appliquant l'approche de modélisation et de simulation. Les données de simulation utilisées dans ses études ont été basées sur les spécifications des lignes de pylônes au niveau des sites, et la validité de tous ces résultats a été évaluée en comparant la modélisation numérique et les résultats de mesures réelles au niveau du site. Il a été constaté que les sociétés de services publics ont la possibilité de réduire encore davantage l'impact de rayonnement. En ayant de 20% de compaction de design sur les conceptions de pylônes, il y a une réduction de plus de 31,4% en utilisant des techniques de compactage plutôt que les méthodes d'arrangement de phase au droit de passage (ROW). Dans le cas où les services

publics ont besoin de petites modifications, l'augmentation de la hauteur de la phase inférieure recommandée peut être utilisée avec plus de 26,9% de réductions en utilisant des techniques de compactage que les méthodes d'arrangement de phase ROW.

La méthode de simulation de charge est utilisée par Metwally [73] pour effectuer une modélisation électrostatique analytique de l'ordre des hautes phases des lignes de transmission. La conversion des lignes à haute et à très haute tension à double circuit existantes à des lignes hétérophasées et l'utilisation d'une nouvelle configuration circulaire est introduite. Une nouvelle technique est également présentée pour diminuer considérablement le champ électrique au niveau du sol avec une augmentation négligeable du gradient de surface conductrice et le courant de charge des phases inférieures. La technique utilise un très petit nombre de fils de terre supplémentaire ajoutés sous chaque circuit. La possibilité d'augmenter les capacités de gestion de puissance sans augmenter les effets environnementaux est étudiée. Les résultats montrent que les lignes à plus grands ordres de phases (HPOTL) donnent un coût prometteur des moyens efficaces pour augmenter la capacité de gestion de puissance des lignes de transport à double circuit existantes par 73% via l'augmentation de la tension de fonctionnement, ou pour le compact HPOTL par l'intermédiaire de l'utilisation de six ou plusieurs phases.

Dans le cas des études expérimentales on peut citer : Srinivasa et al. [74] ont également effectué des mesures expérimentales sur des lignes et des postes 220 kV et 400kV, les profils latéraux des champs électriques et magnétiques ont aussi été mesurés et analysés. Bakhashwain et al. [75] ont utilisé un EMDEX II qui est un instrument programmable d'acquisition de données pour mesurer les trois composantes vectorielles orthogonales du champ magnétique à travers ces capteurs internes. Le courant alternatif de la densité de flux magnétique a été déterminé par la mesure des courants induits dans les trois bobines de capteur montées de façon orthogonale le long des axes x, y, et z. Toutes les mesures ont été prises dans une zone considérée comme plate à une hauteur de 1 m au-dessus du sol.

Qabazard [76] a procédé à des mesures de valeurs de champs électriques et magnétiques au Koweït, qui sont ensuite comparées avec les recommandations de l'ICNIRP. Les mesures ont été effectuées en utilisant l'analyseur de champ EPT 300. Dans son exposé, le champ magnétique généré par une ligne de 275 kV est expérimentalement mesuré, il est aussi simulé numériquement en utilisant le logiciel FDM 3 points. La comparaison des résultats a montré qu'il y avait une très bonne concordance entre les mesures et la simulation effectuée avec ce logiciel.

Charalambos P.Nicolaou et al [77] ont effectué des mesures des champs électriques et magnétiques à différentes hauteurs du corps humain. Le plus important de ce travail est qu'ils ont développé un modèle capable de prédire le champ magnétique généré par les lignes aérienne, et même par les câbles souterrains. Ceci est réalisé en établissant une corrélation linéaire entre le courant de charge de l'un des deux circuits triphasés et le champ magnétique, dans une tentative de prédire les champs magnétiques produits dans les lignes à haute tension en utilisant le système SCADA à des périodes surchargées.

2.2.2 Champs générés par des postes HT (exposition des professionnels)

L'énergie électrique est transportée et distribuée par l'intermédiaire des réseaux de transport et de distribution. La transition d'électricité de la transmission à la distribution est accomplie via les sous-stations. De nombreux chercheurs ont procédé à des mesures expérimentales et numériques, au sein des postes HT aériens, dans un essai de vérifier si les valeurs de champs magnétiques sont inférieures aux normes établies par ICNIRP [78].

Selon Farag et Habiballah [79–84], les principales sources de champs magnétiques à l'intérieur des postes aériens sont premièrement les jeux de barres haute tension, les lignes des équipements (comme la ligne côté secondaire des transformateurs abaisseurs) et les segments de barres omnibus dans les racks qui sont forcés à porter de hauts courants. Deuxièmement, les transformateurs, les structures métalliques dans la sous-station et les bancs de condensateurs.

La seule façon d'être sûr de l'exposition aux champs électriques et magnétiques générés dans les postes HT aériens est de calculer, mesurer ou prédire les valeurs des champs électriques et magnétiques en utilisant des techniques théoriques ou expérimentales.

Munteanu et al. [85] ont utilisé une formule analytique pour calculer la distribution tridimensionnelle du champ électrique, dans la zone des lignes 400kV à l'entrée d'un poste. Les valeurs des champs obtenus numériquement ont été comparées avec celle mesurée expérimentalement, se sont révélés être en bon accord.

Nikolovski et al. [86] ont effectué des simulations numériques tridimensionnelles en utilisant le logiciel CDEGS [87] dans une station 400/110 kV dans le but est de calculer le champ électrique et magnétique à une hauteur de 2 m au-dessus du sol. Il a été constaté que les intensités des champs électriques dans plusieurs endroits de la sous-station, étaient supérieures aux valeurs admissibles, en particulier sous les lignes 400 kV, les jeux de barres et autour des transformateurs de puissance. Pour le champ magnétique, les valeurs qui dépassent

les limites établies ont été trouvées dans une petite zone sous les jeux de barres 400 et 110kV qui reliaient les transformateurs de puissance.

Kovac et al. [88] ont proposé une technique basée sur l'approximation multi-quadratique pour calculer la valeur maximale de champ magnétique basse fréquence produit dans les postes électriques. Leur approximation a été basée sur la loi de Biot-Savart pour obtenir des valeurs de champ discrètes ; chaque conducteur étant divisé en un nombre correspondant de segments rectilignes pour être capable de gérer les fonctions multi-extrêmes et multidimensionnelles par l'interpolation des valeurs discrètes avec précision. Par la suite, les valeurs maximales des champs magnétiques ont été calculées en minimisant l'approximation multi-quadratique négative via une méthode d'optimisation stochastique (évolution différentielle).

Said et al. [89] ont étudié numériquement les champs magnétiques dans une sous-station de 132 kV en Malaisie, en prenant en considération dans leurs simulations les transformateurs, les barres omnibus, les lignes de transmission entrantes et sortantes et les câbles. Un modèle de logiciel de simulation pour la sous-station a été construit et les dimensions réelles de la sous-station ont été prises en compte. Des études de simulation ont été réalisées pour divers changements dans les paramètres des sous-stations, telles que l'espacement entre les conducteurs et la hauteur des jeux de barre ; les champs magnétiques résultants étaient comparés à ceux déjà existants. Pour leurs simulations, les courants de ligne étaient nécessaires et ont été enregistrés à partir du mégawattmètre dans la salle de contrôle. Les champs magnétiques simulés ont été trouvés pour fournir une bonne ressemblance avec ceux mesurés expérimentalement et le modèle a été utilisé pour diminuer les champs magnétiques en réorganisant les positions des sources.

Yan et al. [90] ont accompli des mesures en pleine échelle et sur des modèles réduits des sous-stations de 330 et 500 kV, les résultats de mesures de champs électriques sont analysés statistiquement. Ils ont montré que la précision des mesures à l'échelle du modèle réduit est satisfaisante à des fins de conception technique, et donc ils sont utilisés conjointement avec des calculs analytiques des effets du champ électrique afin de prédire le champ électrique généré dans les postes HT en phase de conception.

Kosalay [91] a tenté d'estimer le champ magnétique basse fréquence dans un poste HT en utilisant un modèle de logique floue basé sur des définitions géométriques, afin d'estimer la distribution de champ magnétique. A cet effet, un logiciel avec une unité de criblage tridimensionnel basé sur la technique de la logique floue, a été développé.

Stojkov et al. [92] ont calculé le champ électrique et magnétique dans un poste de transformation 35/10 kV en Croatie, en utilisant le logiciel CDEGS [87]. Un modèle de simulation réaliste du transformateur est développé sur la base de considérations théoriques des champs électriques et magnétiques. Les calculs des champs sont effectués à une hauteur de 1,5 m au-dessus de sol et sont jugés conformes aux directives de sécurité internationale. Enfin, les résultats simulés donnent des distributions spatiales symétriques pour les deux champs électriques et magnétiques, avec les valeurs maximales sont observées au niveau des points où les conducteurs se chevauchent.

Suite à des méthodes numériques, beaucoup de gens ont utilisé des techniques expérimentales pour mesurer et surveiller les champs électriques et magnétiques qui existent dans les postes HT et THT ouverts.

Spécifiquement, Helhel et Ozen [93] ont étudié l'exposition des professionnelles en trois sous-stations 154 / 31,5 kV situé dans la ville d'Antalya (Turquie), la valeur maximale de champ magnétique au voisinage des appareils de commutation, sous des conditions de charge minimale, est de 23 μT , et atteint la valeur de 70 μT . Les mesures de champ magnétique extérieur dans les régions des disjoncteurs sont de l'ordre de 60 μT à la hauteur de l'opérateur.

Farag et al. [94] ont effectué des mesures de champ magnétique dans un poste de commutation 132 kV. La valeur maximale de champ magnétique enregistrée était 530 mG dans les zones environnantes de transformateurs (132/66 kV), cette valeur est 10 fois inférieure aux directives de sécurité de l'ICNIRP pour l'exposition des professionnelles.

Safigianni et Tsompanidou [95] ont évalué la pollution électrique et magnétique à l'extérieur de deux sous-stations (50 MVA, 150/20kV), à Xanthi, Grèce. Il a été constaté que, dans deux positions, à proximité des batteries de condensateurs, les directives de l'ICNIRP ont été dépassées. Dans un autre travail mené par Safigianni et Kostopoulou [96], les champs électriques et magnétiques à l'intérieur d'une sous-station 132/11,5 kV à Chypre ont été mesurés à l'aide de l'analyseur du champ EFA-300, et les valeurs indicatives des champs mesurés dans les différentes salles du poste sont fournies, et ils sont inférieurs aux normes de sécurité établies par ICNIRP concernant l'exposition des travailleurs et des grands publics à la fois.

Proios et al. [97] ont effectué des mesures à proximité d'un poste de type compact kiosque 630 kVA, 20/0.4 kV, durant l'été. La valeur maximale du champ magnétique 80 μT a été enregistrée dans le côté basse tension (0,4 kV), à une distance horizontale de 0,5 m et une hauteur de 1 m au-dessus de sol. Ils ont aussi observé que dans le périmètre de l'enceinte

métallique, et spécifiquement à une distance de 1 m et 1,5 m, le champ magnétique diminue rapidement en comparaison avec celui mesuré à la distance de 0,5 m.

Une enquête destinée à mesurer les champs magnétiques, dans la principale sous-station (380/154 kV) d'Antalya (Turquie), a été réalisée par Ozen [98]. Les valeurs maximales des champs magnétiques mesurés à l'intérieur du poste, sous des conditions normales de la charge, étaient de 20 μT en plein air et de 65 μT dans la salle de contrôle. Le champ magnétique obtenu en plein air de la sous-station variait entre 3,03 et 20 μT , tandis que le champ magnétique dans la salle de contrôle était de 1.3 à 60 μT , qui étaient tous inférieures aux normes de l'ICNIRP. Les champs magnétiques au secondaire du transformateur se sont révélés plus élevés que ceux du primaire, comme prévu, et se retrouvent également dépendre de la demande de la charge.

Pretorius et Hubbard [99] ont étudié les champs électriques dans un poste de 765 kV en Afrique du Sud. La valeur maximale de l'intensité de champ électriques obtenue sous les jeux de barre de 12 m de hauteur est de l'ordre de 21,9 kV m^{-1} , cette valeur dépasse énormément la limite fournie par ICNIRP (10 kV m^{-1}).

Hamza et al. [100] ont trouvé que le champ magnétique maximum global mesuré à l'intérieur du poste 220/66 kV dans des conditions normales de charge était d'environ 23 μT , cette valeur été trouvée sous les jeux de barres 66 kV. Ils ont également constaté que les profils du champ magnétique sous les jeux de barres du poste montrent des valeurs de pointe dans les endroits où les départs sont connectés.

Ellithy et al. [101] ont étudié expérimentalement les champs magnétiques générés à l'extérieur d'un poste haute tension (132/66 kV) situé dans une zone résidentielle de la ville de Doha. Les mesures ont été menées pendant les conditions de fonctionnement à charge nominale de l'été (2009), dans le but était d'évaluer l'exposition au champ dans le pire du cas. Les résultats comprenaient les régions où les intensités du champ sont plus élevées (à l'intérieur et autour du poste, ainsi dans la salle de contrôle). Les résultats ont montré que les valeurs du champ magnétique à l'intérieur du poste, autour de la clôture du poste et autour du périmètre de la salle de contrôle étaient en dessous des recommandations de l'ICNIRP ; mais à l'intérieur du poste, il y avait des zones où les valeurs ont dépassé les limites de sécurité pour l'exposition du public.

Dans un autre travail mené par Said et al. [102], les mesures de champ magnétique en quatre postes de distribution en Malaisie, ont été effectuées, dont deux étaient situés dans une zone résidentielle, tandis que les deux autres dans un immeuble. Il a été constaté que

l'exposition du public aux champs magnétiques dans une sous-station située dans un bâtiment est plus importante que celle dans les postes de la zone résidentielle.

Beaucoup de gens ont utilisé des techniques expérimentales et numériques pour mesurer et surveiller les champs électriques et magnétiques qui existent dans les sous-stations aériennes.

Dans un autre travail effectué par Habiballah et al. [103], ils ont étudié les champs magnétiques d'un poste 230 kV en Arabie Saoudite en utilisant les résultats numériques et expérimentaux pour les transformateurs, les disjoncteurs et les jeux de barres. Les mesures expérimentales ont été réalisées par le mesureur FIELD STARTM 1000 mètres, développé par EPRI et fabriqué par Dexsil Corporation, tandis que pour la simulation numérique, le programme de modélisation du champ magnétique SUBCALC développé par la division de l'environnement EPRI fonctionnant sous Microsoft Windows a été utilisé [104]. Une concordance étroite a été observée entre les résultats expérimentaux et numériques, avec les valeurs de champs magnétiques se trouvant en dessous des recommandations de l'ICNIRP.

Dans un autre travail réalisé par Munteanu et al. [105], ils ont étudié les champs électromagnétiques engendrés dans une sous-station 400 kV appartenant à la compagnie de réseaux électriques roumaine (Transelectrica SA). Dans leur travail, Munteanu et al., ont utilisé un module de calcul semi-analytique pour calculer le champ électrique à l'intérieur du poste et les résultats sont comparés avec les mesures expérimentales. En outre, différents scénarios sur la façon de réduire les valeurs du champ à l'intérieur du poste sont proposés.

Charalambos P. Nicolaou et al [106], ont proposé une méthode numérique basée sur la méthode des éléments finis appliquée sur les équations dynamiques de Maxwell, afin de calculer le champ magnétique généré. L'approche suggérée est dans un premier temps validée avec une comparaison directe aux résultats expérimentaux obtenue dans le poste 66/11kV de Latsia à Chypre. Par la suite, la méthode numérique validée a été utilisée pour prédire les valeurs de champ magnétique dans le cas où les courants sont nominaux (lorsque le poste fonctionne à 75% et 100 % de son puissance nominal), et les champs résultants sont comparés avec les limites publiées par ICNIRP. Ils ont trouvé que les valeurs mesurées et prédites sont inférieures à la recommandation de l'ICNIRP.

Dans une autre étude effectuée par ces chercheurs [107], une enquête de mesure extensive destiné à analyser les valeurs de champ électrique et magnétique dans 7 postes haute tension (132/11kV), à Chypre, dans l'objectif et toujours de comparer les résultats avec les recommandations de l'ICNIRP. Les intensités maximales de champs électrique et magnétique obtenu au voisinage de dispositif haute tension en pleine air des sous-stations sont

de l'ordre de 7696 V m^{-1} et 7306.5 V m^{-1} pour le champ électrique et $45.89 \mu\text{T}$, $38.11 \mu\text{T}$, $35.30 \mu\text{T}$ pour le champ magnétique. Dans une salle de bobines, la densité de flux magnétique est révélée être 6,26 fois au-dessus des consignes de sécurité, constituant un danger immédiat pour les travailleurs. En outre, une méthodologie théorique simpliste basée sur les mesures expérimentales est proposée, qui établit une corrélation linéaire entre le courant du transformateur et la densité maximale du champ magnétique basée sur la loi de Biot-Savart, à condition que la distance par rapport à la source reste constante pour prédire la densité de flux magnétique par extrapolation aux courants admissibles et nominaux et de les comparer avec les normes ICNIRP.

2.3. Les lignes hautes tension [108]

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

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

- Le conducteur,
- L'isolateur (sous forme de guirlande),
- Fil de garde (protection contre la foudre),
- Les pylônes et leur fondation,
- Autres éléments comme poteaux intermédiaires, moyens de fixation et de suspension, installation de protection contre la foudre...

Le fonctionnement de la ligne est conditionné par des interactions électromagnétiques diverses, qui se trouvent à l'origine de tous les changements de son comportement et de ses paramètres. De ce fait, l'impact de ces interactions détermine, de manière fondamentale, aussi bien les caractéristiques du régime que ceux de construction. La détermination des paramètres de construction doit obéir à des considérations non seulement d'ordre technique et économique, mais aussi à des considérations de sécurité préventive ; ayant trait à l'être

humain et à l'environnement en général. Le niveau nominal de la tension utilisée est un facteur important dans le choix du dimensionnement de la ligne.

Les paramètres essentiels de dimensionnement sont (Fig2.1);

- La hauteur H du pylône,
- Les distances D et d entre l'axe du pylône et le conducteur et entre conducteurs,
- La longueur de la guirlande d'isolation,
- La portée p entre l'axe du pylône et celui de la guirlande d'isolation,
- La hauteur h entre le point le plus bas du conducteur et la terre,
- Distances L et l entre pylônes et entre poteaux intermédiaires,
- La flèche de flexion du conducteur

Les effets interactifs électrodynamiques et électrostatiques, engendrés par la propagation du champ électromagnétique le long de la ligne font que ces grandeurs sont normalisées en fonction du niveau de tension, Tab 2.1 à titre d'exemple. Les grandeurs telles que portées entre pylônes et poteaux intermédiaires, gabarits, consoles de suspension sont déterminées à partir du traitement des questions relatives à la construction et la résistance mécaniques des lignes.

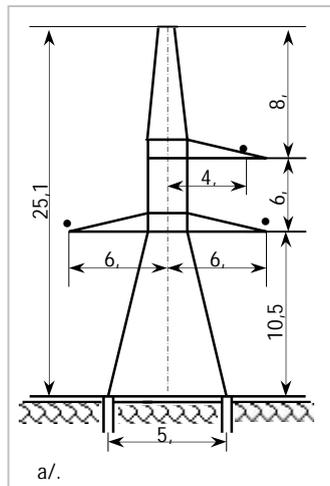
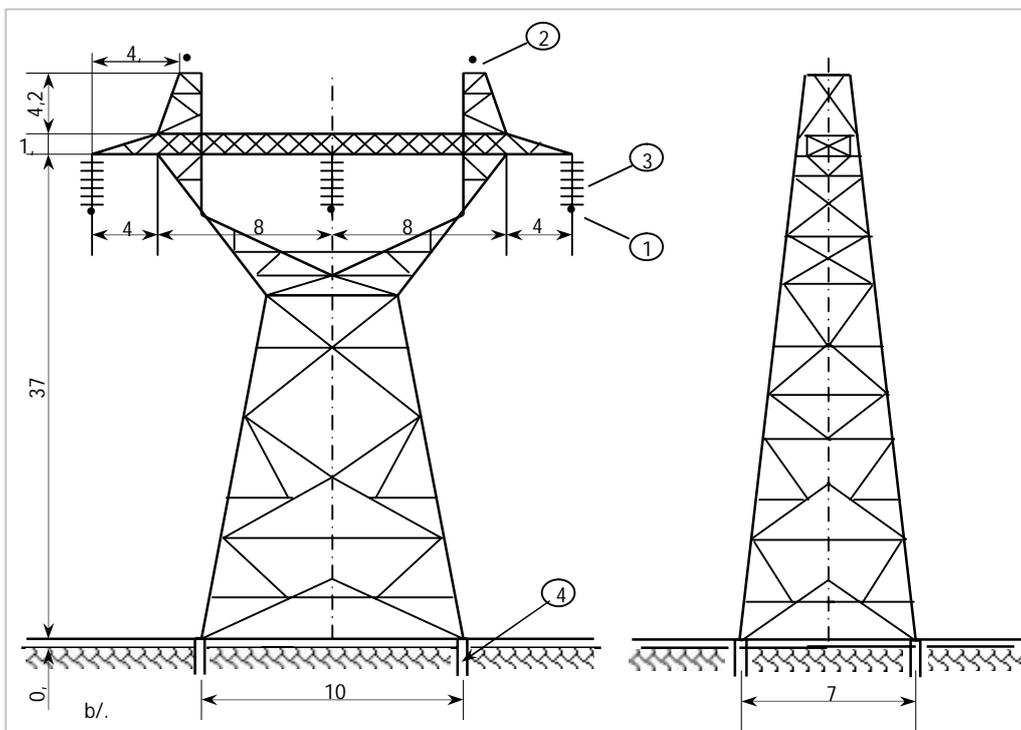


Fig2.1: Modèles de pylône de dimensions (m) réelles ;

- a. – $U_N = 220$ kV, b. – $U_N = 500$ kV, 1. – Conducteur (phase),
2. – Fil de garde, 3. – Isolateur, 4. – Fondations (mise à la terre).



Les lignes aériennes, dont la somme des longueurs pour un réseau donné se compte par centaines et milliers de kilomètres, subissent des efforts énormes de forces diverses ; auxquelles elles doivent nécessairement résister. Les poids énormes, qui se comptent également par centaines et milliers de tonnes, suspendus et soutenus par les pylônes et les poteaux, posent un vrai problème pour l'analyse des comportements mécaniques des lignes. En effet, on distingue les efforts suivants :

- Le poids de la matière suspendue engendre le long du tracé de la ligne des effets de flexion, de flambage, de cisaillement, d'étirage, de fatigue,

- Le gèle et la neige ajoutent un poids supplémentaire et amplifient les effets sus cités,
- Les vibrations engendrées par la présence du vent soumettent les conducteurs à des effets de fatigue qui peuvent se cautionner par des ruptures.
- La variation de la température engendre des contraintes internes dont l'effet se répercute aussi bien sur les paramètres du régime que sur ceux de construction.

Ces aspects sont d'une importance capitale et leur prise en charge, pendant les projets, doit conduire à la fiabilité mécanique requise de fonctionnement de la ligne (du réseau).

La variation de la température, la composition de l'atmosphère ainsi que la pollution environnante (humidité, sel, agent chimique, électrochimique...) introduisent, pendant les études, d'autres contraintes quant au choix des conducteurs. Ainsi, à partir de ces considérations et pour une fiabilité requise, le conducteur à utiliser doit répondre aux quatre propriétés essentielles suivantes :

- Une bonne conductibilité électrique,
- Une grande résistance mécanique,
- Une grande résistance aux effets chimiques et électrochimiques,
- Une disponibilité suffisante de la matière première.

Le conducteur est un élément principal de la ligne. Il est destiné à canaliser le champ électromagnétique, donc l'énergie électrique, suivant un tracé déterminé. Il découle qu'une plus grande capacité de transmettre de l'énergie électrique nécessite une plus grande conductibilité. Cette propriété est d'autant plus importante que les distances de transport sont plus grandes. Conformément à ces exigences, les matériaux généralement utilisés pour la réalisation des conducteurs aériens sont ;

- L'aluminium et ses alliages,
- Le cuivre et ses alliages,
- L'acier.

Les questions relatives à la technologie de traitement et de fabrication des conducteurs sortent des limites de ce travail, mais on peut dire que les fils conducteurs sont obtenus par étirage à froid et doivent présenter une résistance mécanique suffisante.

a/. Aluminium. On sait que l'aluminium a une bonne conductibilité électrique, mais présente une faible résistance mécanique à la fatigue (voir Tab.1.2), ce qui le rend, particulièrement, non convenable dans le cas d'apparition des vibrations dues au vent.

b/. Cuivre. Il a une conductibilité et une résistance mécanique relativement meilleures ; il est moins fragile et observe une bonne résistance à la corrosion. Sa résistance mécanique reste, encore, insuffisante comparativement aux efforts actifs appliqués aux lignes aériennes. En plus, le cuivre est un matériau relativement plus rare ; ce qui rend son utilisation limitée.

c/. Acier. Il présente, en même temps, l'avantage capital d'être un matériau de grande résistance mécanique (60 à 70 kg/mm²) et l'inconvénient d'être un mauvais conducteur. Il est d'une disponibilité suffisante et moins cher par rapport aux autres matériaux. En raison de sa grande résistance mécanique, il trouve une large application dans la conception et la réalisation des conducteurs des lignes aériennes. En effet, il est utilisé en mélange avec l'aluminium ou le cuivre.

Pour former un conducteur, en même temps, de conductibilité élevée (assurée par la présence de l'un de ces derniers) et de grande résistance mécanique (de l'ordre de 120 kg/mm², assurée par l'acier).

Du point de vue construction, on distingue différents types de conducteurs :

- A un fils,
- A plusieurs fils (fibres),
- A fibres avec combinaison de deux matériaux,
- Tubulaires.

Les conducteurs à un fils sont généralement utilisés dans les réseaux de basse tension ($U \leq 1$ kV). Ceux à fibres présentent de grands avantages, tels que fiabilité, souplesse et flexibilité, d'où une meilleure interaction avec différentes perturbations mécaniques pendant l'exploitation des lignes. La combinaison de l'acier avec l'aluminium ou le cuivre permet d'atteindre les propriétés sus citées, exigées d'un conducteur pour une meilleure fiabilité dans le sens général. L'acier est installé justement dans la partie centrale du conducteur pour une raison déduite et dictée par les propriétés fondamentales du champ électromagnétique ; en fait, pour les réseaux à courant alternatif, la partie centrale du conducteur n'est pas vraiment

conductrice et le matériau y inséré, non chargé alors par la conductibilité, doit assurer la résistance mécanique requise.

2.4. Modèles de ligne haute tension utilisé par SONELGAZ

2.4.1. Niveaux de tension

La Société nationale de l'électricité et du gaz, est une compagnie chargée de la production, du transport et de la distribution de l'électricité et du gaz en Algérie.

Les niveaux des tensions utilisées pour le transport à haute tension sont présentés dans le tableau 2.1

Tab2.1 Niveaux des hautes tensions (SONELGAZ)

HT, U_n	60 kV	90 kV	220 kV	400 kV
-----------	-------	-------	--------	--------

2.4.2. Configuration des supports (pylônes)

Les supports pour les lignes électriques à haute tension sont essentiellement constitués de charpentes métalliques boulonnées avec des fondations en général en blocs de béton armé. Le support est raccordé de manière stable au terrain par des fondations séparées pour chaque montant ; on a donc 4 fondations par support (pieds).

Le classement de ces lignes suivant la disposition et l'arrangement de conducteurs, rapportées au pylône de suspension, montrés à la figure2.2.

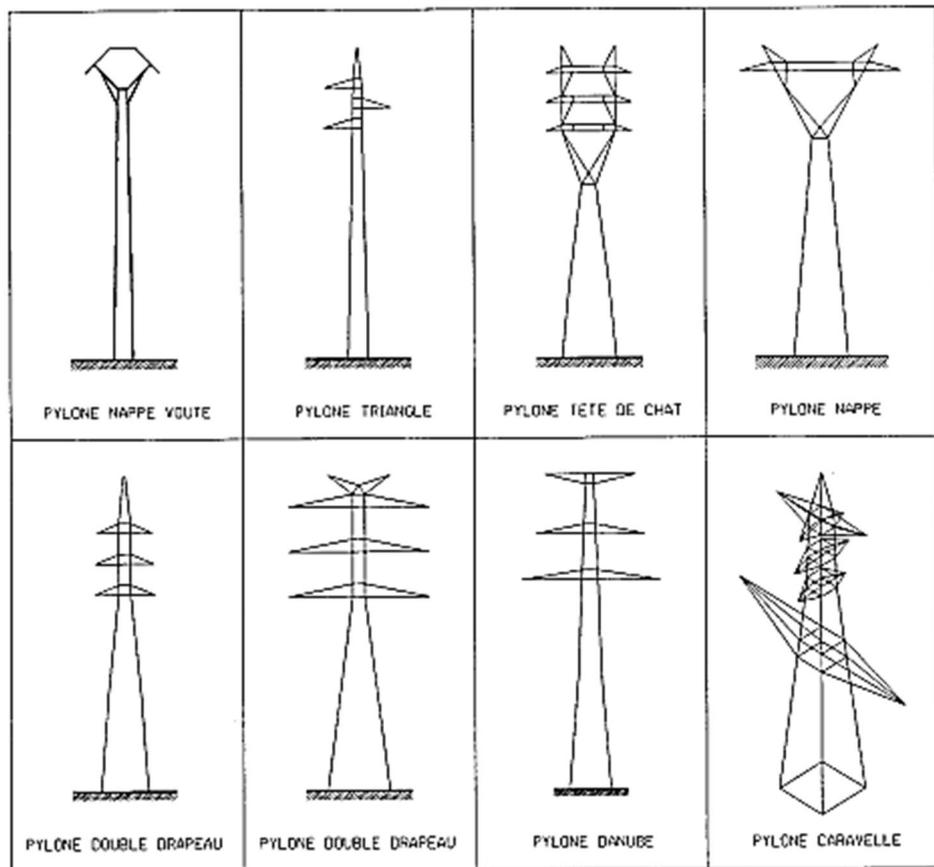
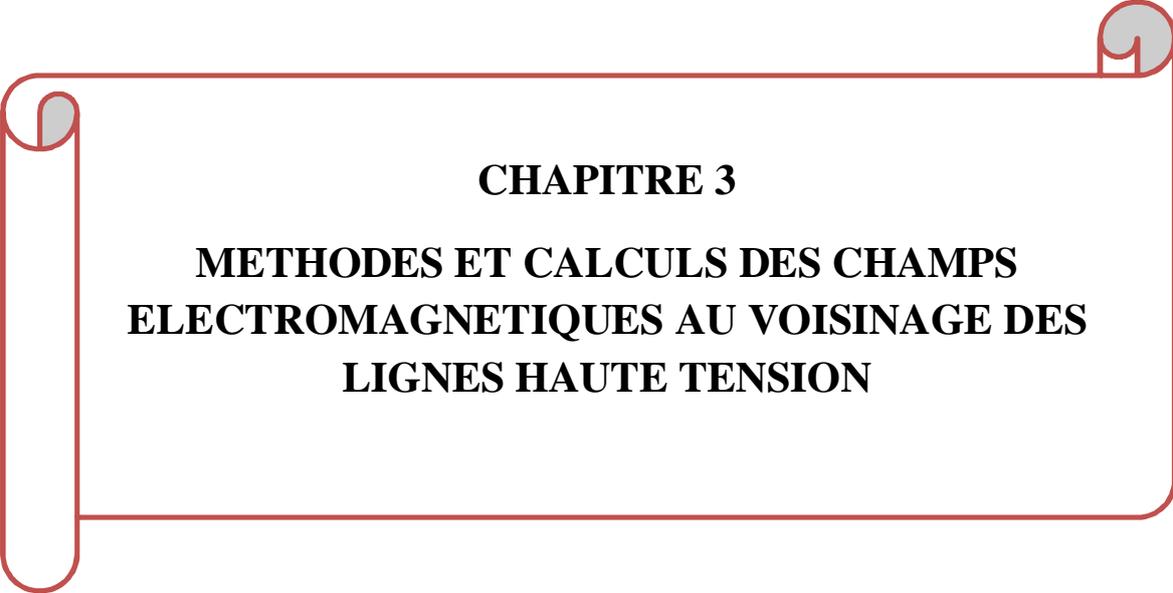


Fig2.2 : Différents types de pylônes

2.5. Conclusion

Dans ce chapitre on a présenté une bibliographie existante dans le domaine de quantification de la pollution électromagnétique générée par les lignes et les postes haute tension. L'évaluation de ces champs peut être effectuée avec des méthodes analytiques, numériques et expérimentales. Ensuite, nous avons examiné les différentes lignes haute tension utilisées par la société Algérienne de l'électricité et de gaz (SONELGAZ) ; la gamme de tension, ainsi que la configuration de ces lignes qu'on estime qu'ils ont une influence claire sur la distribution du champ électromagnétique.



CHAPITRE 3

**METHODES ET CALCULS DES CHAMPS
ELECTROMAGNETIQUES AU VOISINAGE DES
LIGNES HAUTE TENSION**

3.1. Introduction

Dans ce troisième chapitre, nous présentons les formulations analytiques classiques que nous avons appliquées pour calculer séparément les champs électriques et magnétiques produits par les lignes haute tension. Nous trouverons que ces formulations sont efficaces seulement dans le cas d'une seule ligne haute tension. Dans le cas de la présence de plusieurs lignes parallèles, nous trouverons des difficultés à appliquer ces formulations. La dosimétrie numérique occupe une place de premier plan dans l'étude des interactions des champs électromagnétiques générées par des systèmes complexes. Nous examinerons les méthodes numériques les plus utilisées dans notre contexte. Il s'agit de la méthode de différence finie et différence finie dans le domaine du temps (FDTD), la méthode des impédances, ainsi que la méthode des éléments finis. Cette dernière présente plusieurs avantages, notamment la possibilité de décrire des modèles complexes des lignes avec moins de degrés de liberté (avec une précision équivalente) grâce à l'utilisation de maillages non-conformes. Son principe consiste à utiliser une approximation simple des variables inconnues pour transformer les équations aux dérivées partielles en équations algébriques. L'opération de maillage consiste à discrétiser le domaine Ω en sous-domaine Ω_i en maille élémentaire. Nous avons élaboré sous l'environnement COMSOL- MULTIPHYSICS un code de simulation bidimensionnelle 2D basé sur les modules électrostatiques et magnéostatiques de ce logiciel. Ce code nous a permis d'étudier plusieurs cas complexes d'une façon simple et rapide.

3.2. Calcul analytique du champ électromagnétique généré par une ligne 220 kV

3.2.1. Caractéristique de la ligne étudiée

Nous avons appliqué les méthodes analytiques classiques destinées aux calculs des champs électriques et magnétiques générés au voisinage des lignes HT.

Le modèle étudié est une ligne haute tension de 220 kV en nappe (Fig 3.1). Dans les calculs on n'a pas considéré les câbles de garde. La section du conducteur est de $1 \times 411 \text{ mm}^2$.

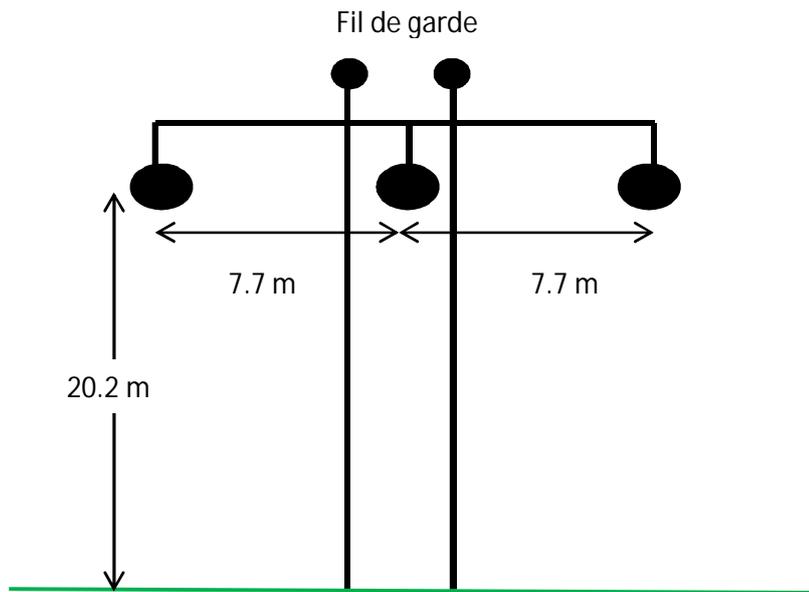


Fig 3.1 : Géométrie du modèle étudié (Ligne- Post El Hadjar /Arcelor Métal (Annaba)

3.2.2. Champ magnétique

Un conducteur cylindrique parcouru par un courant électrique engendre un champ magnétique autour de ce dernier [109]. L'intensité de ce champ s'obtient donc, par l'application directe de la loi d'Ampère, puis par superposition des résultats partiels.

On applique directement la formule :

$$B = \frac{\mu_0}{2\pi r} I \quad (3.1)$$

Où I : le courant qui traverse le conducteur (270 A) dans notre cas.

r : la distance entre le conducteur et le point d'observation et μ_0 est la perméabilité du vide.

Le calcul précis du champ magnétique nécessite l'emploi des termes de Carson pour évaluer les effets d'un sol imparfaitement conducteur. Dans la plupart des applications, il suffit de considérer les conducteurs de phase en espace libre, sans tenir compte des images [110].

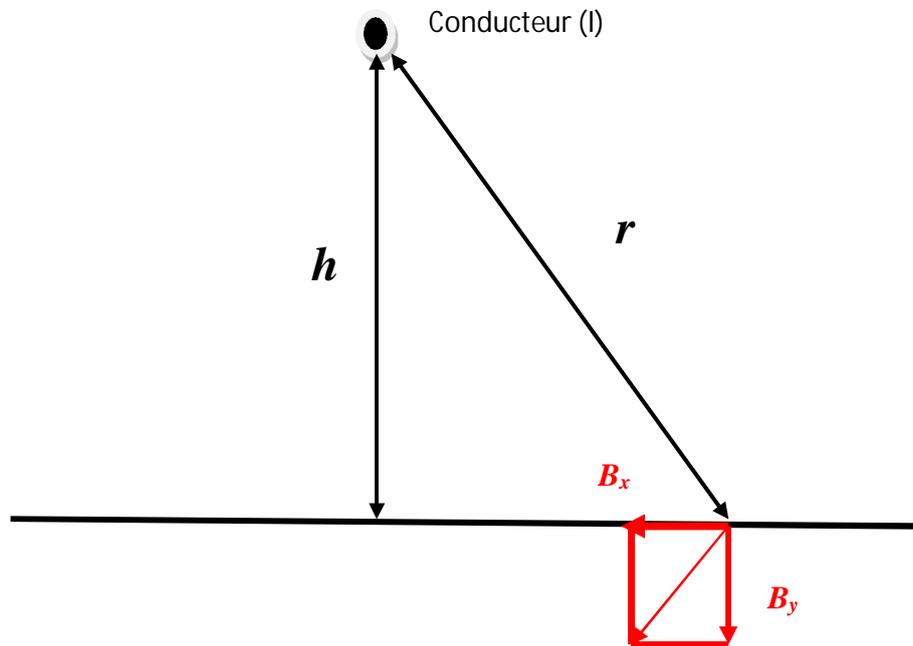


Fig 3.2 : Schémas utilisés pour le calcul du champ magnétique

D'après la figure 3.2, les composantes horizontales (B_x) et verticales (B_y) du champ magnétique (B) sont données par:

$$B_x = \frac{\mu_0}{2\pi r} \cos \theta \quad (3.3)$$

$$B_y = -\frac{\mu_0}{2\pi r} \sin \theta \quad (3.4)$$

Dans le calcul, on néglige les images des conducteurs au sol. Les composantes B_x et B_y , exprimées sous forme complexe [111].

$$B_x = a \cos (\omega t) + b \sin (\omega t) \quad (3.5)$$

$$B_y = c \cos (\omega t) + d \sin (\omega t) \quad (3.6)$$

Le module de B s'exprime en fonction du temps par la relation :

$$B^2 = B_Y^2 + B_X^2 = (a^2 + c^2)\cos^2(\omega t) + (b^2 + d^2)\sin^2(\omega t) + 2(ab + cd)\cos(\omega t)\sin(\omega t) \quad (3.7)$$

Les résultats obtenus concernant l'allure du champ magnétique sont illustrés dans la courbe de la Figure 3.3.

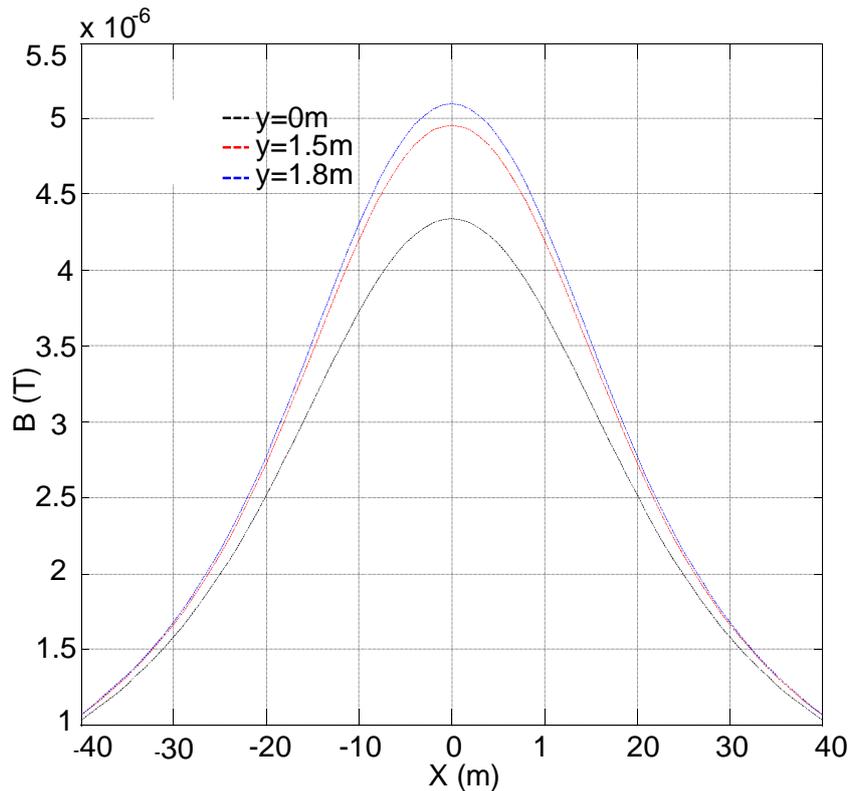


Fig 3.3 : Champ magnétique de la ligne (I=270 A) calculée à (0m ; 1,5m ; 1,8m) au-dessus du sol

3.2.3. Champ électrique

Le calcul du champ électrique rayonné par une structure filaire aux basses fréquences est effectué en utilisant le concept des charges superficielles.

La structure en utilisant le concept des charges électriques dues à sa tension par rapport au sol. Ces charges vont rayonner un champ électrique E qui dépendra de leur quantité, de la topologie de la structure et du point d'observation.

3.2.3.1 Calcul des charges superficielles

Les charges superficielles sont déterminées en fonction de la tension et de la topologie de la structure, nous commençons par le calcul des coefficients de potentiel qui sont déterminés par la relation (3.8) [110].

$$K_{ij} = \frac{1}{2\pi\epsilon_0} \ln \frac{D^{*ij}}{d_{ij}} \quad (3.8)$$

D^{*ij} : Distance entre un conducteur réel et conducteur image.

d_{ij} : Distance entre deux conducteurs réels.

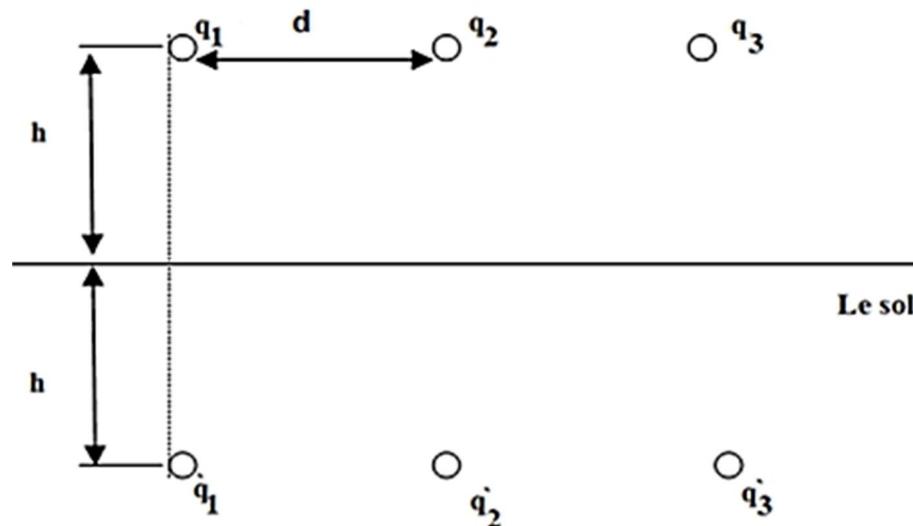


Fig 3.4 : Conducteurs et ses images

Pour une structure de n phases, les intensités des charges superficielles Q sont exprimées à l'aide de la relation matricielle suivante:

$$[Q] = [K]^{-1}[V] \quad (3.9)$$

$[K]$: Les coefficients de potentiel propre et mutuel de la structure.

$[K]^{-1} = [C]$: Matrice des capacités propre et mutuelle de la structure.

$[V]$: Vecteurs des tensions de chaque phase.

3.2.3.2 Modèle de calcul du champ électrique [111] :

Le champ électrique créé par un conducteur cylindrique est donnée par:

$$E(r) = \frac{Q}{2\pi r} \quad (3.10)$$

Où $E(r)$: le champ électrique, Q est la quantité de charge et r est la distance entre le segment et point d'observation.

On considère un conducteur à une hauteur h au-dessus de sol et son image à une profondeur h au-dessous du sol (Fig 3.5) .

On utilise la méthode des images électriques pour calculer les composantes horizontales et verticales du champ électrique au point M de coordonnées (x, y) [112,113].

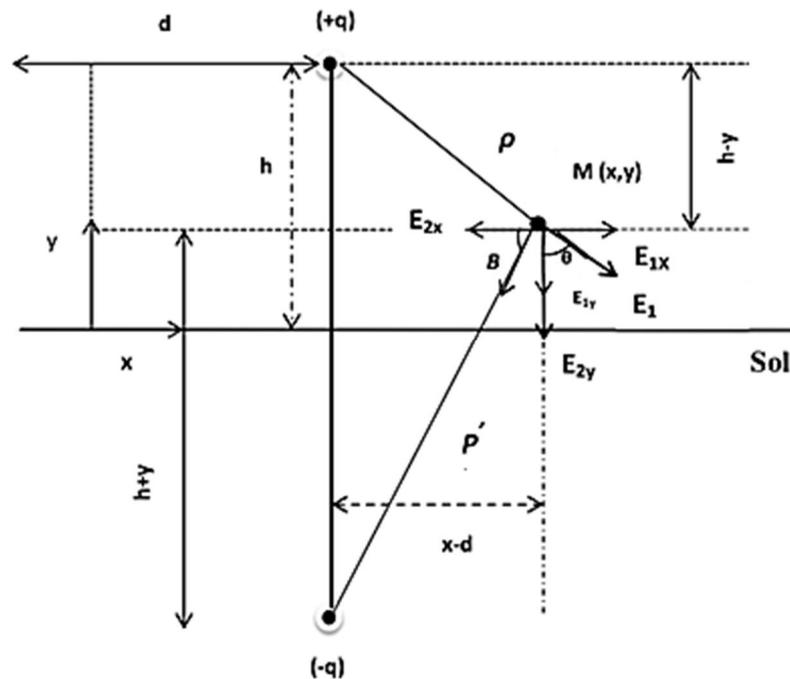


Fig 3.5 : Schémas utilisés pour le calcul du champ électrique (méthode des images).

On obtient:

$$E_x = \frac{q}{2\pi\epsilon_0} \left[\frac{(x-d)}{(x-d)^2+(h-y)^2} - \frac{(x-d)}{(x-d)^2+(y+h)^2} \right] \quad (3.11)$$

$$E_y = \frac{q}{2\pi\epsilon_0} \left[\frac{(h+y)}{(x-d)^2+(h-y)^2} - \frac{(y-h)}{(x-d)^2+(y+h)^2} \right] \quad (3.12)$$

La Figure 3.6 représente L'allure du champ électrique à 1,5 m au-dessus du sol.

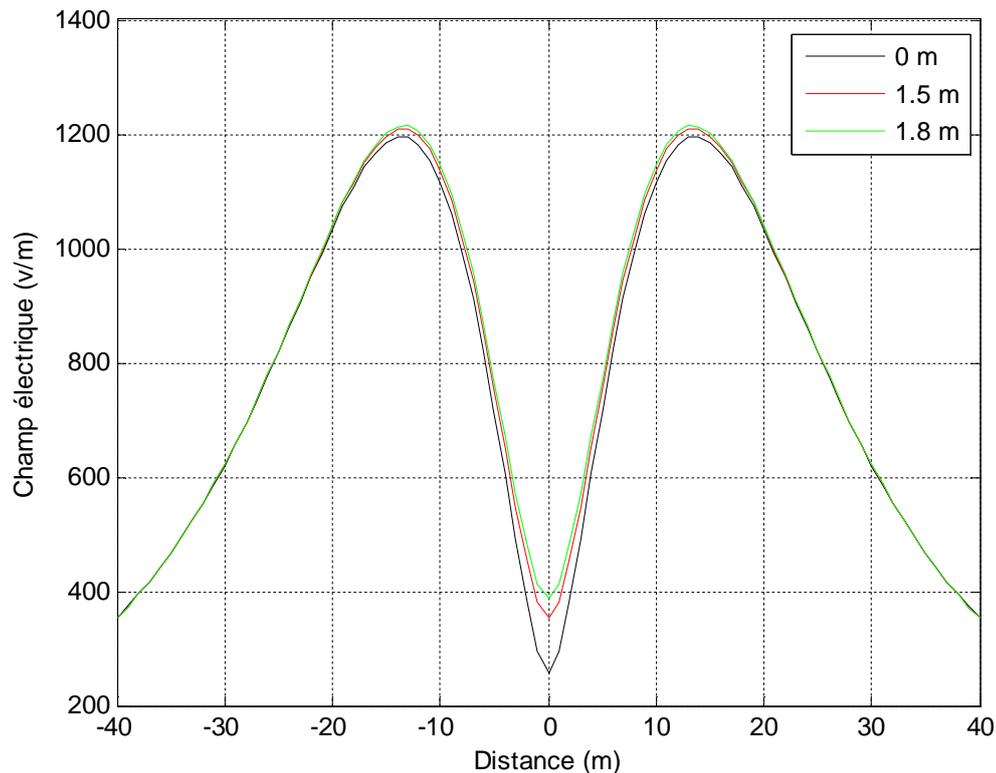


Fig 3.6 : Champ électrique de la ligne à 0 m, 1,5 m et 1,8 m au-dessus du sol

Les intensités du champ électrique et magnétique relevées sont bien inférieures aux limites établies par les normes internationales (5 kV/m pour le champ électrique et 100 μ T pour le champ magnétique).

Le champ électrique généré par les lignes haute tension est proportionnel aux quantités de charge, celui de magnétique est proportionnel à l'intensité du courant transportée par la ligne, ces derniers diminuent au fur et à mesure qu'on éloigne de l'axe du pylône.

3.3 Méthodes numériques en électromagnétisme

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

Ces dernières années, les outils de simulation numérique sont utilisés intensivement dans la résolution des problèmes en compatibilité électromagnétique.

Pour les applications en régime transitoire, la technique la plus répandue est la méthode des différences finies dans le domaine du temps FDTD. Cependant, sous sa forme conventionnelle, la FDTD utilise une grille de discrétisation spatiale cartésienne et uniforme par nature, avec l'inconvénient de représenter les frontières en marches d'escalier. Cela entraîne un alourdissement du traitement numérique si la méthode doit être appliquée à des géométries courbes ou possédantes des détails finis. La méthode des éléments finis EF, par contre, permet la modélisation des structures de géométries complexes et pouvant inclure des milieux hétérogènes. Plusieurs méthodes de simulation numérique existent; parmi ces méthodes les plus utilisées dans le monde de la simulation et de la modélisation des systèmes en électromagnétisme, on trouve:

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

3.3.1. Différences finies (DF) :

La méthode de différences finies [114] est l'une des premières méthodes numériques à 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 (Fig 3.7), en 2D l'équation de Laplace:

$$\frac{\partial^2 \phi}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \phi}{\partial y^2} = 0, \text{ Tel que } \phi: \text{ potentiel électrique scalaire.}$$

Devient:

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

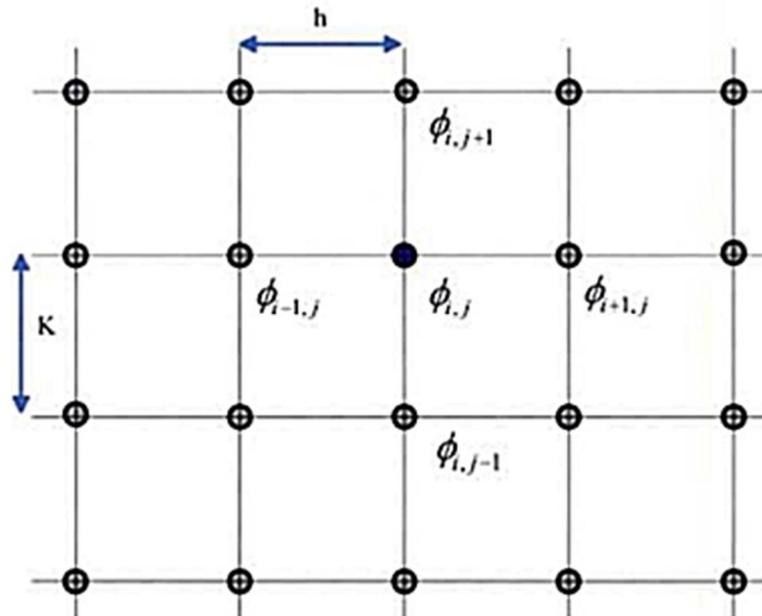


Fig 3.7 : Application de la méthode DF en 2D et 3D [40].

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 [115] lorsqu'on doit gérer des géométries compliquées (discrétisation de la frontière, condition d'interface).

3.3.2 La méthode FDTD

La méthode de différences finies dans le domaine temporel a été développée par Kane S. YEE [116], 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 3.8) 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.

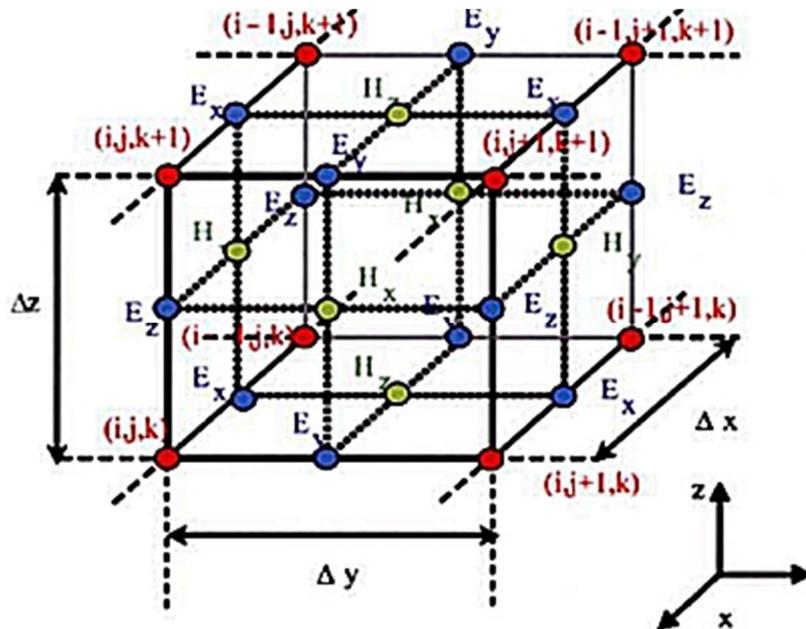


Fig 3.8 : Application de la méthode FDTD- maillage de Yee [40].

Les six équations dérivées sont:

$$-\frac{\partial B_x}{\partial t} = \frac{\partial E_z}{\partial y} - \frac{\partial E_y}{\partial z}$$

$$-\frac{\partial B_y}{\partial t} = \frac{\partial E_x}{\partial z} - \frac{\partial E_z}{\partial x}$$

$$-\frac{\partial B_z}{\partial t} = \frac{\partial E_x}{\partial y} - \frac{\partial E_y}{\partial x}$$

Et

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

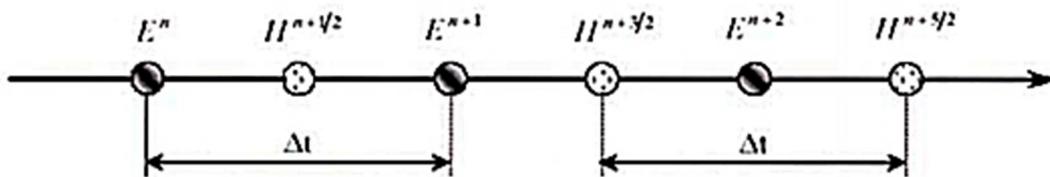
$$-\frac{\partial D_y}{\partial t} = \frac{\partial H_x}{\partial z} - \frac{\partial H_z}{\partial x} - J_y$$

$$-\frac{\partial D_z}{\partial t} = \frac{\partial H_x}{\partial y} - \frac{\partial H_y}{\partial x} - J_z$$

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

$$F(i\Delta x + K_x \left(\frac{\Delta x}{2}\right), j\Delta y + K_y \left(\frac{\Delta x}{2}\right), K\Delta z + K_z \left(\frac{\Delta z}{2}\right))$$

De la même manière, le temps peut être discrétisé en intervalles $\sim t$, 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 H à $(n + \frac{1}{2}) \Delta t$:



3.3.2.1 Critère de stabilité

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:

$$\Delta t \leq \Delta t_{max} = \frac{1}{c \sqrt{\frac{1}{\Delta x^2} + \frac{1}{\Delta y^2} + \frac{1}{\Delta z^2}}}$$

Avec c est la célérité de l'onde dans le milieu de propagation.

Ce critère de stabilité du schéma de Yee a été donné par Taflove [117].

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. Les premières conditions d'absorption ont été proposées par Mur [118], Engquist et Majda [119] mais ne donnent des résultats satisfaisants que dans le cas d'une incidence normale à la surface. D'autres frontières absorbantes ont été proposées plus récemment par Berenger et semblent donner des résultats très intéressants [120].

3.3.3 La méthode des impédances

La méthode des impédances [121] 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.

Chaque sommet des cellules est représenté par un nœud et chaque arrêt 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'arrête correspondante et la section de la cellule. ϵ , σ représentent les caractéristiques électriques du milieu.

Les inconnues du problème sont les courants I dans chaque maille formée par les arrêts de chaque cellule. L'équation imposée pour chaque cellule est la loi de Kirchhoff, où une force électromotrice $FEM = -j\omega\phi$ est imposée conformément à la loi d'induction de Faraday.

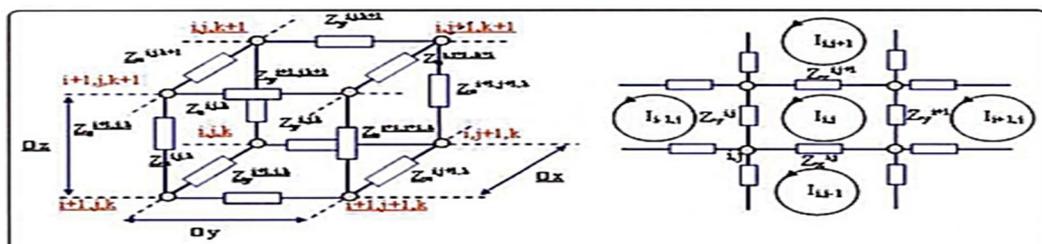


Fig 3.9 : Représentation 3D et 2D d'un réseau électrique représentatif d'une matière vivante (Application des lois de Kirchhoff) [40].

3.3.4 Éléments finis (FEM)

La méthode des éléments finis [122] est un outil de résolution numérique des systèmes physiques. Elle nécessite l'utilisation intensive de l'ordinateur. C'est une méthode à multi-usages, elle peut résoudre la majorité des problèmes rencontrés dans la modélisation des systèmes quelconques: linéaires ou non linéaires, stationnaires ou non-stationnaires et elle peut résoudre les problèmes en une dimension, deux dimensions ou trois dimensions. En plus la méthode des éléments finis est l'une des méthodes pouvant résoudre les problèmes compliqués par exemple les simulations sur les milieux hétérogènes, l'application du maillage dépend de la taille de chaque élément constituant le système. La figure 3.10 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.

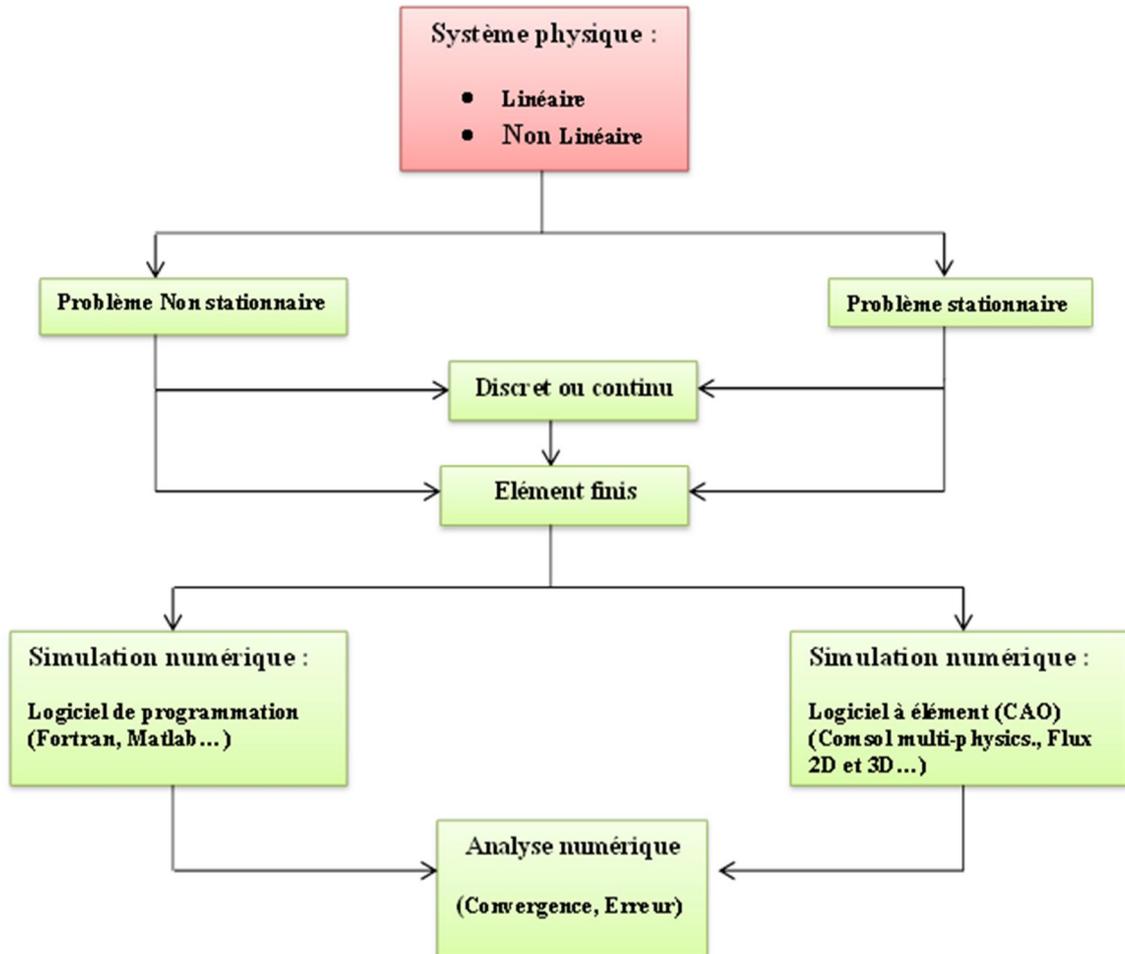


Fig 3.10: Description de la méthode- résolution d'un système physique par EF.

➤ Le maillage

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

- **Les mailles linéiques** : Elles servent à mailler une courbe qui peut représenter le domaine linéique Ω ou une section méridienne d'un domaine surfacique Ω axisymétrique.

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

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

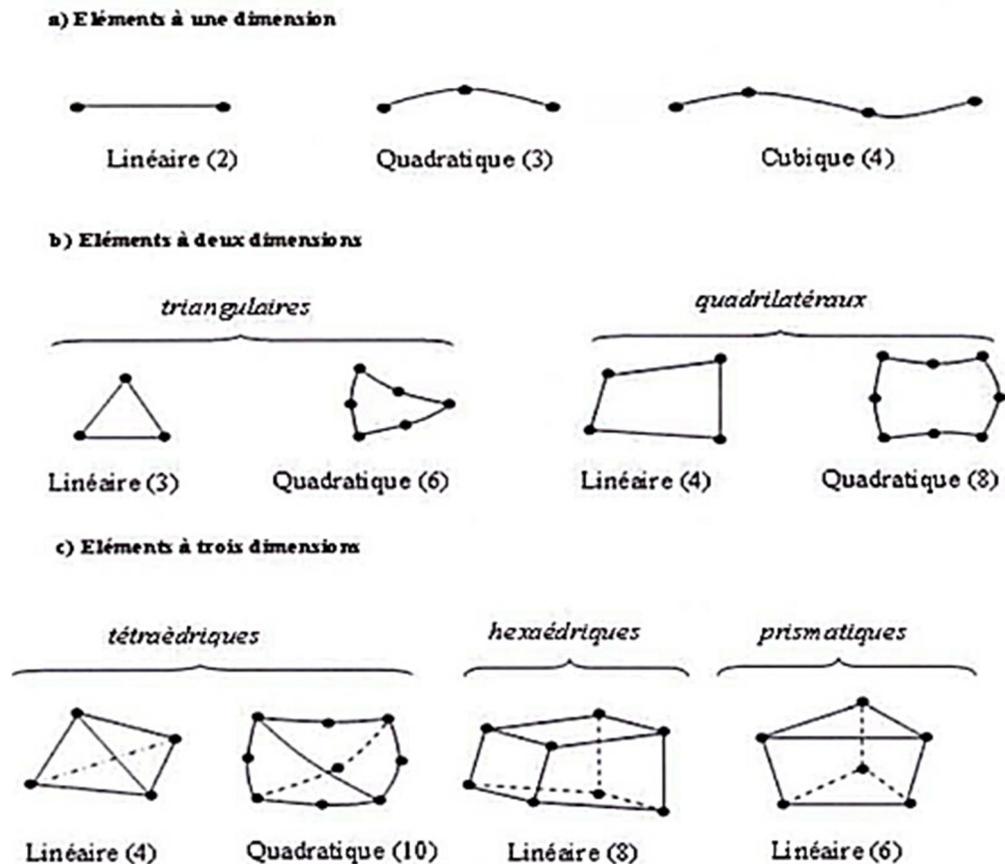


Fig 3.11 : Différents cas du maillage [40].

➤ **Avantage du maillage triangulaire :**

L'élément triangulaire est un élément polyvalent, car il peut être utilisé pour modéliser une géométrie de forme arbitraire, en particulier si des éléments de différentes tailles sont utilisés. Considérons l'élément triangulaire illustré à la figure (3.12). Les nœuds sont numérotés dans le sens inverse des aiguilles [123].

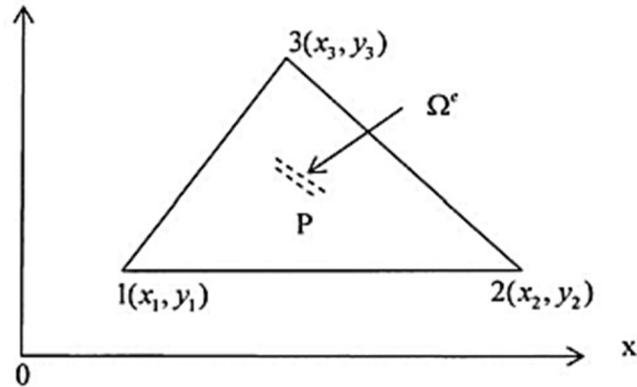


Fig 3.12 : Élément triangulaire à base de nœud. Les nœuds sont numérotés dans le sens antihoraire.

La distribution de potentiel à l'intérieur d'un triangle peut-être décrite par [123] :

$$\varphi^e(x, y) = \sum_{i=1}^3 \varphi_i^e N_i^e(x, y)$$

Avec les fonctions de base $N_i^e(x, y)$ sont données comme [124].

$$N_i^e(x, y) = \begin{cases} \frac{1}{\Delta^e} (a_i + b_i x + c_i) & (x, y) \in \Omega^e \\ 0 & \text{autrement} \end{cases}$$

Ici Ω^e désigne la surface de l'élément e Les coefficients a_i, b_i, c_i sont introduits pour la concision dans l'écriture, et sont décrits en termes de coordonnées nodales comme :

$$a_i = x_j y_k - x_k y_j, b_i = y_i - y_k, c_i = x_k - x_j \quad i, j, k = 1, 2, 3$$

Où (x_j, y_j) désignent les coordonnées du nœud j comme représenté sur la figure (3.13). les indices (i, j, k) dans (3.13) suivent la règle cyclique (par exemple, $a_1 = x_2 y_3 - x_3 y_2$, $a_2 = x_3 y_1 - x_1 y_3$, $a_3 = x_1 y_2 - x_2 y_1$, etc.). La superficie du triangle Δ^e est donnée par :

$$\Delta^e = \frac{1}{2} \begin{vmatrix} 1 & x_1 & y_1 \\ 1 & x_2 & y_2 \\ 1 & x_3 & y_3 \end{vmatrix} = \frac{1}{2} [(x_1 - x_2)(y_3 - y_1) - (x_3 - x_1)(y_2 - y_1)]$$

Les fonctions de base sont illustrées sur la figure (3.13).

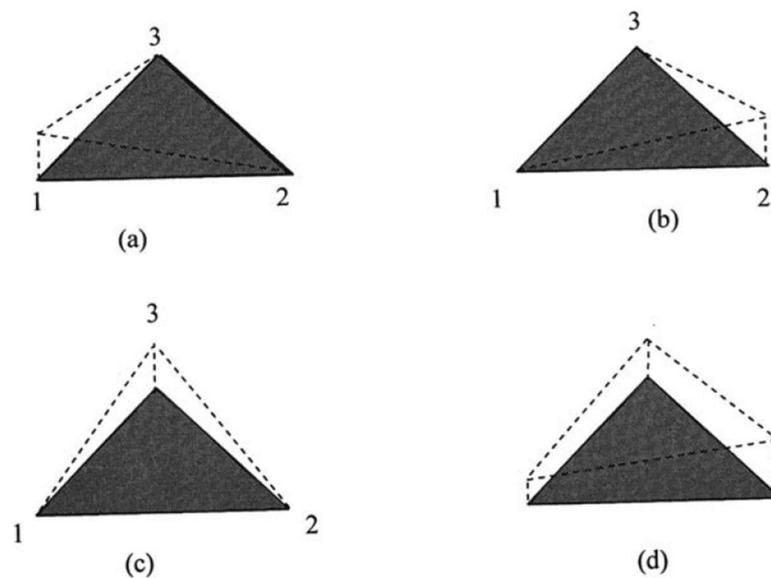


Fig 3.13 : Illustration des fonctions de base de nœuds sur la base $N_i^e(x, y)$ pour un élément triangulaire, et l'approximation linéaire (a-c) des fonctions de base linéaire N_1^e , N_2^e et N_3^e et l'approximation linéaire (d) $\sum \phi_i^e N_i^e(x, y)$ [123].

➤ **Logiciel d'éléments finis :**

Dans notre étude le logiciel de simulation utilisé est COMSOL-MULTIPHYSICS 3.4, ce logiciel permet de faire des simulations en 1D, 2D et 3D, avec une grande facilité d'utilisation, une bonne précision et un usage dans de nombreux domaines, dans la mécanique l'électronique et l'électrotechnique, la chimie, l'électromagnétisme. Etc. Il faut choisir le module dès le début (dans notre cas, module électrostatique et magnétostatique) (Fig 3.14).

Chapitre 3 - Méthodes et calculs des champs électromagnétiques au voisinage des lignes haute tension

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

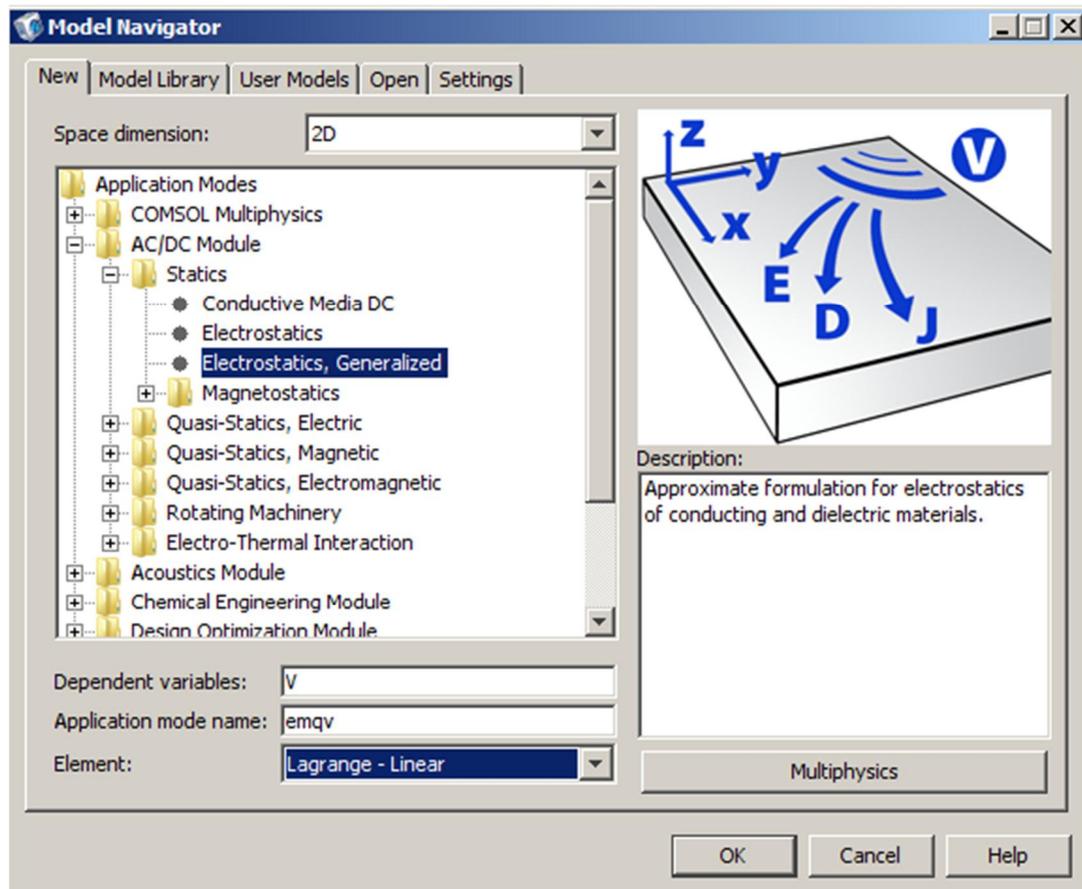


Fig 3.14 : logiciel d'éléments finis.

➤ Interface graphique et visualisation :

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

COMSOL- MULTIPHYSICS permet de représenter graphiquement de plusieurs manières (par des vecteurs proportionnels, contour, répartition surfacique en 2D et 3D,

Chapitre 3 - Méthodes et calculs des champs électromagnétiques au voisinage des lignes haute tension

courbes etc.). Il est également possible de faire des animations qui permettent de visualiser les phénomènes des différentes variables: champ électrique, champ magnétique, la densité de courant...etc. Nous présentons dans la figure 3.15 ci-dessous quelques illustrations d'une simulation par le logiciel COMSOL-MULTOPHYSICS [124].

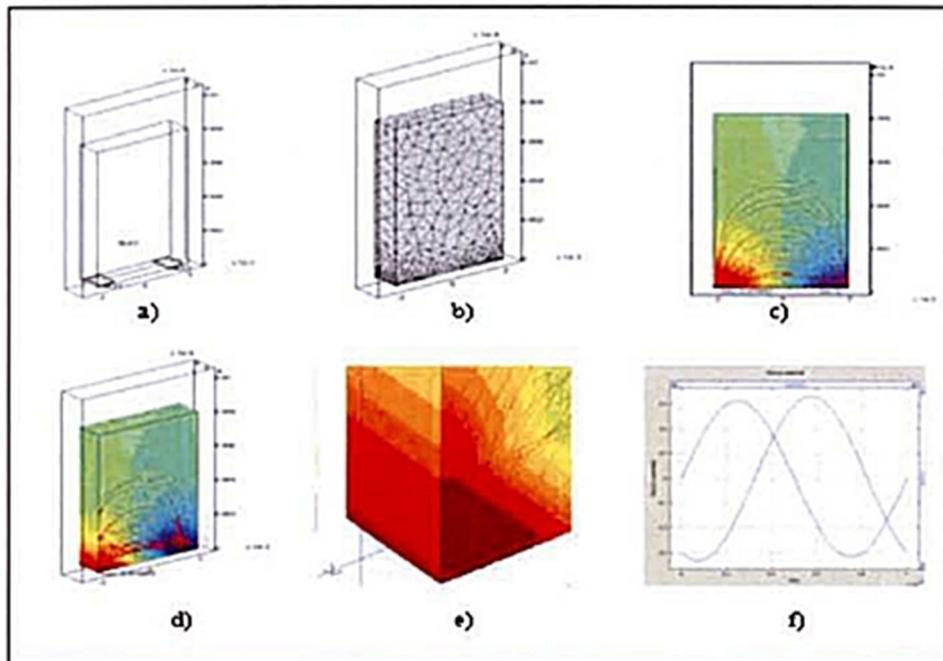


Fig 3.15 : Présentation du logiciel: a) Géométrie du modèle, b) Application du Maillage, c) simulation en 2D, d) simulation en 3D, e) Application Zoom, t) Résultat sous forme de courbe.

3.4 Formulation numérique (Éléments finis)

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

$$\nabla \times E = 0 \quad (3.13)$$

$$\nabla \times H = J \quad (3.14)$$

Chapitre 3 - Méthodes et calculs des champs électromagnétiques au voisinage des lignes haute tension

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

Les équations de conservation sont :

$$\nabla \cdot D = \rho \quad (3.15)$$

$$\nabla \cdot B = 0 \quad (3.16)$$

Où D , B et ρ sont respectivement le vecteur de déplacement, l'induction magnétique et la densité de charge électrique.

Les équations phénoménologiques présentant les propriétés des matériaux sont :

$$B = \mu H \quad (3.17)$$

$$D = \varepsilon E \quad (3.18)$$

Où μ et ε sont respectivement la perméabilité et la permittivité du milieu.

3.4.1 Formulation de calcul du champ électrique

Partant des équations de Maxwell, en remplaçant l'équation des matériaux (3.18) dans (3.15), on a :

$$\nabla \cdot \varepsilon E = \rho \quad (3.19)$$

Ainsi on peut définir un potentiel scalaire électrique V tel que : $E = -\nabla V$. On obtient :

$$-\nabla \cdot \varepsilon_0 \varepsilon_r \nabla V = \rho \quad (3.20)$$

Avec ε_0 est la permittivité du vide ($8,8542 \cdot 10^{-12} \text{ C}^2 \text{ N}^{-1} \text{ m}^{-2}$) et ε_r est la permittivité relative.

3.4.2 Formulation de calcul du champ magnétique

Partant toujours des équations magnétostatiques de Maxwell, en remplaçant l'équation $H = \frac{B}{\mu}$ dans l'équation (3.14), on obtient :

$$\nabla \times \frac{B}{\mu} = J \quad (3.21)$$

Ainsi on peut définir un potentiel vecteur magnétique A tel que : $B = \nabla \times A$.

On déduit alors :

$$\nabla \times (\mu_0^{-1} \mu_r^{-1} \nabla \times A) = J \quad (3.22)$$

Avec μ_0 est la perméabilité magnétique du vide ($4\pi \times 10^{-7} \text{ H}\cdot\text{m}^{-1}$) et μ_r est la perméabilité magnétique relative.

Nos problèmes sont résolus en appliquant la méthode des éléments finis sur les deux équations aux dérivées partielles (3.20) et (3.22).

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

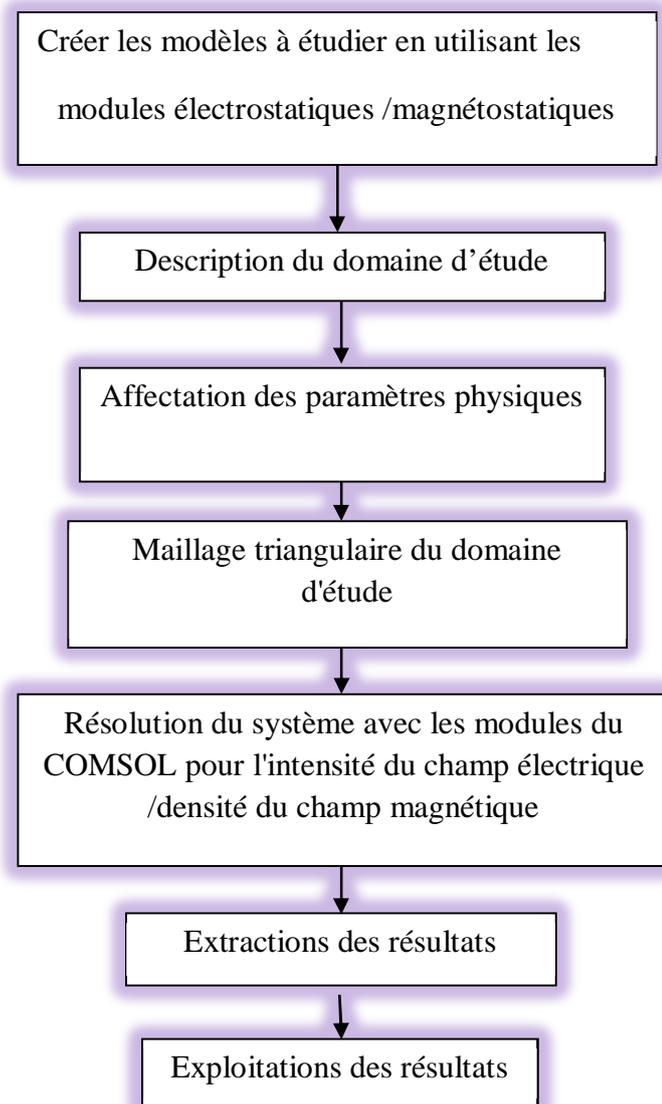


Fig 3.16 : Organigramme de calcul numérique.

Pour valider ce code, une étude comparative avec les résultats expérimentaux des champs électriques et magnétiques obtenus sous une ligne 400 kV sera effectuée dans le paragraphe suivant.

3.5. Mesures et calcul du champ électromagnétique au voisinage d'une ligne de 400kV

3.5.1. Géométrie de la ligne étudiée

La figure 3.17 présente la géométrie de la ligne 400 kV étudiée. La section de chaque conducteur est $2 \times 583 \text{ mm}^2$.

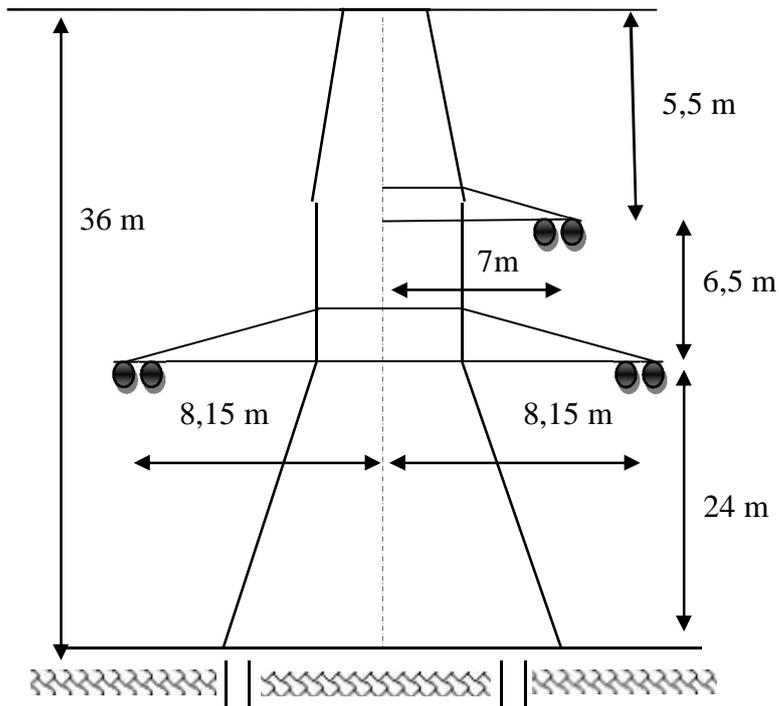


Fig 3.17 : Géométrie de la ligne étudiée (ligne de 400 kV, Drouach –Ramdan Djamel)

3.5.2 Equipement de mesures

L'instrument utilisé pour mesurer les champs électriques et magnétiques basse fréquence est le NARDA-EHP 50C (Fig 3.18), avec une bande de fréquences de 5 Hz à 100 kHz.



Fig 3.18 : Equipement de mesures

Chapitre 3 - Méthodes et calculs des champs électromagnétiques au voisinage des lignes haute tension

Cet appareil mesure les composants x, y et z du champ électrique et magnétique à l'aide d'une sonde cubique incorporée par deux capteurs de ces deux champs, la sonde est placée sur une tige de 1m de longueur. La mémoire de l'instrument stocke les mesures et les transfère à l'ordinateur à travers une fibre optique reliée par un port **USB**. La longueur de fibre optique est de 10 m, ce qui permet à la personne qui fait les mesures de s'installer loin de la sonde et donc n'affecte pas sur les valeurs des champs enregistrées.

3.5.3. Méthodologie de mesure

Dans un premier temps, nous avons mesuré les champs électromagnétiques au voisinage du pylône, prenant l'axe de pylône comme point départ, plusieurs mesures des champs électriques et magnétiques sont prises à 1m du sol dans deux directions longitudinales (± 60 m), par un incrément $\Delta x = 2$ m (Fig.3.19).

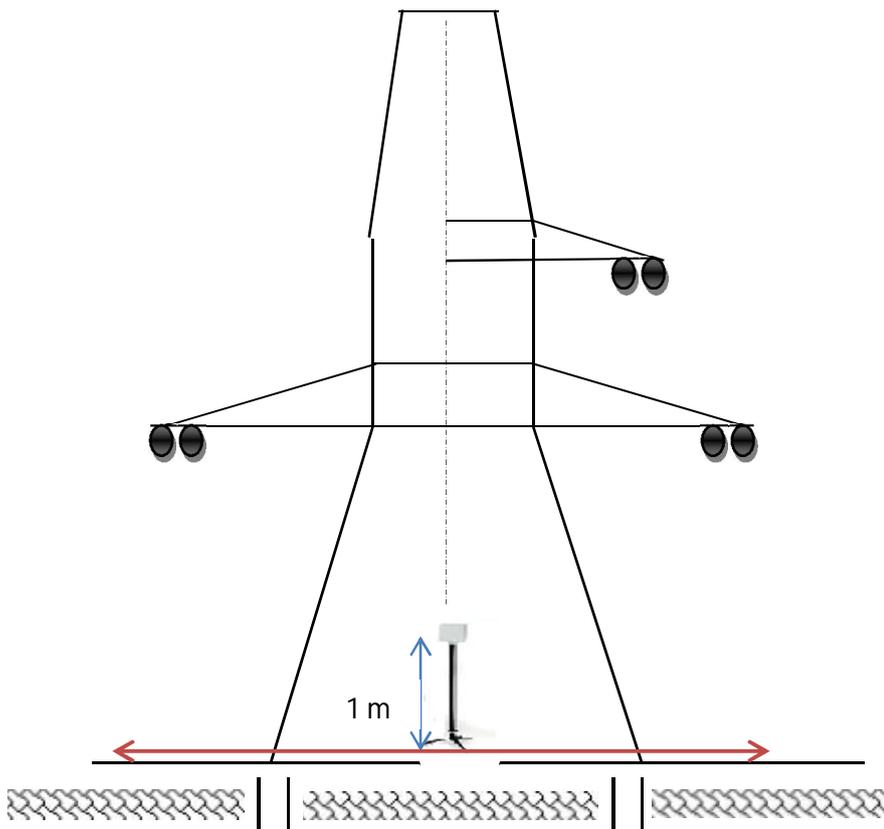


Fig 3.19 : Positions de mesures, au voisinage du pylône.

3.5.4. Simulation numérique

➤ Conditions aux limites

Les conditions aux limites que nous avons utilisées pour calculer les champs électriques et magnétiques, en exploitant le code que nous avons réalisé, sont respectivement représentées dans les figures 3.20 et 3.21.

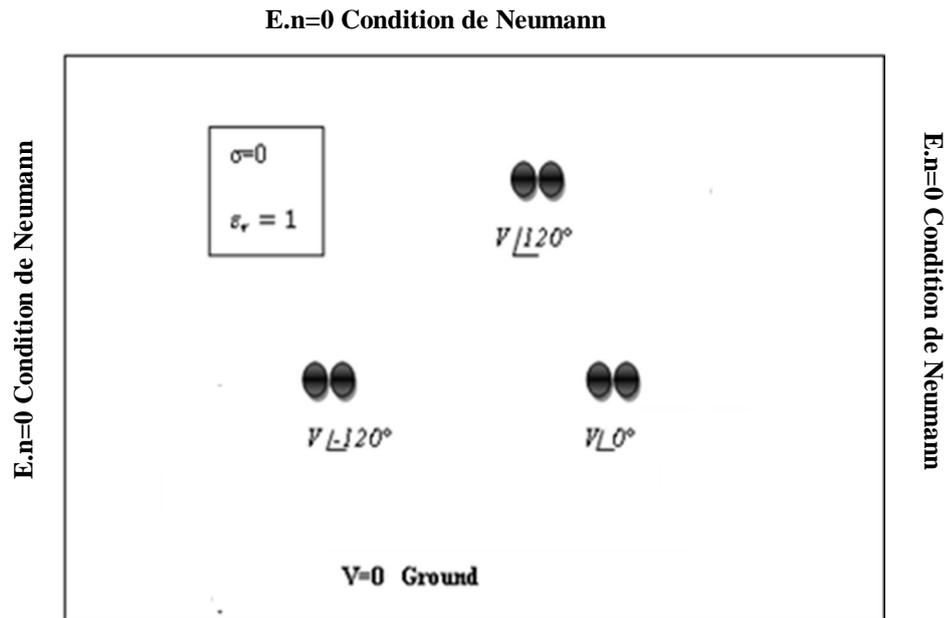


Fig 3.20 : Conditions aux limites, champ électrique.

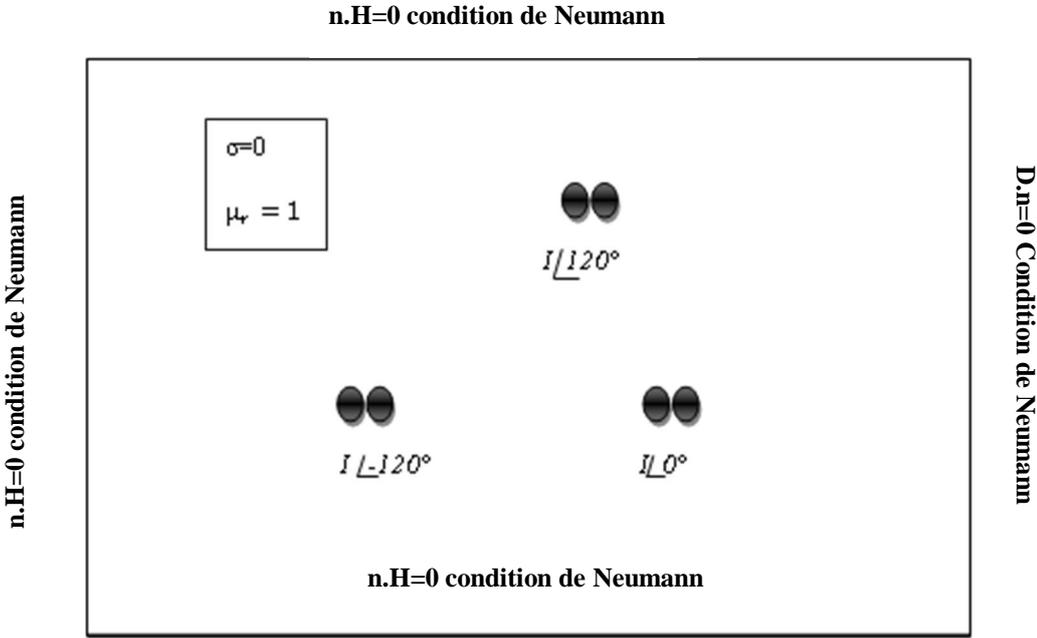


Fig 3.21 : Conditions aux limites, champ magnétique.

3.5.5. Résultats

3.5.5.1.Champ électrique

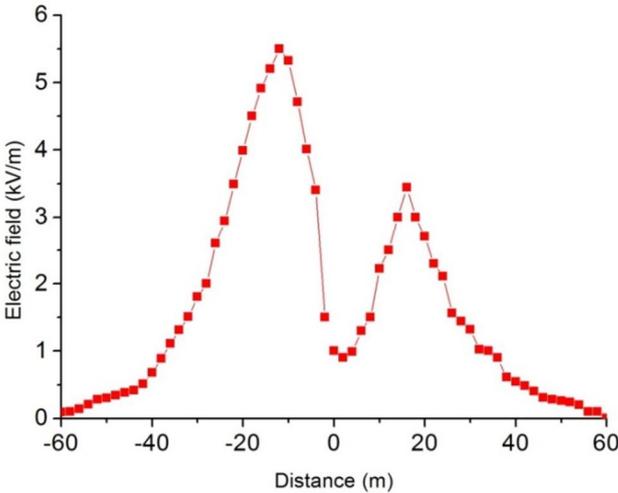


Fig 3.22 : Profil du champ électrique, résultats de mesures

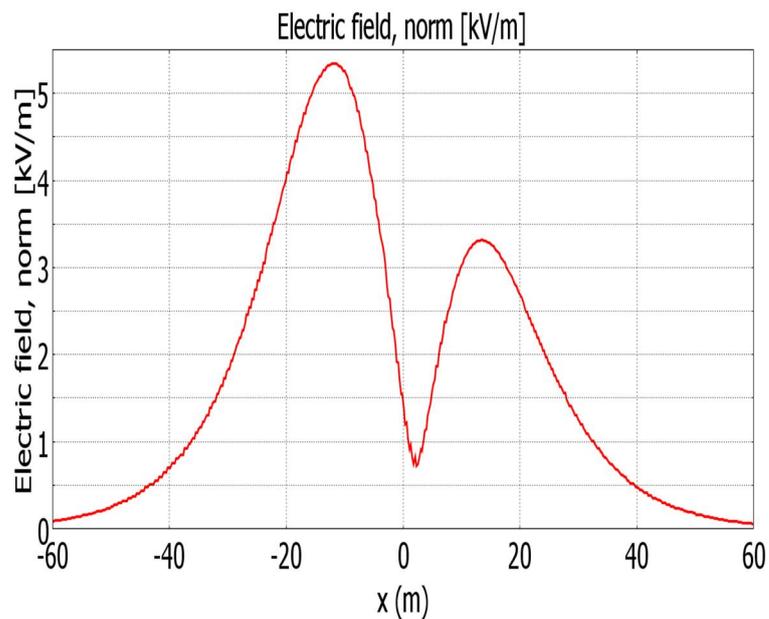


Fig 3.23 : Profil du champ électrique, calculs numériques

Les résultats obtenus numériquement sont comparables avec ceux obtenus expérimentalement.

A partir de ces courbes, on peut voir que la distribution du champ électrique n'est pas symétrique dans les deux directions à partir du point de départ (0m). Des valeurs très importantes du champ électrique ont été enregistrées dans les zones de -10 m à -14 m, dans ces régions l'intensité des champs électriques dépasse la limite (5 kV / m) fixée par l'ICNIRP pour l'exposition du grand public. La valeur de crête (5,501 kV / m) a été trouvée à 12 m à la gauche de l'axe pylône. Plus loin de la ligne, les intensités de champ électrique diminuent rapidement.

3.5.5.2. Champ magnétique

Pendant les mesures, la valeur de courant électrique circule dans les conducteurs de la ligne est approximativement 240 A.

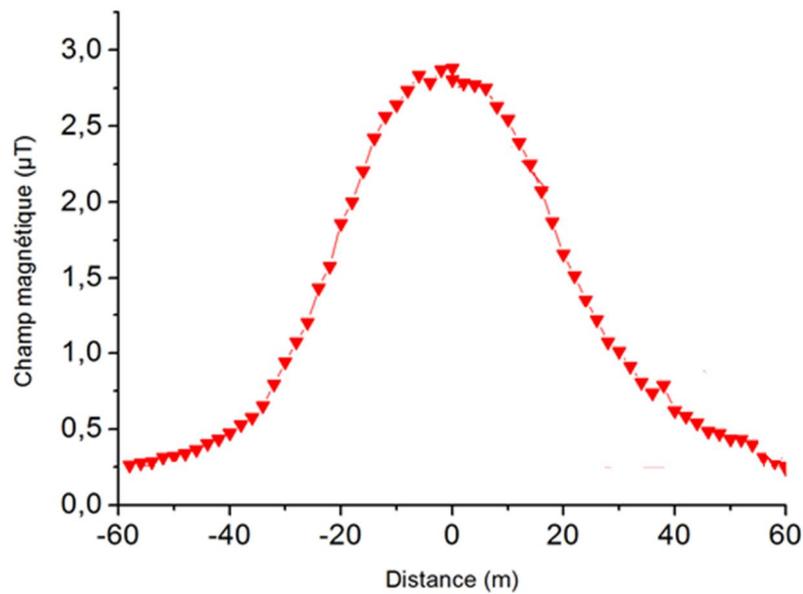


Fig 3.24 : Profil du champ magnétique, résultats de mesures

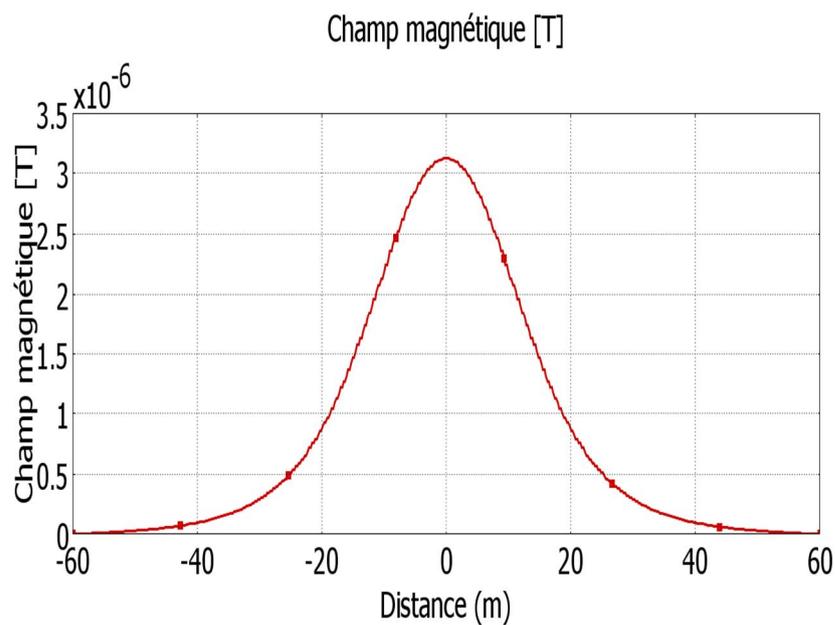


Fig 3.25 : Profil du champ magnétique, calculs numériques

Il y a une grande affinité entre les résultats obtenus théoriquement et pratiquement dans l'intervalle entre (0 et ± 15 m). Les valeurs de mesure du champ magnétique sont presque identiques dans les deux directions de mesure. La valeur maximale de l'intensité du champ magnétique ($2,8806 \mu\text{T}$) a été enregistrée dans le premier point de mesure. Le champ

Chapitre 3 - Méthodes et calculs des champs électromagnétiques au voisinage des lignes haute tension

magnétique décroît régulièrement lorsque nous éloignons de la ligne et atteindre $0,3975 \mu\text{T}$ à 60 m du point de départ. Généralement, ces valeurs restent très loin par rapport aux limites fixées par l'ICNIRP ($100 \mu\text{T}$).

3.5.6. Mesure du champ au voisinage de la flèche maximale de la ligne 400 kV

Les mesures ont été effectuées dans la région où les conducteurs de la ligne sont plus proches du sol (à la mi- portée des deux pylônes), donc les valeurs maximales du champ électrique et magnétique sont attendues ici. Nous avons choisi une zone où la terre est parfaitement plate. Plusieurs mesures des champs électriques et magnétiques sont prises à 1 m du sol dans les deux directions longitudinales (± 60 m), par un incrément $\Delta x = 2$ m. Le point de départ (0 m) est situé à 250 m de l'axe des deux pylônes (Fig.3.26).

La hauteur minimale du conducteur entre deux pylônes consécutifs est définie par la flèche (S) [125]:

$$h_{min} = h - s. \quad (3.23)$$

Où h est la hauteur de conducteur au pylône, et s est donnée par:

$$s = 2a \sinh^2 \left(\frac{L}{4a} \right). \quad (3.24)$$

Avec:

$$a = \frac{T_n}{w} \quad (3.25)$$

Où T_n est la tension mécanique du conducteur à la mi- portée des deux pylônes, et w est le poids par unité de longueur.

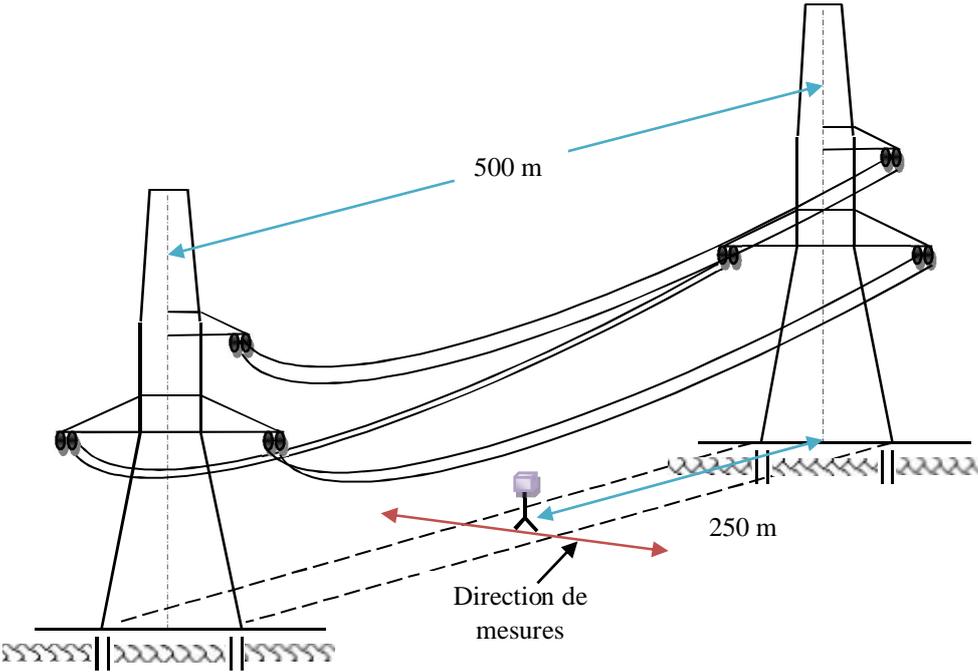


Fig 3.26: Position de mesures, au voisinage de la flèche maximale

3.5.6.1.Champ électrique

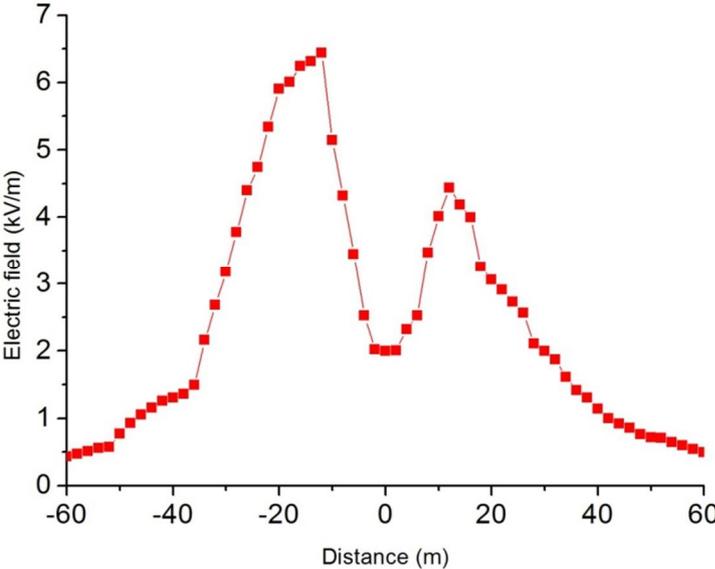


Fig 3.27 : Profil du champ électrique, résultats de mesures au voisinage de la flèche maximale

A partir de cette courbe, on peut voir que la distribution du champ électrique au voisinage de la flèche maximale est plus importante que celui obtenu au voisinage du pylône. Les intensités du champ électrique qui dépassent les limites de l'ICNIRP sont trouvées dans l'intervalle de -10 m à 18 m. La valeur de crête (6,4431 kV / m) a été trouvée à 12 m de l'axe de mesure.

3.5.6.2. Champ magnétique

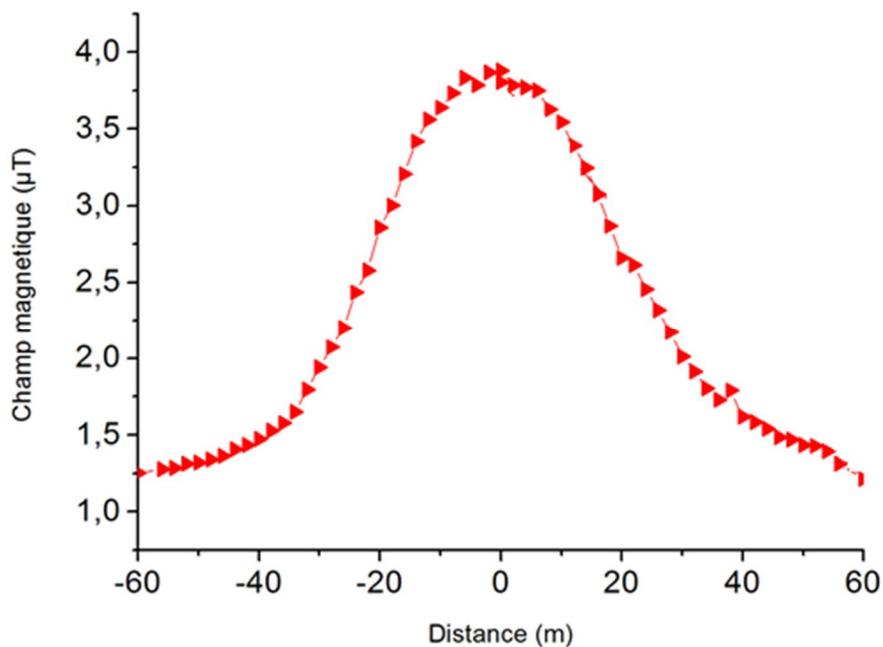


Fig 3.28 : Profil du champ magnétique, résultats de mesures au voisinage de la flèche maximale

La valeur maximale de l'intensité du champ magnétique (3,8577 µT), correspond à un courant de 240 A, a été trouvée dans le premier point de mesure. Cette valeur est négligeable en comparaison avec la norme fixée par l'ICNIRP (100 µT).

Après avoir validé notre code avec une géométrie simple, pour laquelle des solutions analytiques sont disponibles, nous sommes tournées vers des modèles plus complexes. Dans

Chapitre 3 - Méthodes et calculs des champs électromagnétiques au voisinage des lignes haute tension

le reste de ce chapitre, nous avons appliqué notre code d'éléments finis pour calculer les champs électromagnétiques pour différents cas.

3.6. Cas d'une seule ligne HT

Nous avons appliqué le code sur la ligne 220 kV étudié précédemment d'une façon analytique (Fig 3.1). Les champs électromagnétiques ont été calculés à plusieurs niveaux au-dessus de sol. Les Figures (3.29-3.32) montrent les profils de champ électrique et magnétique au voisinage de cette ligne.

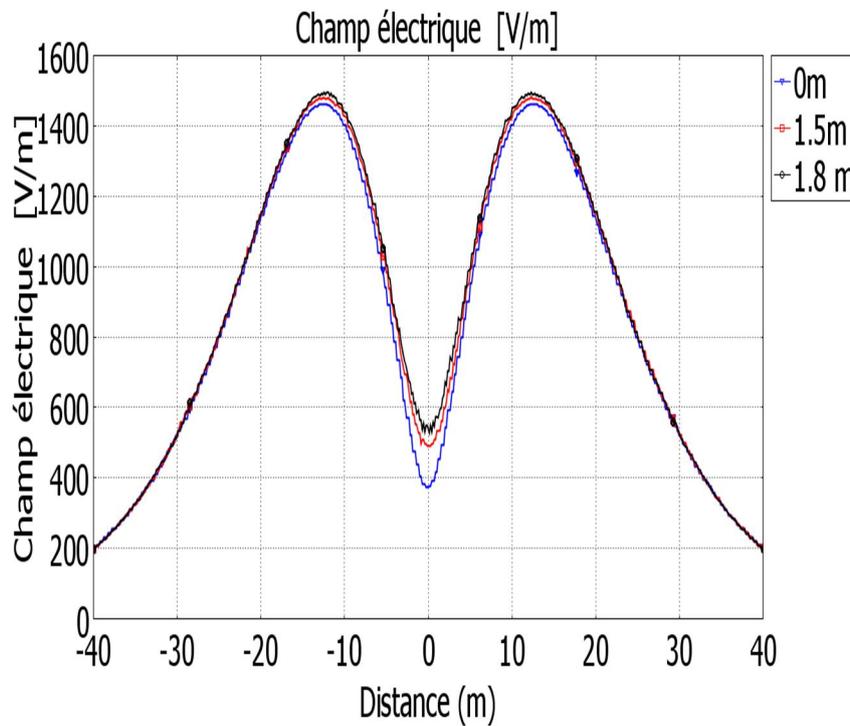


Fig 3.29 : Profils de champ électrique à 0 m, 1.5 m et 1.8 m au-dessus de sol

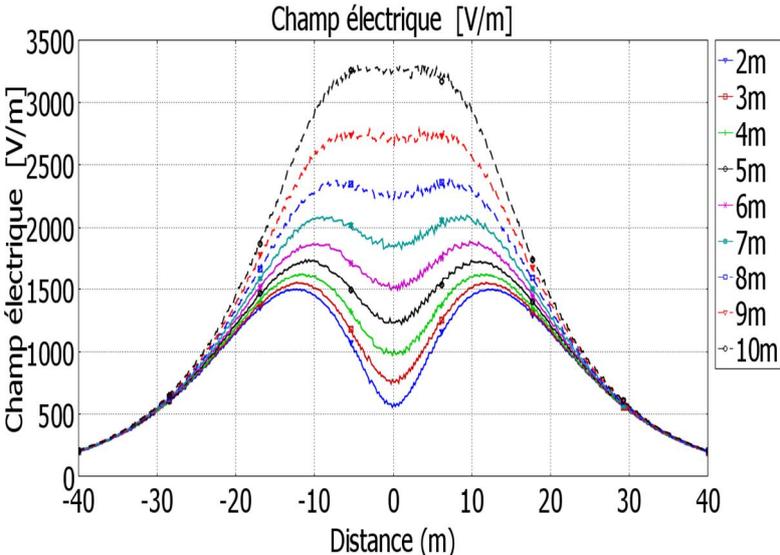


Fig 3.30 : Profils de champ électrique entre 2 à 10 m au-dessus de sol

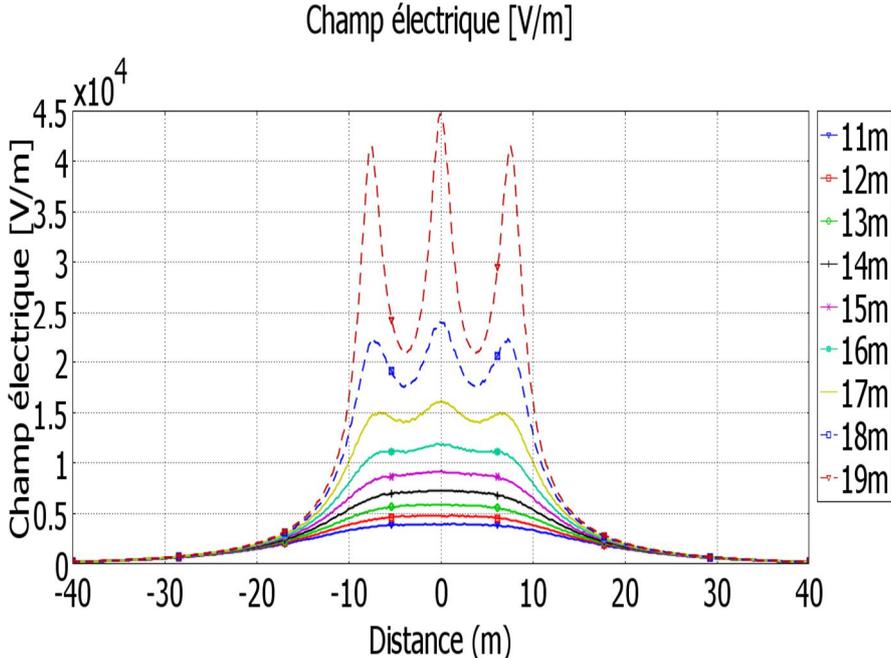


Fig 3.31 : Profils de champ électrique entre 11 à 19 m au-dessus de sol

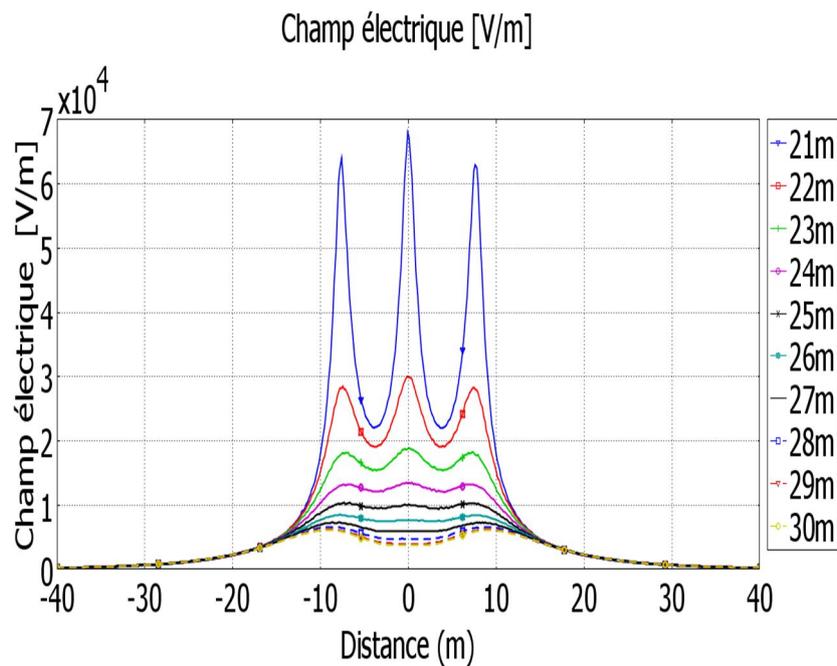


Fig 3.32: Profils de champ électrique entre 21 à 30 m au-dessus de sol

D'après ces courbes nous pouvons remarquer que le champ électrique augmente au fur et à mesure qu'on s'approche des conducteurs de la ligne et diminue lorsqu'on s'éloigne de ces derniers. Les valeurs du champ au voisinage du sol sont suffisamment inférieures aux limites établies, par contre et pour les autres niveaux au-dessus de sol, les intensités des champs sont très importantes.

La même stratégie a été faite pour évaluer le champ magnétique généré par cette ligne.

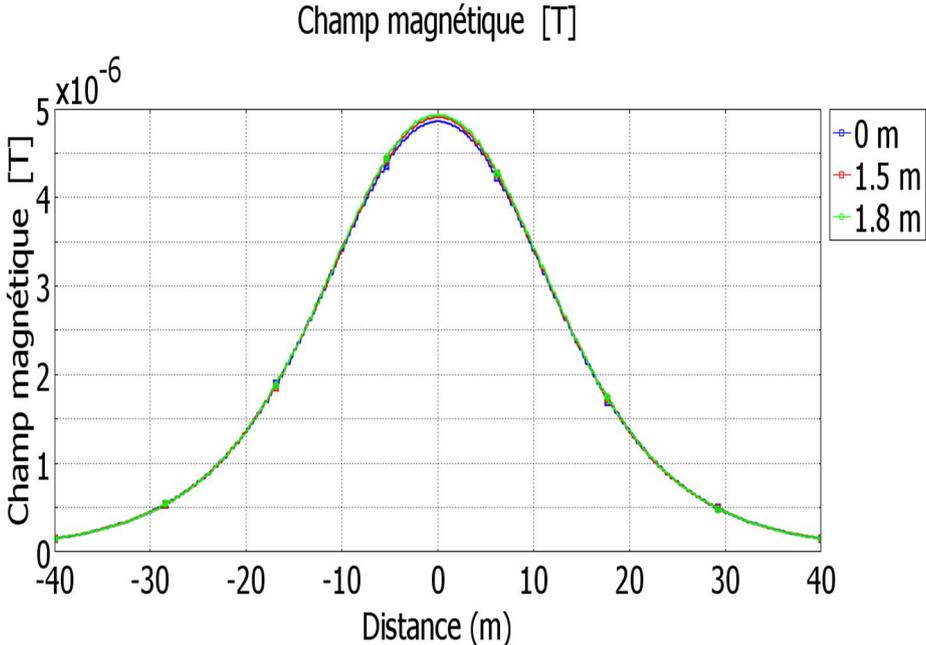


Fig 3.33 : Profils de champ magnétique à 0m, 1.5m et 1.8m au-dessus de sol

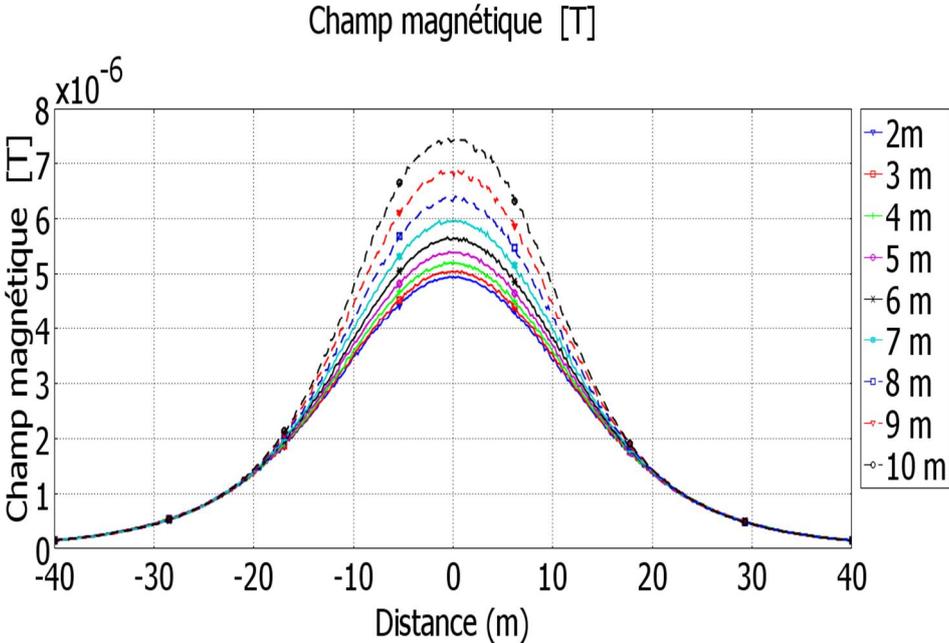


Fig 3.34 : Profils de champ magnétique de 2 à 10 m au-dessus de sol

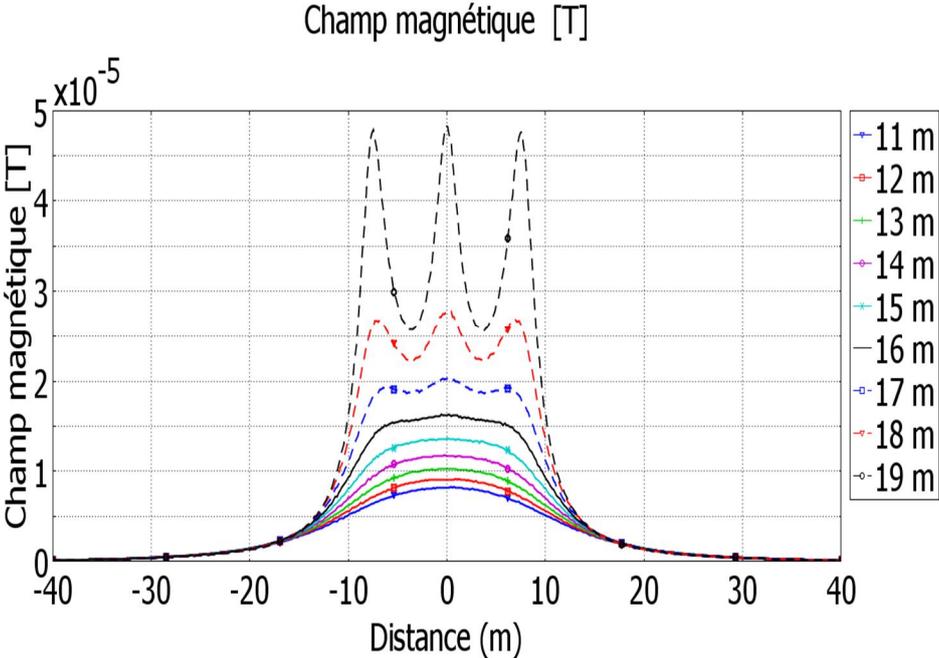


Fig 3.35 : Profils de champ magnétique de 11 à 19 m au-dessus de sol

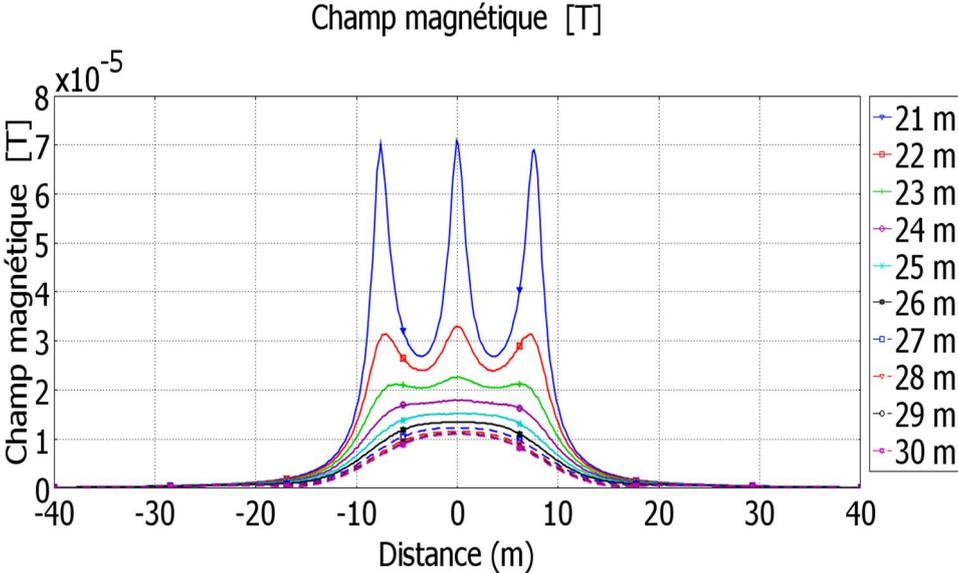


Fig 3.36 : Profils de champ magnétique de 21 à 30 m au-dessus de sol

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

3.7. Influences de plusieurs paramètres sur la distribution de champ électromagnétique

3.7.1. Influence de paramètres physique

3.7.1.1. Impact de la tension sur la distribution de champ électrique

Nous avons gardé la même géométrie de la ligne étudiée précédemment on variant la tension. La figure 3.37 montre les profils de champ électrique au niveau du sol pour trois différents niveaux de tension (220 kV, 90 kV, 60 kV).

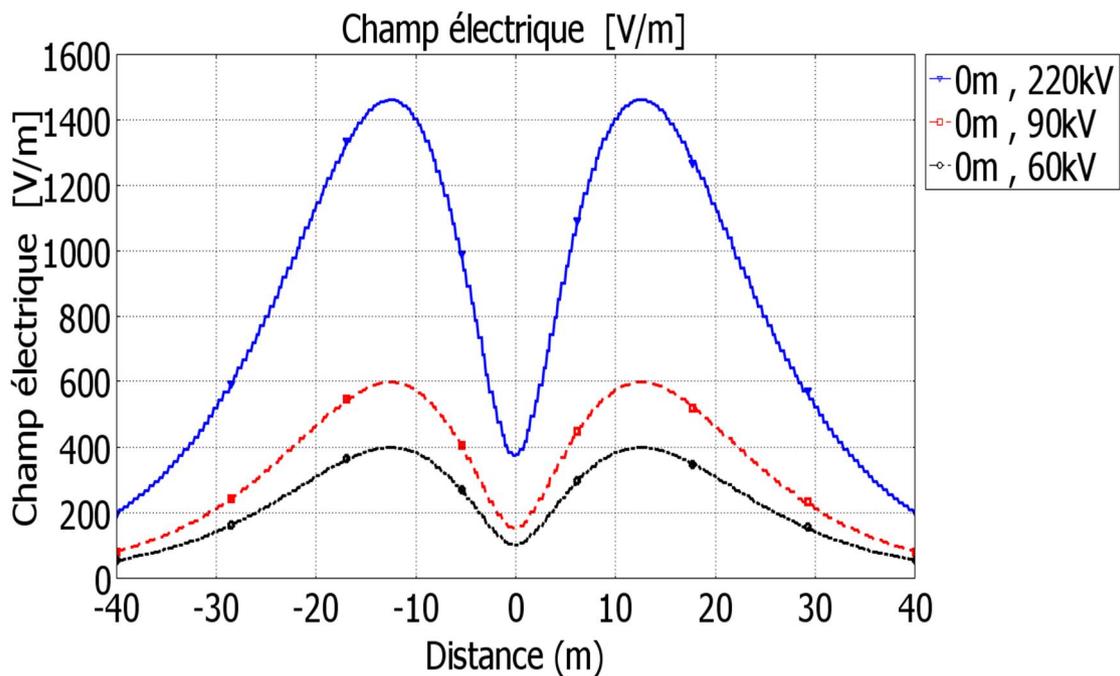


Fig 3.37 : Influence de la tension sur la distribution du champ électrique.

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

3.7.1.2. Impact de courant sur la distribution de champ magnétique

Les courants dans les lignes haute tension sont variables au cours du temps car ils dépendent de la charge. Généralement, les valeurs maximales des courants ont obtenu dans les heures de pointe. La relation entre le courant et le champ magnétique est connue à partir de la loi d'ampère (le champ magnétique augmente avec l'augmentation de courant). Nous avons confirmé cette relation en variant les niveaux des courants de la ligne (Fig 3.38).

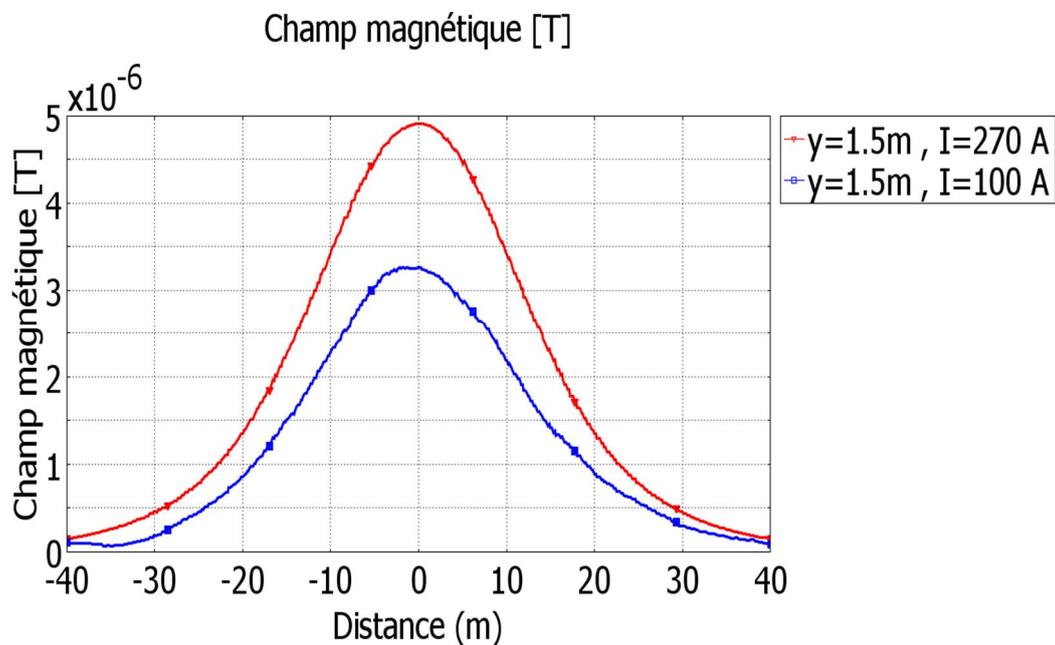


Fig 3.38: Influence des courants dans les phases sur la distribution du champ magnétique.

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

3.7.1.3. Influence de la géométrie de la ligne :

➤ configuration de phase

La Figure 3.40 présente les profils des champs électriques obtenus au niveau du sol pour trois configurations différentes d'une ligne de tension (220 kV) comme suivante :

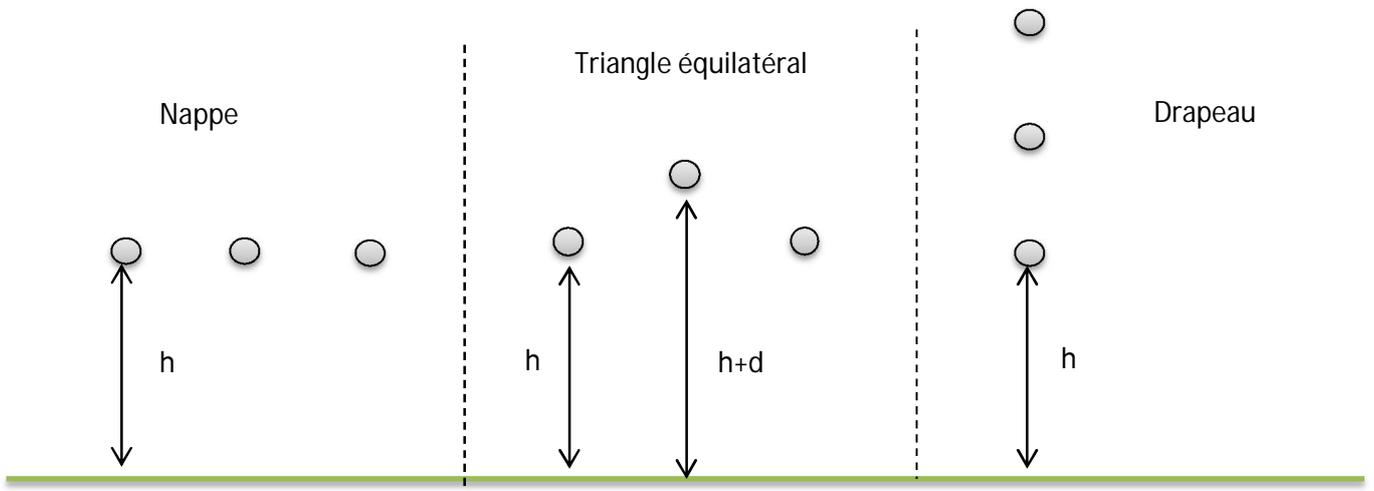


Fig 3.39: Dispositions des phases

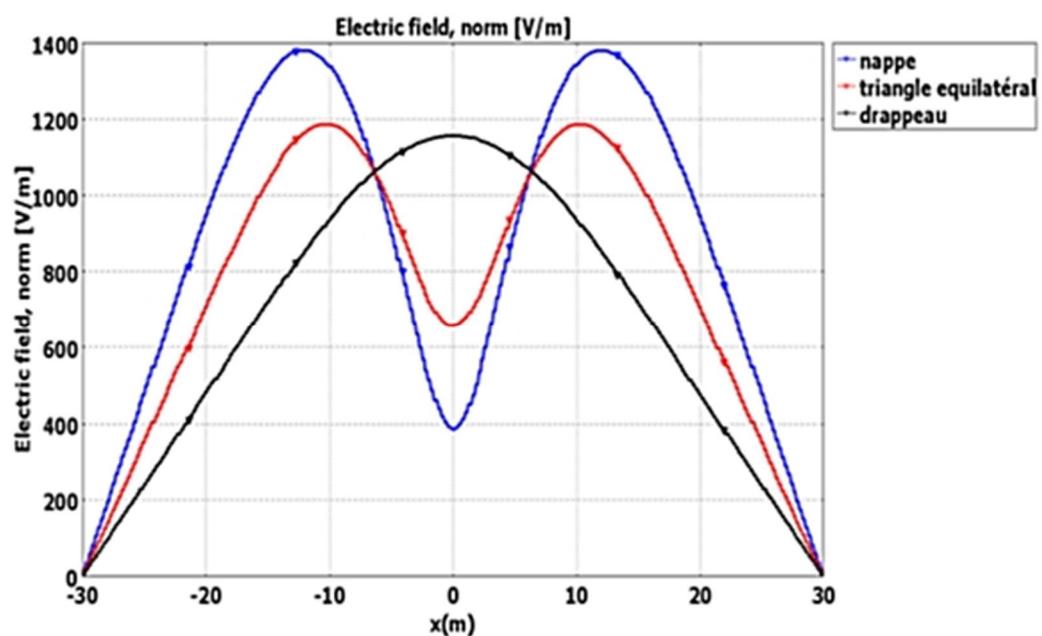


Fig 3.40 : Influence de la disposition de phases sur la distribution du champ électrique.

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

3.8. Cas de deux lignes 220 kV parallèles :

La même stratégie a été utilisée pour calculer les champs générés par un modèle de deux lignes 220 kV parallèles (Fig 3.41) qui possèdent la même géométrie. Les deux lignes ont été assemblées dans le même domaine d'étude gardant les mêmes conditions aux limites présenté dans les figures 3.20 et 3.21.

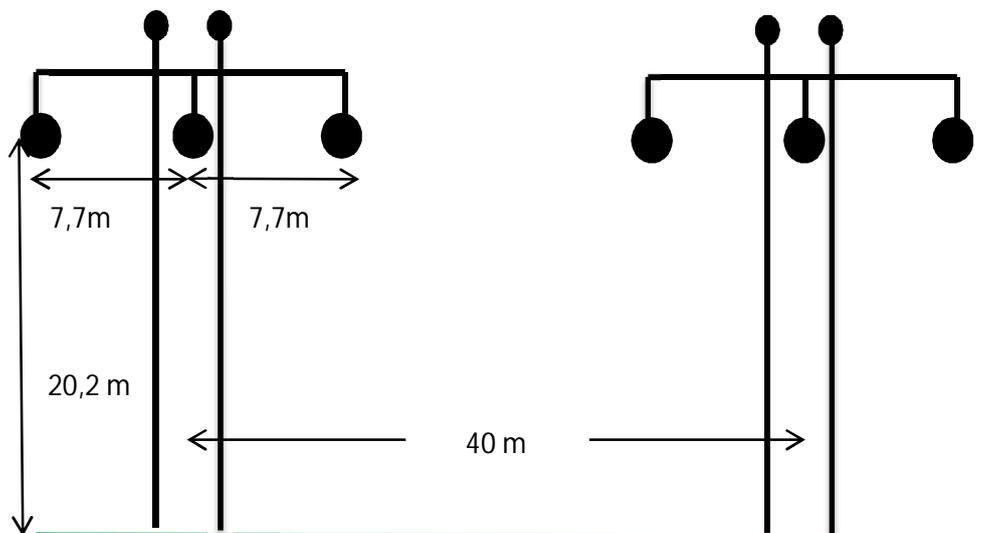


Fig 3.41 : Modèle de deux lignes haute tension 220 kV parallèles

➤ Résultats de simulation :

Les Figures (3.42-3.45) et (3.46-3.49) présentent les profils du champ électrique et magnétique généré par ces deux lignes, respectivement.

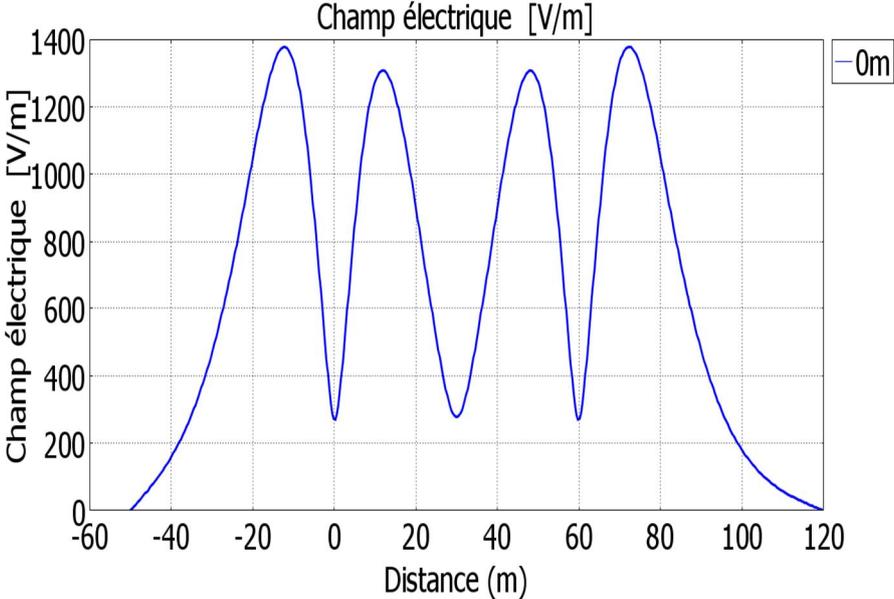


Fig 3.42 : Profil du champ électrique au niveau du sol

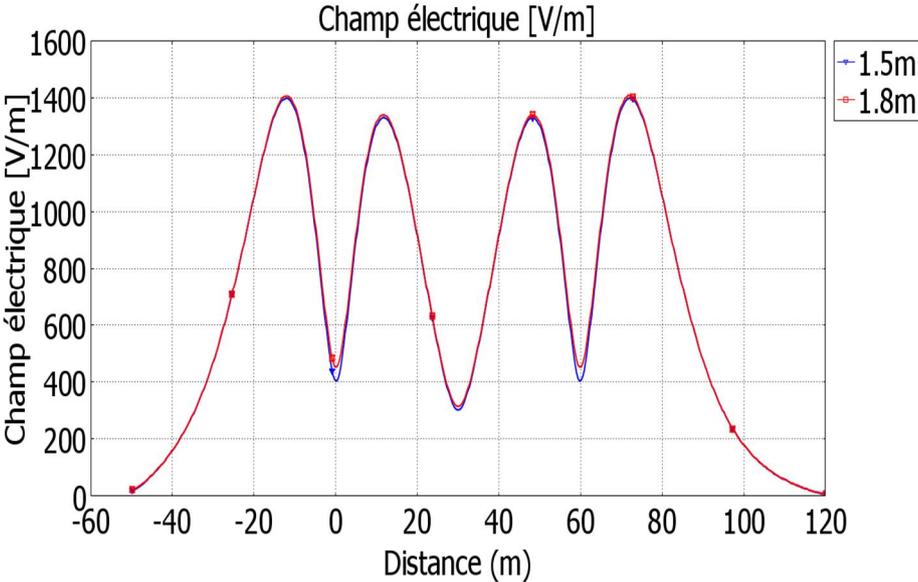


Fig 3.43 : Profils du champ électrique à 1.5 m et 1.8 m au-dessus du sol

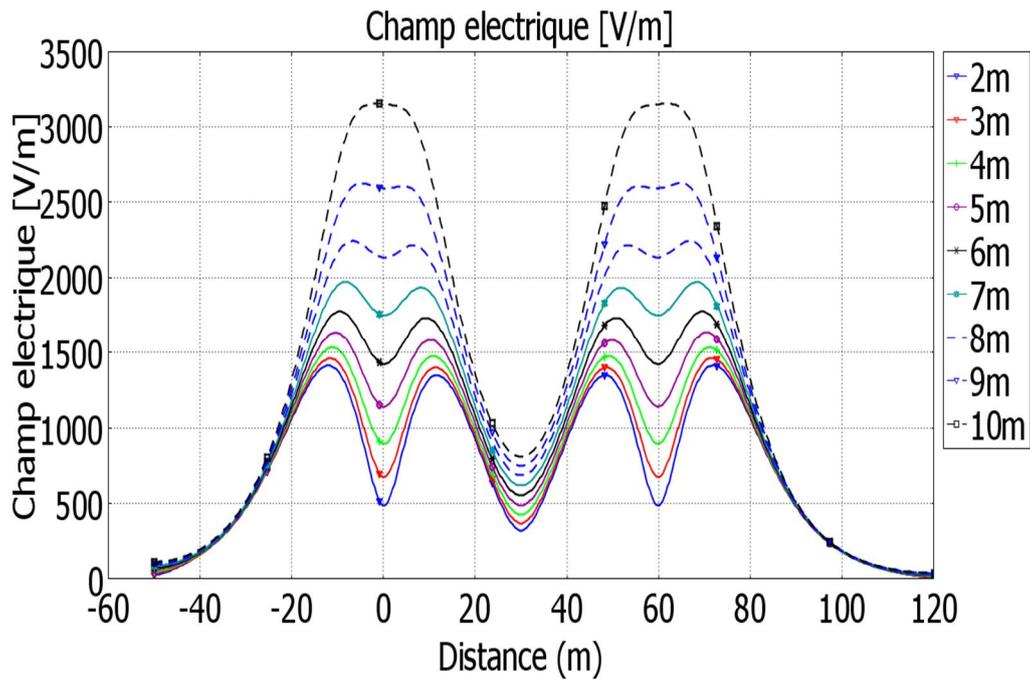


Fig 3.44 : Profils du champ électrique de 2 m à 10 m au-dessus du sol

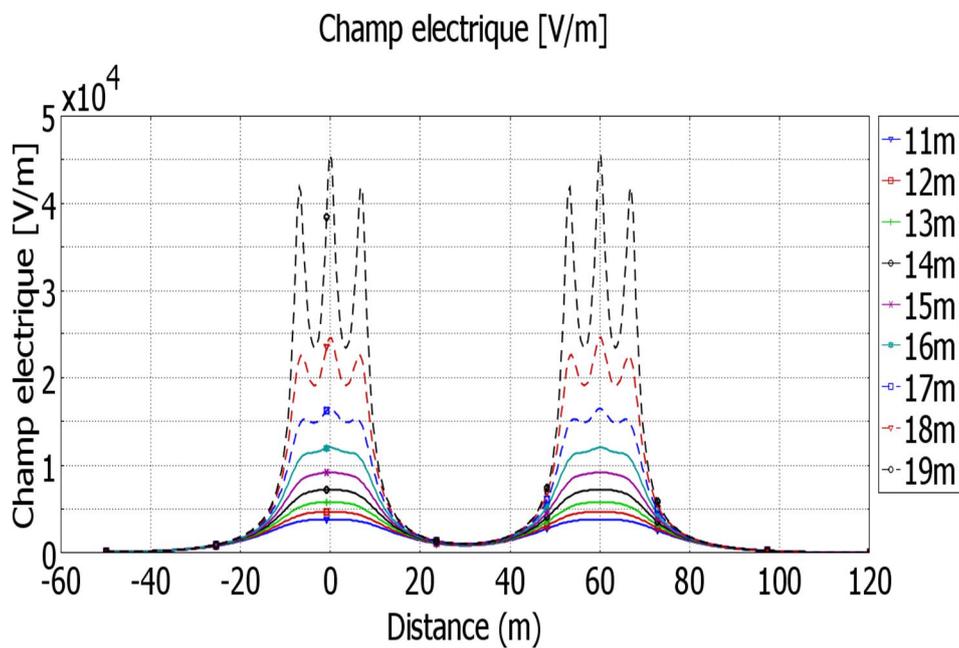


Fig 3.45 : Profils du champ électrique de 11 à 19 m au-dessus du sol

Chapitre 3 - Méthodes et calculs des champs électromagnétiques au voisinage des lignes haute tension

Nous observons que les plus grandes intensités de champ électrique sont concentrées dans les zones proches des conducteurs des deux lignes et les valeurs minimales sont trouvées dans la zone entre les deux lignes parallèles. Nous pouvons considérer cette zone comme une zone de couplage entre les deux lignes voisine d'où ce couplage est proportionnel à la distance par rapport à la source (les conducteurs des deux lignes haute tension). Pour l'exposition d'un être humain en contact parfait avec le sol (dans le cas où l'être humain « se promène au-dessous ou à proximité d'une ligne haute tension), les valeurs des champs sont inférieures aux limites établies par les normes (5kV/m).

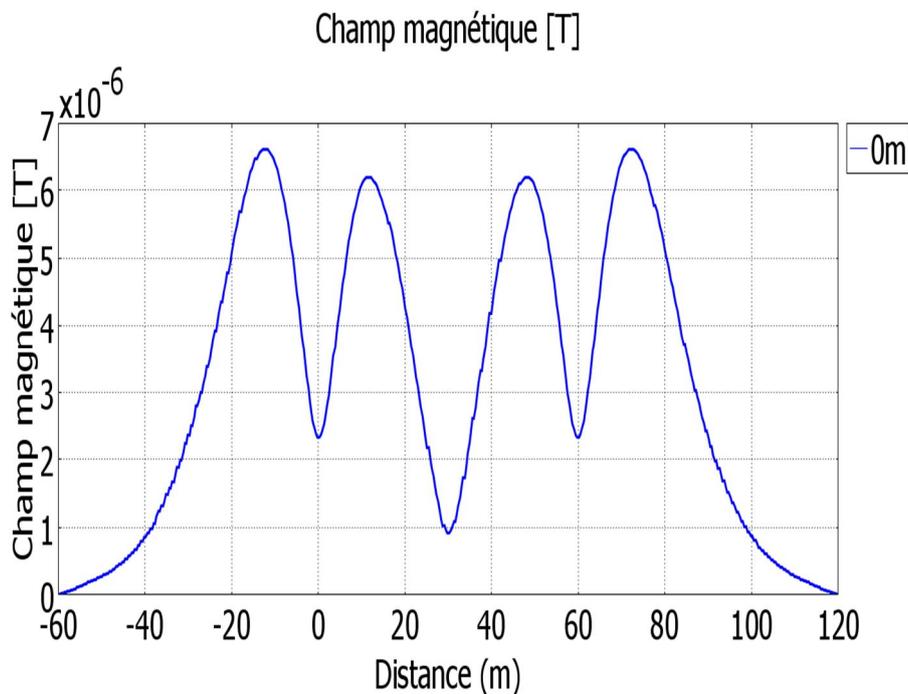


Fig 3.46 : Profil de champ magnétique au niveau du sol

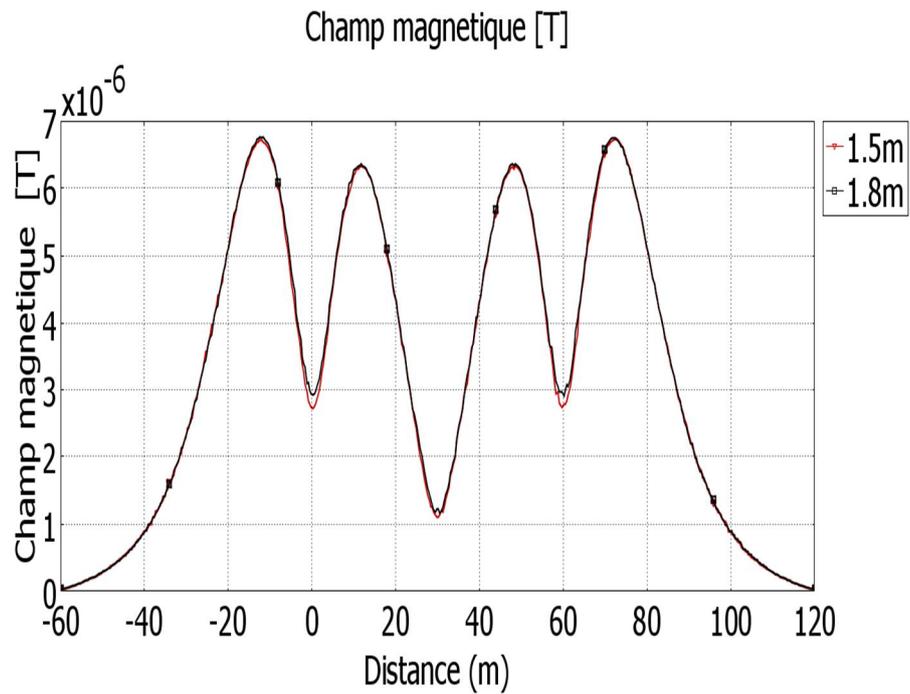


Fig 3.47 : Profils de champ magnétique à 1.5 m et 1.8 m au-dessus du sol

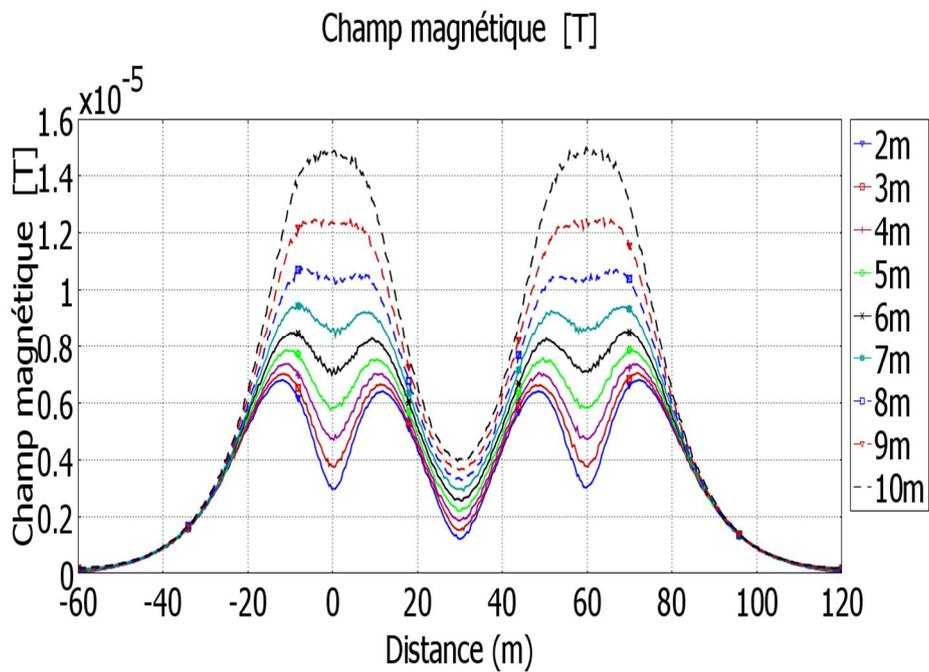


Fig 3.48 : Profils de champ magnétique de 2 à 10 m au-dessus du sol

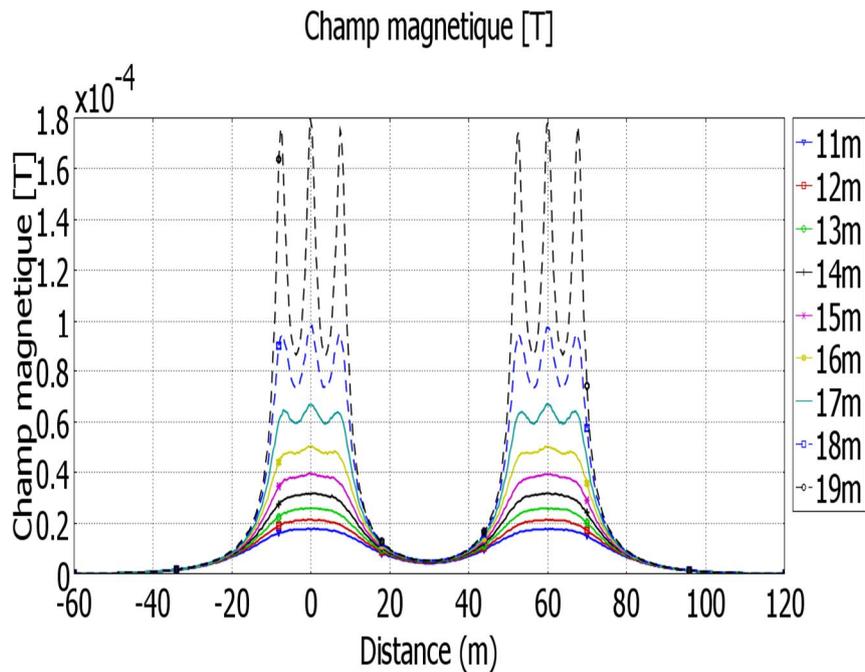


Fig 3.49 : Profils de champ magnétique de 11 à 19 m au-dessus du sol

La même chose concernant le champ magnétique sauf que ces valeurs pour un courant de 270 A et pour les niveaux proches du sol restent loin des limites établies par les normes internationales. Pour les autres niveaux (proches des conducteurs), les valeurs sont énormes en comparaison avec les normes.

3.9 . Cas de 6 lignes parallèles :

Nous avons évalué numériquement le champ électromagnétique basse fréquence généré par un système complexe réel contient 6 lignes 60 kV parallèles (Fig 3.50).

Cette étude permet d'analyser le comportement des champs électromagnétiques générés par ce système dans une zone de forte population.



Fig 3.50 : Le modèle étudié (6 lignes parallèles)

La tension dans toutes les lignes est de 60 kV, la distance entre les axes de deux pylônes voisins est de 10 m. Les conducteurs de lignes (**A-B-C-D**) ont la même hauteur au-dessus du sol (20 m), la hauteur de conducteurs des lignes (**E-F**) est de 15 m. La distance entre les lignes de phase est 3m. La section de chaque conducteur est de 366 mm^2 .

Les courants dans les conducteurs des lignes sont enregistrés par les appareils de contrôle du poste (El-Hadjar- Annaba, Algérie). A un moment donné, des courants de: 60 A, 55 A, 70 A, 80 A, 51 A et 54 A, circulent respectivement dans les conducteurs des lignes électriques (**A-B-C-D-E-F**). La figure 3.49 montre un schéma simple du modèle.

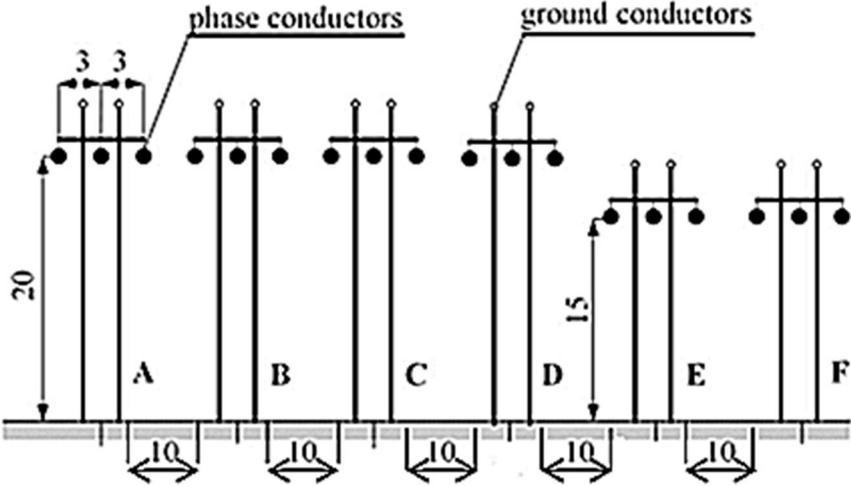


Fig 3.51 : Géométrie du modèle étudié

Les conditions aux limites utilisées pour le calcul des deux champs électriques et magnétiques sont représentées dans les figures 3.52 et 3.53, respectivement.

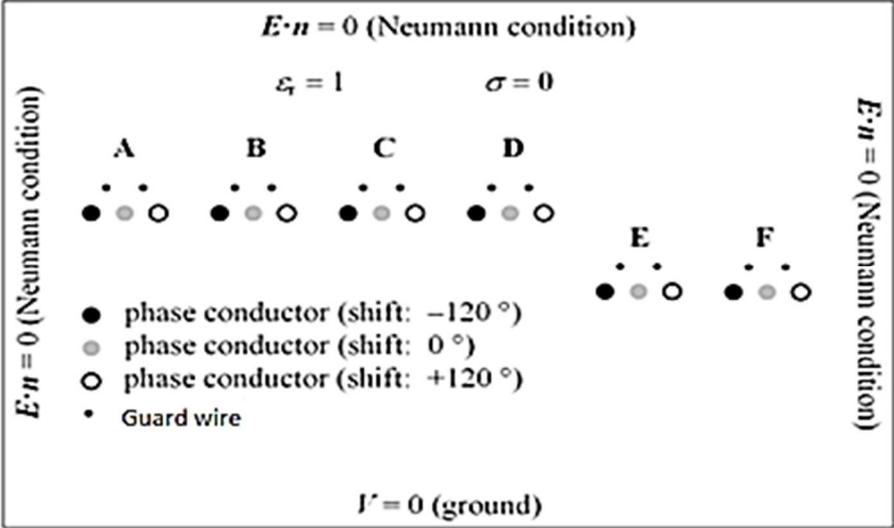


Fig 3.52 : Conditions aux limites, calcul du champ électrique

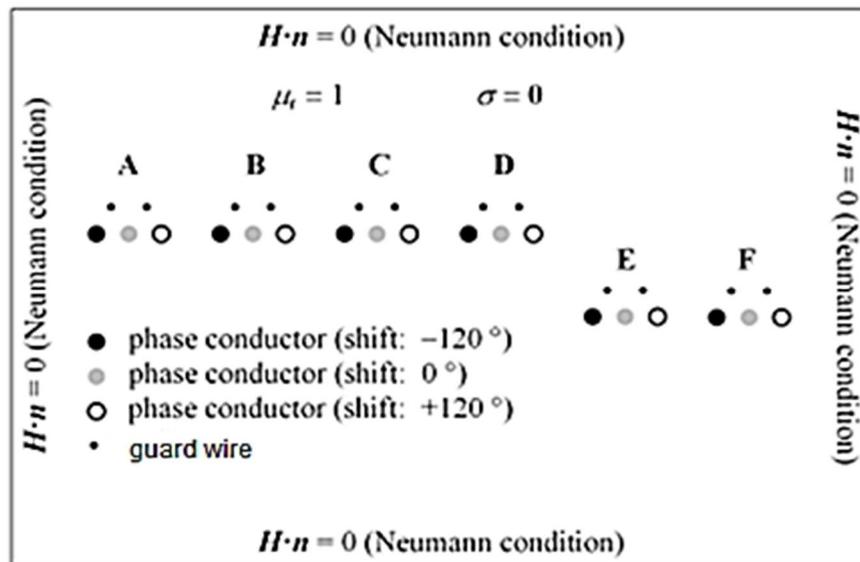


Fig 3.53 : Conditions aux limites, calcul du champ magnétique

3.9.1. Résultats et discussion

Les résultats montrent les profils latéraux de champ électrique et magnétique à plusieurs niveaux au voisinage des lignes (A-B-C-D-E-F).

Le point de départ ($x = 40$ m) représente la distance à gauche de l'axe de pylône de la ligne A ($x = 0$ m), les champs électrique et magnétique ont été calculés à une distance longitudinale jusqu'à 160 m du point de départ avec un incrément $\Delta x = 20$ m.

3.9.1.1. Comportement du champ électrique

La figure 3.54 montre le profil de champ électrique pour les trois niveaux suivants : le sol (0 m), l'exposition du cœur (1,5 m), l'exposition du cerveau (1,8 m).

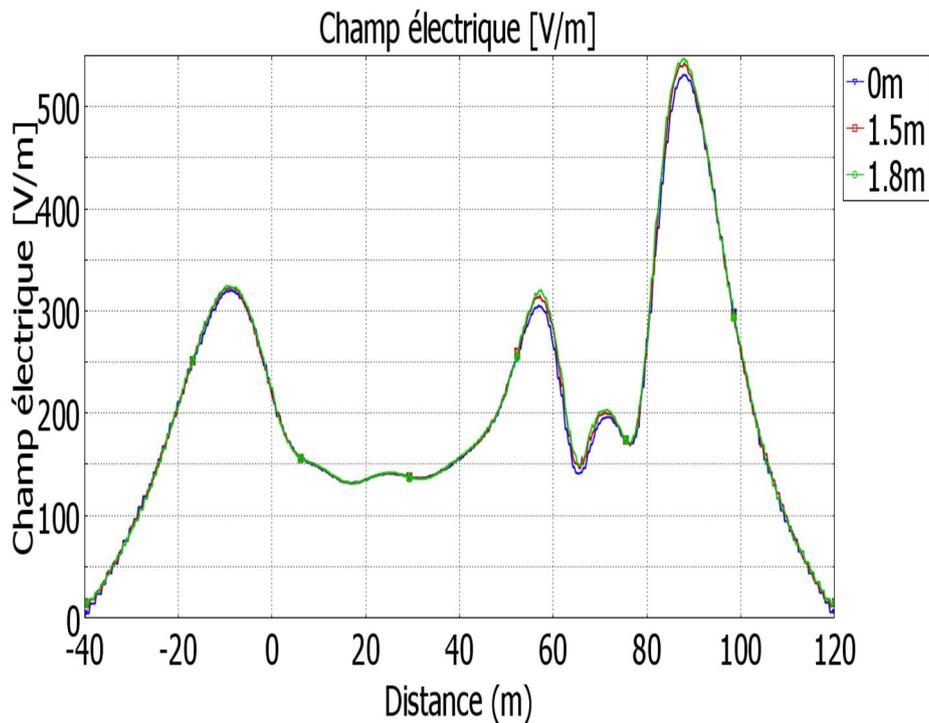


Fig 3.54 : Profils du champ électrique pour les trois niveaux (0 m-1,5 m-1,8 m)

La valeur du champ électrique augmente avec l'augmentation de la distance au-dessus du sol. La valeur maximale obtenue est égale à 520 V / m; il est évident à partir des courbes de la figure 3.54 que la valeur la plus élevée a été observée à proximité des lignes (E-F), qui ont la plus basse hauteur (15 m).

Autres niveaux au-dessus du sol sont étudiés; la figure 3.55 montre le profil de champ électrique à (12m-14m) au-dessus du sol.

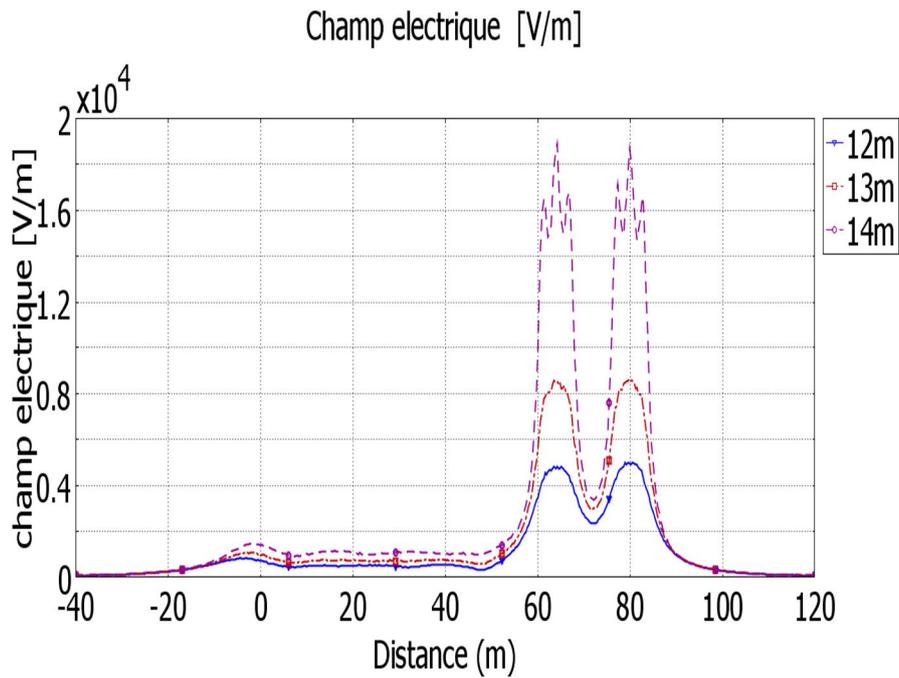


Fig 3.55 : Profils du champ électrique à (12m-14m)

On observe que la distribution de champ électrique est fortement distribuée, en particulier sous les conducteurs des lignes **E** et **F**. La valeur maximale du champ est de 18,5 kV/m à 14 m au-dessus du sol.

D'autres niveaux au-dessus du sol (16m-19m) sont considérés (figure 3.56).

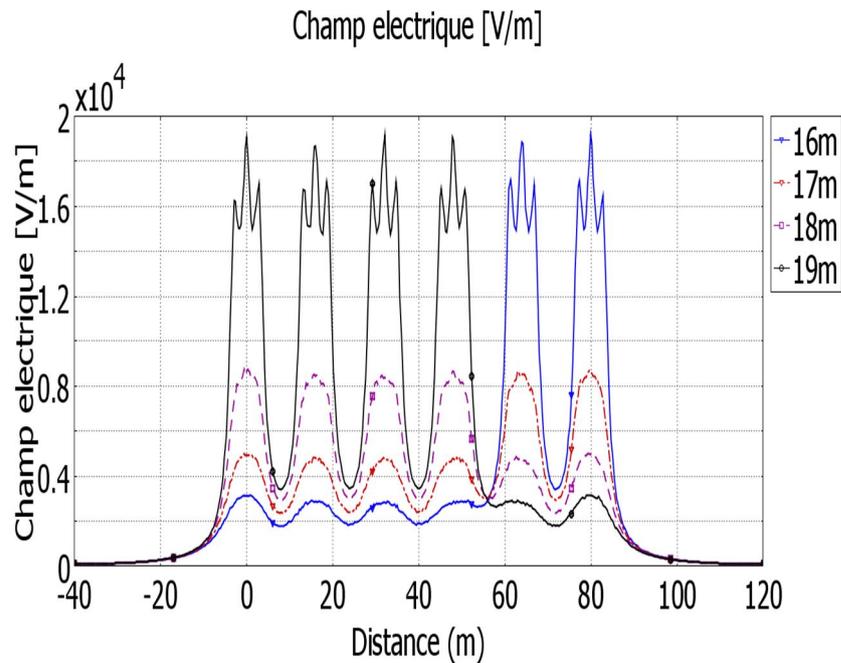


Fig 3.56 : Profils du champ électrique à (16 m-19 m)

L'interprétation de la figure 3.56 peut être divisée en deux parties:

- Pour les niveaux 16 m et 17 m, la distribution de champ électrique à proximité des lignes **E** et **F** est beaucoup plus importante par rapport à d'autres lignes, cela est dû à l'effet de proximité des conducteurs de ces deux lignes. Il est noté que la valeur du champ électrique est identique à ci-dessus et en dessous des lignes **E** et **F**, en prenant ces conducteurs comme axes de symétrie. Dans ce cas, les profils de champ électrique à $y = 16$ m et $y = 17$ m sont respectivement similaires que ceux aux niveaux 13 m et 14 m.
- Pour les niveaux 18 m et 19 m, les valeurs du champ électrique entourant les lignes de **A-B-C** et **D** sont plus importantes et atteignent la valeur maximale de 18,5 kV / m pour le niveau 19 m.

3.9.1.2. Comportement du champ magnétique

La même stratégie est utilisée pour évaluer le champ magnétique.

La figure 3.57 montre les profils latéraux des champs magnétiques à 0 m, 1,5 m et 1,8 m au-dessus du sol.

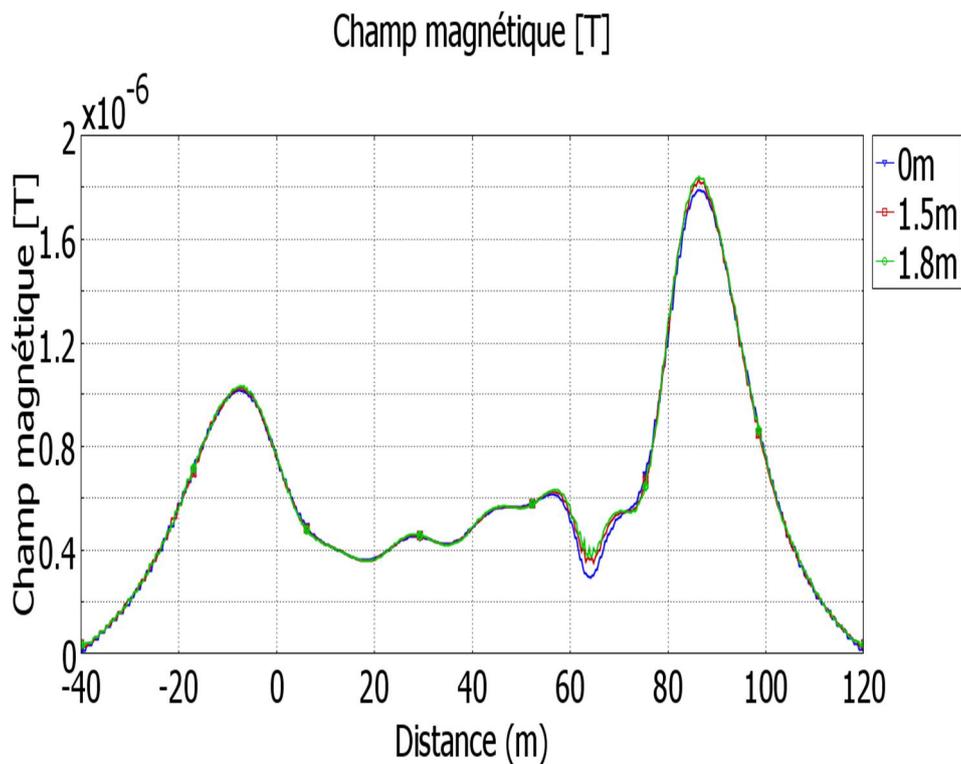


Fig 3.57 : Profils du champ magnétique (0 m-1,5 m-1,8 m)

La valeur de crête du champ magnétique à (1,8 μ T) est obtenue dans la région proche des lignes **E** et **F** à 1,8 m au-dessus du sol.

La figure 3.58 montre la distribution de champ magnétique entre 12 et 14 m au-dessus du sol.

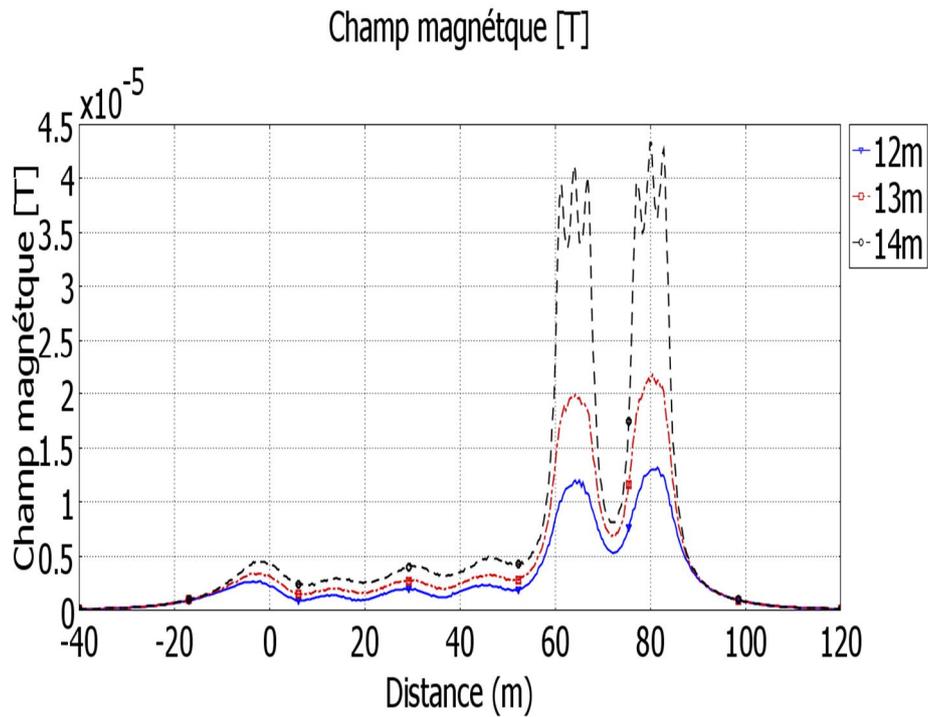


Fig 3.58 : Profils du champ magnétique pour les niveaux (12m-14m).

Dans ce cas à proximité des lignes **E** et **F**, la distribution du champ magnétique produit par ces lignes est très élevée par rapport aux autres lignes, la valeur maximale ($44 \mu\text{T}$) du champ magnétique est obtenue sous la phase centrale de la ligne **F**.

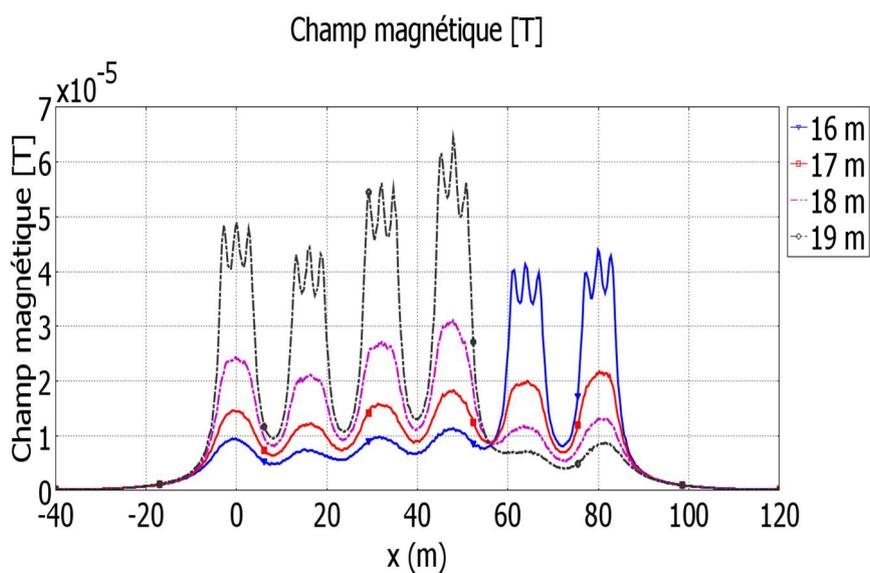


Fig 3.59 : Profils du champ magnétique pour les niveaux (16 m-19 m)

Pour les niveaux 16 et 17 m, la distribution du champ magnétique sous les lignes (**A-B-C-D**) augmente, mais elle garde la même allure que celle des niveaux 13 et 14 m comme le montre la figure 3.58.

Pour les niveaux 18 et 19 m, le champ magnétique est plus élevé sous les lignes (**A-B-C-D**). Il est clair que le champ magnétique dépend du courant qui circule dans les conducteurs de lignes électriques et atteint sa valeur maximale ($65 \mu\text{T}$) sous la phase centrale de la ligne **D** qui possède le courant le plus élevé (80 A).

3.10. Evaluation du champ électromagnétique généré par une ligne ouverte

Nous avons effectué une étude des champs électromagnétiques supposons le cas d'une ligne ouverte de 400 kV, d'une longueur de 120 Km, dont ces caractéristiques géométriques sont présentées précédemment dans la figure (3.17). Dans ce cas, un phénomène de surtension très important est apparu, il s'agit de « l'effet ferranti », on conçoit donc bien que la tension sera plus élevée en extrémité de la ligne et que cette augmentation sera donc d'autant plus importante que la ligne soit plus longue. Ce phénomène peut sembler paradoxal: les lignes électriques sont habituellement connues pour leur " chute de tension" lorsqu'elles sont parcourues par un courant, mais lorsqu'elles ne sont pas parcourues par aucun courant ou le courant est très faible, le phénomène est inversé [126].

3.10.1. Régions de calculs

Les calculs ont été effectués dans trois régions: (1) dans le voisinage de la première extrémité de la ligne; (2) dans les environs de la moitié de la longueur de la ligne (60 Km qui signifie à partir de l'axe de pylône situé à la mi-distance); dans le voisinage de la dernière extrémité (120 Km qui signifie à partir de l'axe du dernier pylône) (Fig 3.60).

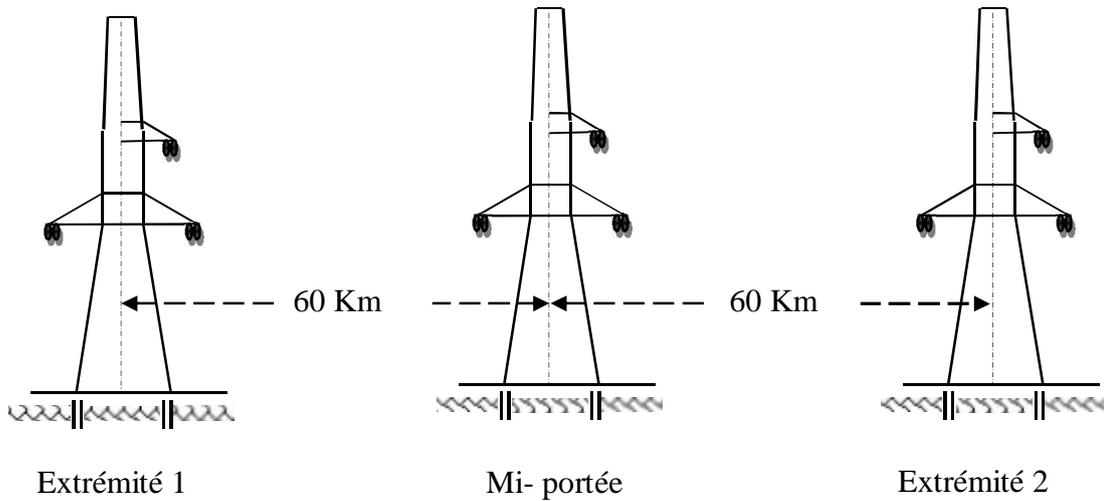


Fig 3.60 : Régions de calculs

3.10.2. Calcul numérique

Une ligne est un élément à constantes réparties que nous pouvons imaginer comme constituée d'une échelle de cellules élémentaires : inductance série, capacité parallèle figure 3.61.

Chaque cellule est constituée d'un circuit résonnant dont le gain est très légèrement supérieur à l'unité [127,129] .On conçoit donc bien que la tension sera plus élevée en extrémité de ligne et que cette augmentation sera donc d'autant plus importante que la ligne soit plus longue.

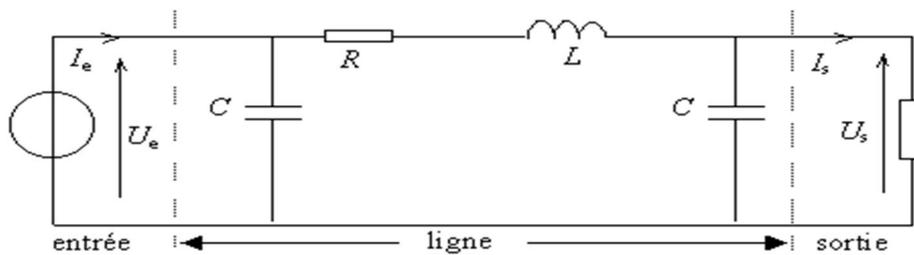


Fig 3.61 : Schéma équivalent : Ligne à paramètres distribués.

Chapitre 3 - Méthodes et calculs des champs électromagnétiques au voisinage des lignes haute tension

Ce résultat peut d'ailleurs se montrer rigoureusement à partir des équations du télégraphiste de la ligne considérée comme quadripôle [130] :

$$V(x) = V_0 \cdot \text{ch} \gamma x - Z_c \cdot I_0 \cdot \text{sh} \gamma x \quad (3.26)$$

$$I(x) = I_0 \cdot \text{ch} \gamma x - \frac{1}{Z_c} V_0 \text{sh} \gamma x \quad (3.27)$$

V, I : le courant et la tension à l'abscisse (x).

V_0, I_0 : le courant et la tension à l'origine.

Z_c : impédance caractéristique : $z_c = \sqrt{\frac{R+j\omega L}{G+j\omega C}}$.

Γ : Coefficient de propagation : $\gamma = \sqrt{(R + j\omega L)(G + j\omega C)}$

Et : $\omega = 2\pi f$.

Dans la deuxième extrémité de la ligne ($x=l$) ; le courant égal zéro : alors on déduit à partir de (3.25) :

$$I_0 \text{ch} \gamma l = \frac{1}{z_c} V_0 \text{sh} \gamma l \quad (3.28)$$

Puis :

$$V(l) = V_0 \text{ch} l - V_0 \frac{\text{sh}^2 \gamma l}{\text{ch} \gamma l} = V_0 \frac{1}{\text{ch} \gamma l} \quad (3.29)$$

γ est suffisamment petite ; l'équation peut se limiter à son développement en second ordre ; comme suit :

$$V(l) \approx V_0 \left(1 + \frac{\gamma^2 l^2}{2} \right) \quad (3.30)$$

En première approximation : $G=0$ and, R petit ; alors :

$$Z_c = \sqrt{\frac{L}{C}} \text{ et } \gamma = \frac{R}{Z_c} + j\omega\sqrt{LC} \quad (3.31)$$

On déduit donc :

$$V = V_0 (1 + 5, 5 \cdot 10^{-7} \cdot L^2) \quad (3.32)$$

L'analyse de la formule (3.32) nous permet de faire un programme informatique Matlab pour calculer les valeurs de la tension le long de la ligne (Fig.3.62).

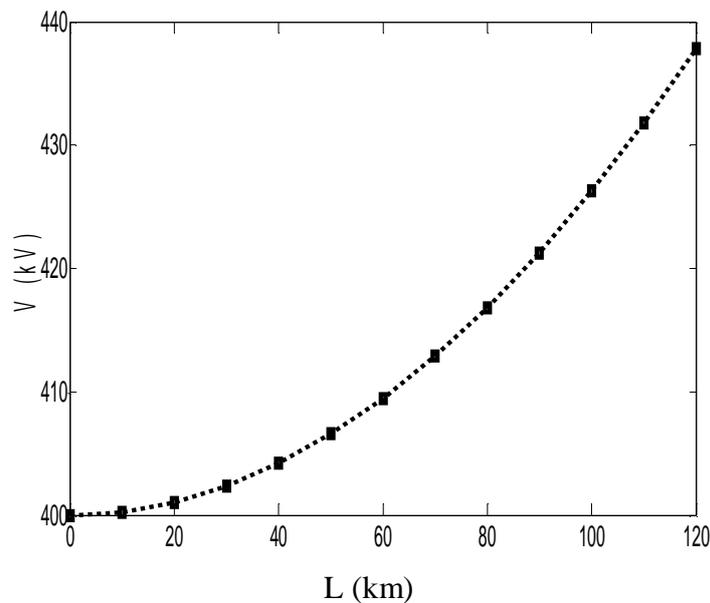


Fig 3.62 : Augmentation de la tension de la ligne.

Les tensions qui doivent être considérées dans le calcul du champ électrique sont :

- $V_1 = 400$ kV (au voisinage de la première extrémité).
- $V_2 = 409.4585$ kV (au voisinage du mi- portée).
- $V_3 = 437.8341$ kV (au voisinage de la dernière extrémité).

3.10.3. Résultats et discussion

La figure 3.63 représente les profils du champ électrique obtenu suivant le protocole proposé dans la section ci-dessus.

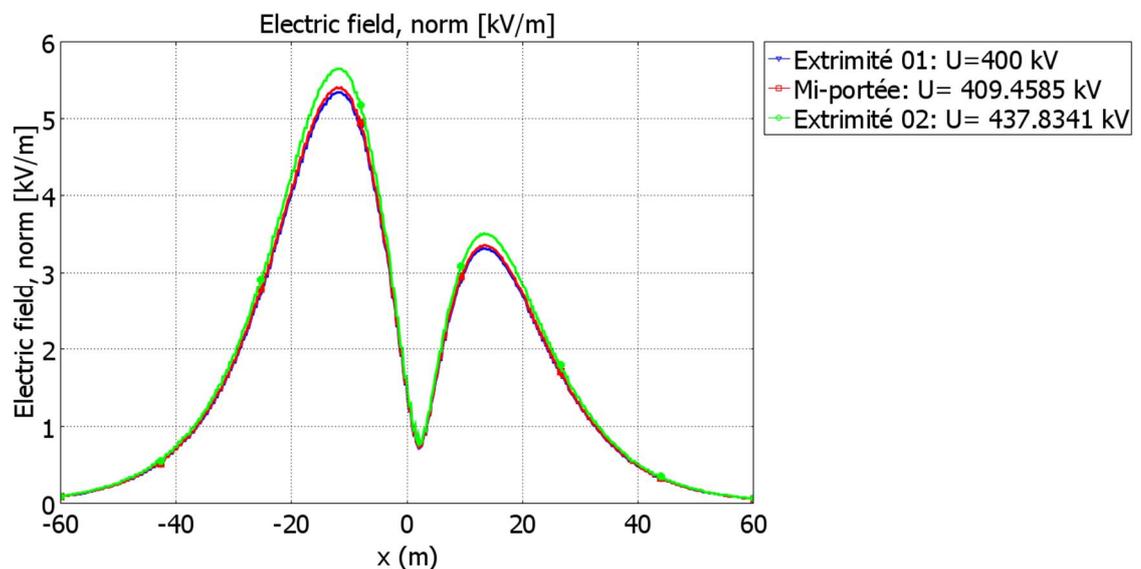


Fig 3.63 : Profils du champ électrique pour les régions (extrémité 01, extrémité 02, mi-portée).

Les valeurs des champs électriques augmentent avec l'augmentation de la tension dans les différents endroits étudiés due à l'effet Ferranti.

Dans les trois cas étudiés, des valeurs très importantes de champ électrique qui dépassent les consignes de sécurité (5 kV / m), ont été enregistrées. Plus loin de la ligne, les intensités de champs électriques diminuent rapidement.

3.11. Influence des obstacles sur la distribution du champ électrique

Pour voir les effets des obstacles involontaires sur la distribution du champ électrique, nous avons installé une barre d'acier à 20 m d'une ligne à haute tension de 220 kV (Fig 3.64).

La conductivité de l'acier est $\sigma = 4,032e^6$ S/m.

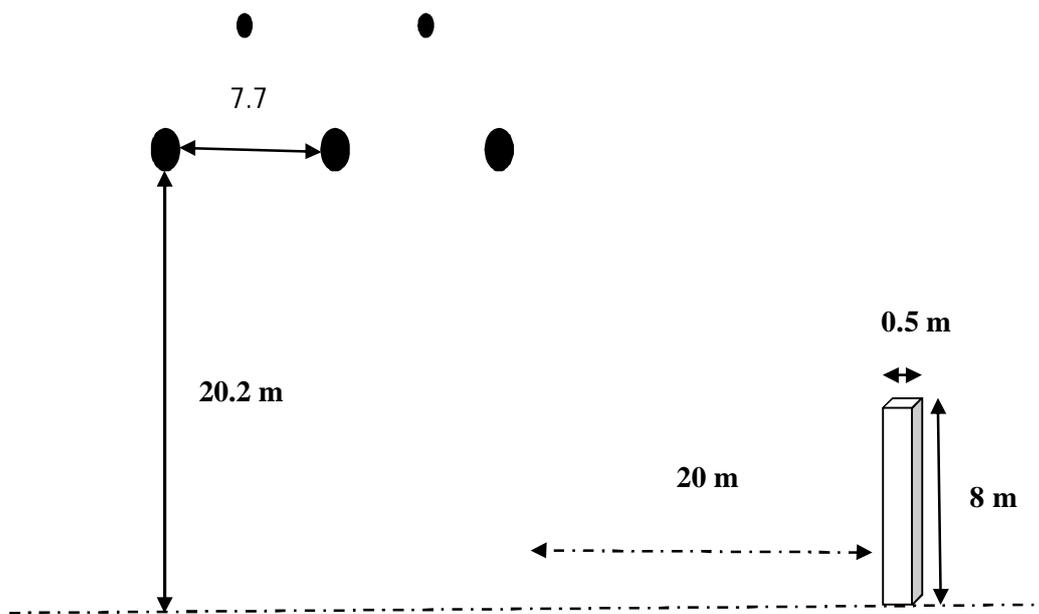


Fig 3.64 : Ligne 220 kV avec obstacle métallique

Les résultats de simulation montrent la différence entre le champ électrique généré avec et sans obstacle (Fig 3.65).

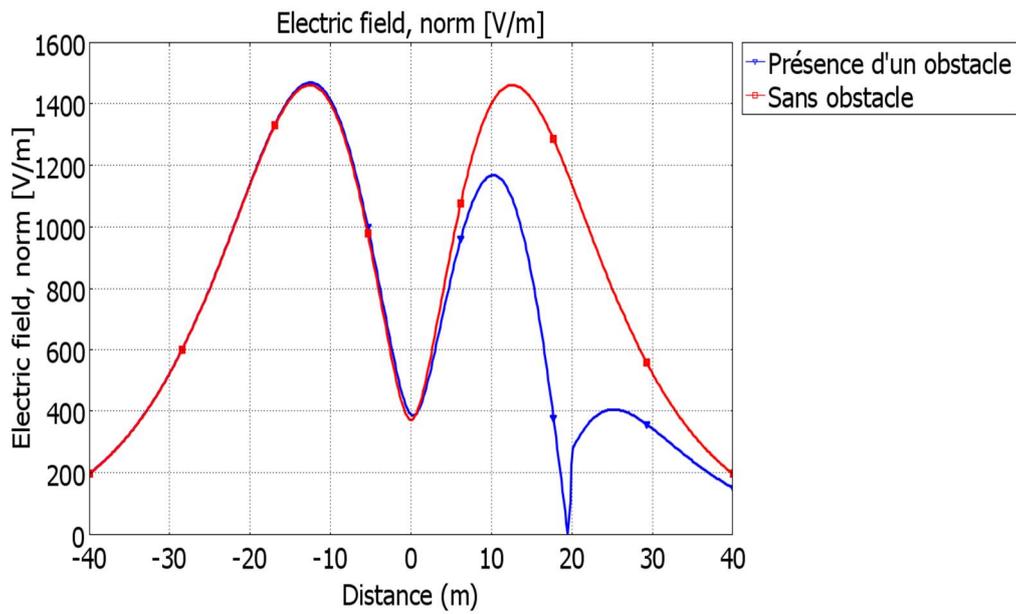


Fig 3.65 : Profil du champ électrique avec et sans obstacle

A la présence de l'obstacle, le champ électrique diminuait énormément en comparaison avec le cas de l'absence de ce dernier, dans l'endroit où l'obstacle est installé, la diminution est de plus en plus importante.

Nous avons réitéré la même expérience pour le cas de deux lignes parallèles (Fig3.66).

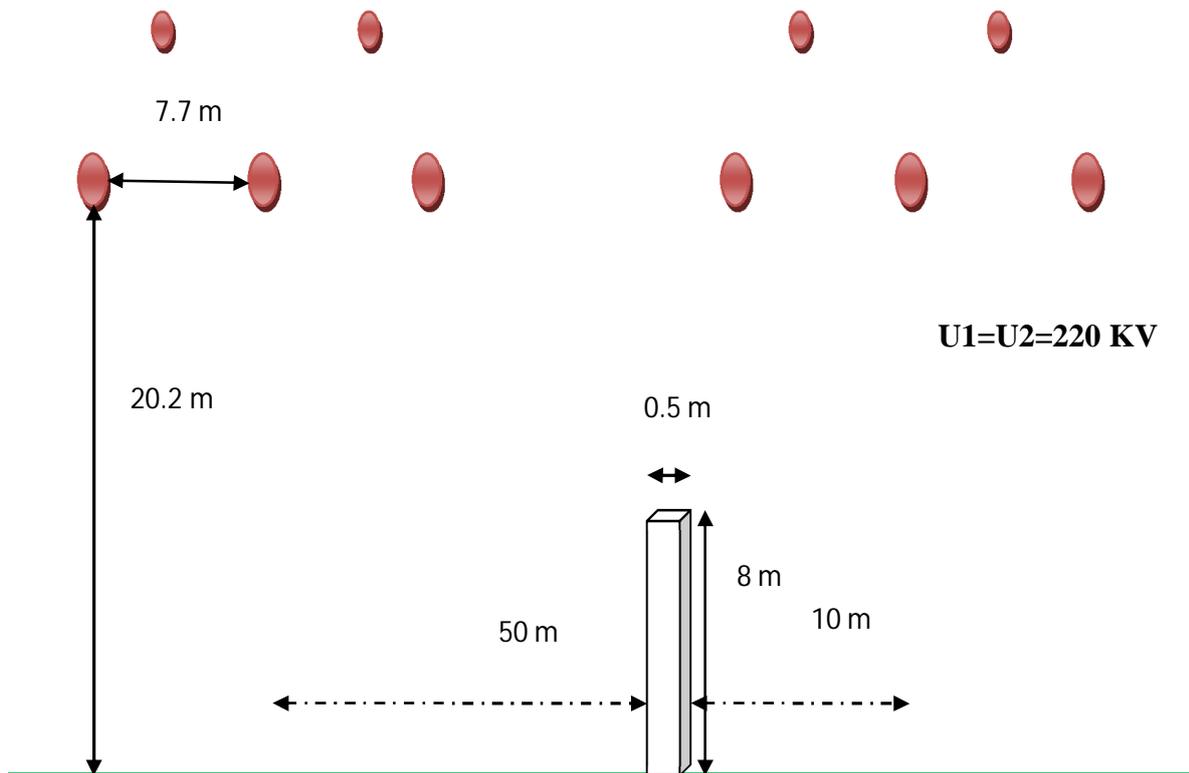


Fig 3.66 : Deux lignes parallèles avec un obstacle.

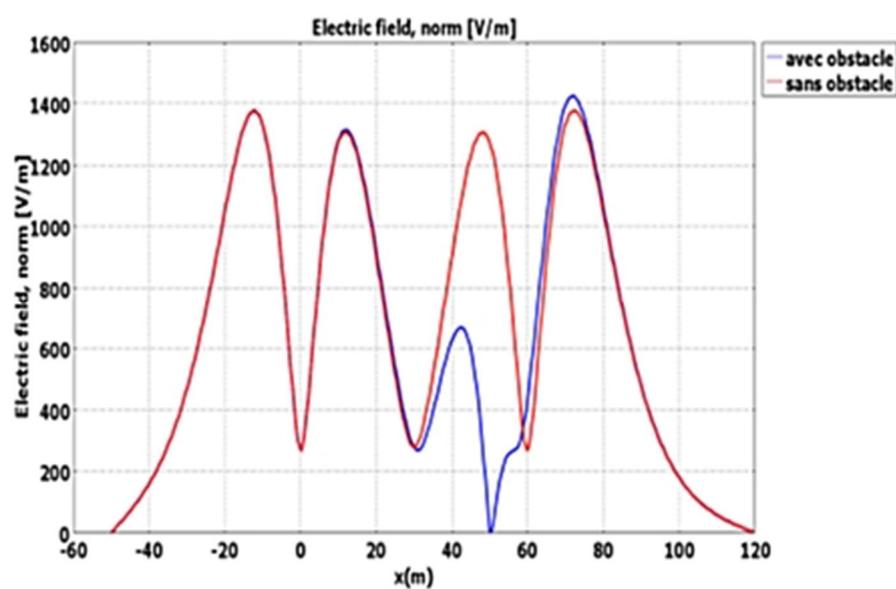


Fig 3.67 : Profils du champ électrique au niveau du sol sans et avec obstacle.

Chapitre 3 - Méthodes et calculs des champs électromagnétiques au voisinage des lignes haute tension

La diminution du champ électrique est bien claire dans les endroits plus proches de l'obstacle.

Dans le cas des 6 lignes parallèles étudiées précédemment, les effets de deux types d'obstacles sur la distribution des champs électriques ont été étudiés. Premièrement, une barre d'acier relié à la terre, qui possède une hauteur de 3 m, une largeur de 0,25 m et une épaisseur de 0,01 m a été considérée.

La position de la barre par rapport au point de départ ($x=0$) est 25 m. La figure 3.68 montre la distribution du champ électrique pour les niveaux 0 m, 1.5 m et 1.8 m au-dessus de sol.

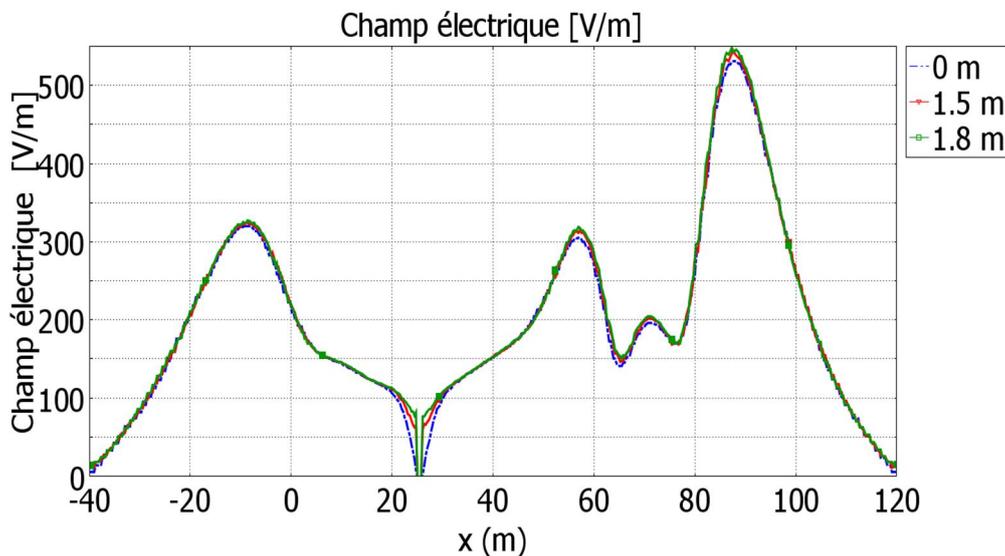


Fig 3.68 : Profils du champ électrique à 0 m, 1.5 et 1.8 m, présence d'une barre d'acier relié à la terre

Il est bien clair que le champ diminue énormément dans la zone où la barre conductrice a été installée. Dans cet endroit, la valeur minimale du champ électrique est 0kV/m. Loin de la barre, il n'existe pas un changement significatif dans les valeurs du champ.

Pour le deuxième cas, l'effet du conducteur se forme de potentiel flottant sur la distribution du champ électrique a été réalisé. Pour cette raison, une géométrie simple est initialement utilisée: deux sphères d'acier avec un diamètre de 0.5 m.

Chapitre 3 - Méthodes et calculs des champs électromagnétiques au voisinage des lignes haute tension

La première balle a été placée à une hauteur de 16 m au-dessus de sol et à 25 m du point de début ($x=0$), tandis que la deuxième a été localisée à 12 m au-dessus de sol et à $x=75$ m.

Les figures 3.69 et 3.70 montrent les profils du champ électrique obtenu à 16 m, 17 m, 18 m et 12 m, 13 m et 14 m au-dessus du sol, respectivement.

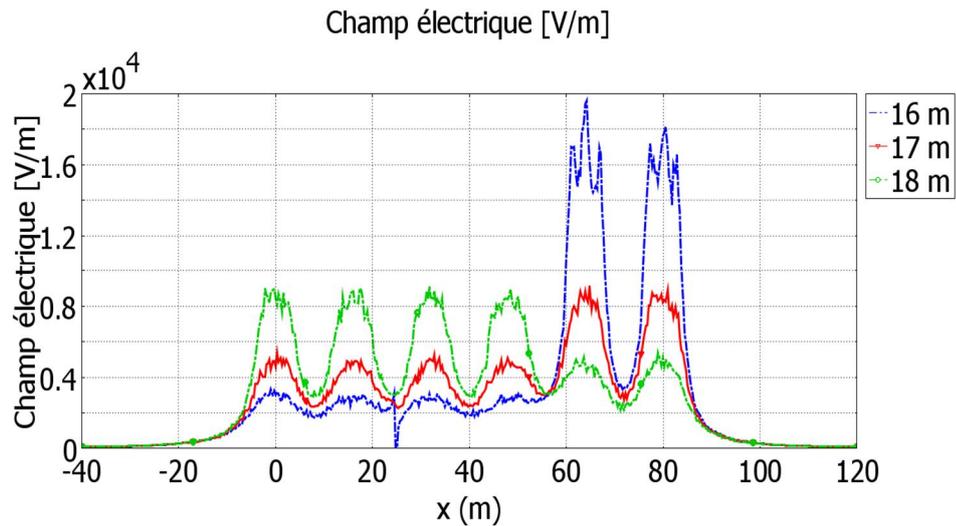


Fig 3.69 : Profils du champ électrique à 16 m, 17 et 18 m, présence d'un obstacle (potentiel flottant).

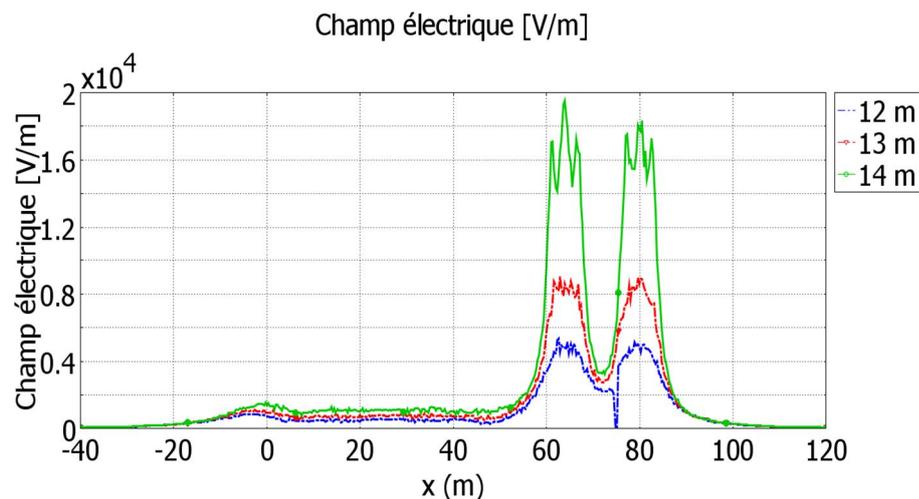


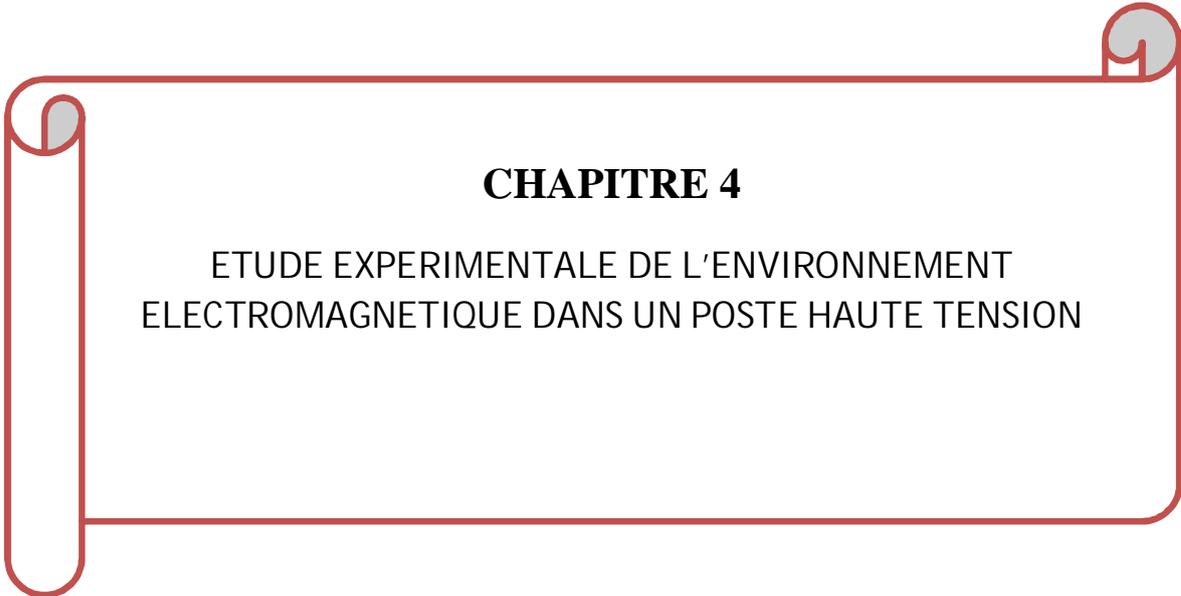
Fig 3.70 : Profils du champ électrique à 12 m, 13 m et 14 m, présence d'un obstacle (potentiel flottant).

Chapitre 3 - Méthodes et calculs des champs électromagnétiques au voisinage des lignes haute tension

On peut observer que la perturbation du champ causé par la présence des deux balles métalliques flottantes étend seulement la distance de deux côtés du modèle égal aux diamètres de ces balles. La modification du champ électrique loin des balles est pratiquement négligeable.

3.11. Conclusion

Dans ce chapitre nous avons appliqué les méthodes analytiques les plus utilisées pour calculer les champs magnétiques et électriques générés par une seule ligne HT, ainsi nous avons présenté les méthodes numériques les plus utilisées en électromagnétisme. Un protocole de mesure a été effectué sur un modèle simple d'une ligne HT, les résultats de mesures ont été comparés avec les résultats numériques obtenus à l'aide du code élément finis 2D que nous avons réalisée. Puis, plusieurs applications ont été abordées sous l'environnement COMSOL-Multiphysics, prenant en compte de l'influence des paramètres physiques et géométriques, les cas des lignes parallèles, l'influence d'un phénomène de surtension et des obstacles sur la distribution du champ électromagnétique. Dans le dernier chapitre, nous présenterons une étude expérimentale intensive concernant l'exposition des professionnels travaillant dans un poste d'interconnexion et de transformation haute tension (El-Hadjar- Annaba).



CHAPITRE 4

ETUDE EXPERIMENTALE DE L'ENVIRONNEMENT
ELECTROMAGNETIQUE DANS UN POSTE HAUTE TENSION

4.1. Introduction

Les réseaux électriques sont constitués par des éléments distincts de caractéristiques, de propriétés et de fonctions différentes. Ces éléments sont essentiellement, les lignes, les sous-stations et les différents postes de transformation, d'interconnexion, d'alimentation et de distribution. Toutes les lignes à haute tension (HT) sont interconnectées, c'est-à-dire qu'elles sont reliées par des postes d'interconnexion assurant la continuité entre les lignes de différents niveaux de tension. L'interconnexion permet: - des échanges d'énergie entre les régions; - en cas de défaut sur une ligne ou dans une centrale, l'alimentation par une autre ligne; - des échanges vers les pays voisins (exportation d'énergie). Les hautes tensions et les courants qui circulent dans les différents dispositifs constituant ces postes (ligne haute tension, transformateurs) génèrent des champs électriques et magnétiques de plus en moins intenses.

Plusieurs chercheurs à travers le monde ont étudié le comportement de champ électromagnétique produit par ces différents types de postes (Etat de l'art, chapitre 2), dont la plupart sont basés seulement sur la quantification des champs magnétiques.

En Algérie il n'existe pas encore des travaux similaires, bien que le pays dispose de plusieurs postes haute tension, et du fait que pas moins de 834 postes et avant-postes haute tension d'une puissance installée de 142 160 MVA seront réalisés sur la période 2015–2025, il faut penser sérieusement sur les éventuels effets de la pollution électromagnétique générés par ces postes de la même façon qu'on pense aux bénéfiques.

Dans ce chapitre, nous effectuons une étude expérimentale du comportement des champs électriques et magnétiques produit dans les différents passages des travailleurs à proximité des jeux de barre, des transformateurs de puissance et des travées des lignes haute tension du poste 220/90/60/30 kV (El-Hadjjar-Annaba-Algérie).

Premièrement, nous décrivons le poste étudié et nous expliquons la méthodologie de mesures des champs électriques et magnétiques. Enfin, nous représentons les résultats obtenus sur des courbes à deux dimensions pour faciliter la lecture des valeurs des champs électriques et magnétiques et les comparer avec les limites établies par les normes internationales.

4.2. Description du poste étudié

Le poste d'interconnexion d'el Hadjar est situé à 10 km de la centrale électrique d'Annaba, ce poste est constitué par trois sous station aérienne avec niveaux de tensions différents (sous-station 220 kV, sous- station 90 kV et sous-station 60 kV), et qui sont relié par trois transformateurs de puissance 220/60 kV et deux transformateurs 90/60 kV. Ces trois sous-stations interconnectaient des lignes haute tension qui représentent plusieurs régions de l'est d'Algérie et une sous-station souterraine 30 kV qui assure l'alimentation des régions voisines et même lointaines par l'énergie électrique. La figure 4.1 donne une vision simple du poste.

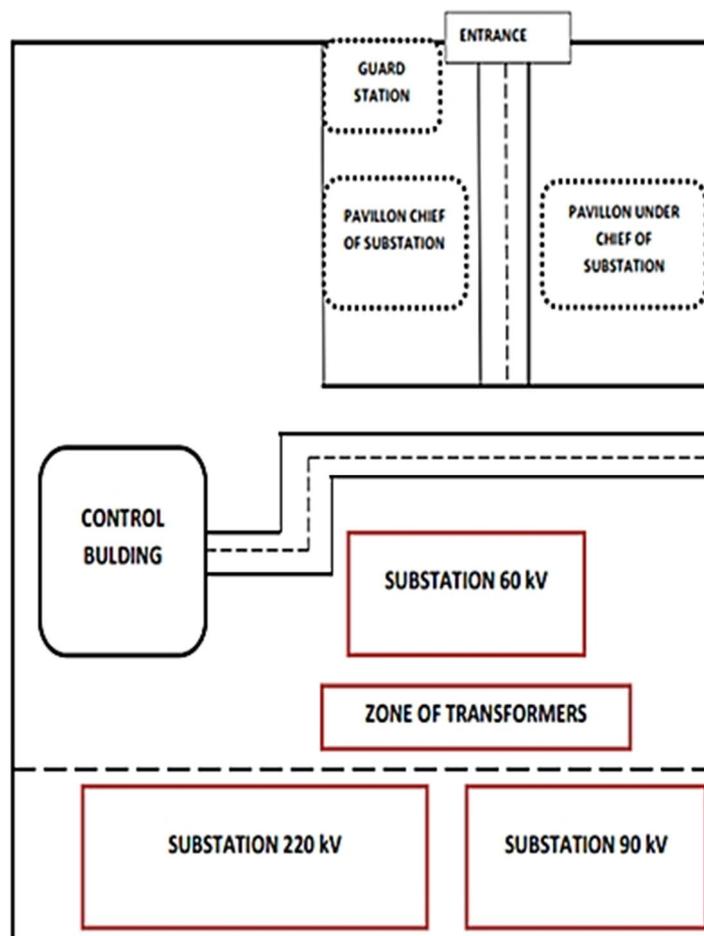


Fig 4.1: Architecture simplifiée du poste El-Hadjar.

4.3. Méthode de mesures

La technique de mesure de champ électrique et magnétique que nous avons adoptée est basée sur un point de vue original, parce que nous avons ciblé que les passages des travailleurs dans les sous-stations 220 kV et 60 kV, ainsi que le passage des transformateurs 220/60 kV. Dans ces régions on estime que les valeurs des champs seront très importantes, alors que l'exposition des personnes au pollution électromagnétique sera très importantes que les autres régions blindées (poste de contrôle et de commande). Toutes les mesures ont été effectuées à 1 m au-dessus de sol.

4.3.1 Mesures dans la sous-station 220 kV

Ce poste est constitué de deux jeux de barres triphasées, 5 travées de lignes 220 kV (21 phases) qui représentent plusieurs régions (Tab 4.1), ainsi que les 9 lignes des trois transformateurs de puissance (TR1, TR2, TR3) 220 kV/60 kV. Dans ce poste il existe 9 passages principaux qui permettent aux travailleurs de circuler ; 8 passages (P1 à P8) parallèles à la direction des travées des lignes et des transformateurs et perpendiculaires à la direction des jeux de barre et 1 passage parallèle à la direction de jeux de barre et perpendiculaire à la direction des travées des lignes. Les mesures ont été effectuées dans ces passages à 1m au-dessus de sol et avec un pas $\Delta x=5m$.

Tab 4.1 : Symboles des travées de lignes 220 kV

Symbole	Noms de la travée de la ligne
L1	Travée de La ligne Chafia
L2	Travée de la ligne kheraza
L3	Travée de la lignes SNS
L4	Travée de la ligne Ramdan Djamel
L5	Travée de la ligne Souk Ahras

Chapitre 4-Etude expérimentale de l'environnement électromagnétique dans un poste haute tension

La figure 4.2 montre une architecture simplifiée de la sous-station ainsi que les points de mesures dans les différents passages.

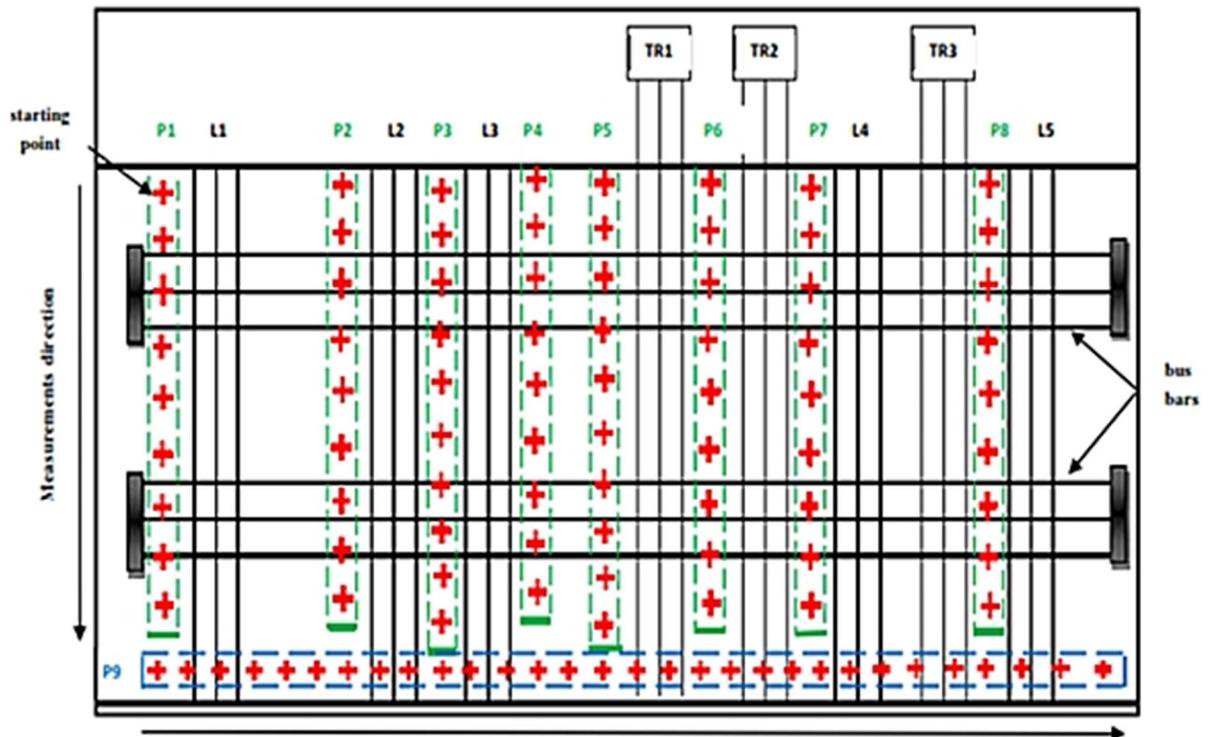


Fig 4.2 : Poste 220 kV avec les points de mesures dans les différents passages.

4.3.2 Mesures dans le passage des transformateurs 220/60 kV

Nous avons aussi mesuré les champs électriques et magnétiques à proximité des transformateurs de puissance 220/60 kV (Fig 4.3). La distance entre deux transformateurs voisins est 15 m. Les mesures ont été effectuées côté primaire des transformateurs ($V=220$ kV) commencent par le début du transformateur (TR1) jusqu'à l'extrémité du transformateur (TR3) avec un pas $\Delta x=3$ m sur une distance 57 m.



Fig 4.3 : Passage de transformateurs

4.3.3 Mesures dans le poste 60 kV

La sous-station 60 kV est constituée de 6 travées de lignes (L1 to L6) qui alimente plusieurs régions et industries au niveau local ainsi que 5 travées des transformateurs (2 transformateurs (TR7, TR8) 60/30 kV, 2 transformateurs (TR2, TR3) 220/60 kV et un transformateur (TR5) 90/60 kV et une batterie de condensateur 60 kV (C1), soit 36 phases. En outre, les deux jeux de barres 60 kV.

Dans cette sous-station, il y a deux passages (P1, P2) qui permettent aux travailleurs de contrôler ces éléments. La direction de ces deux passages est parallèle aux jeux de barre et perpendiculaire aux travées des lignes et des transformateurs, donc ils sont identiques, c'est pour cette raison qu'on a mesuré les champs seulement au passage 01 (P1).

Tab.4.2 : Symboles des travées de lignes 60 kV

Symbole	Noms de la travée de la ligne
L`1	Travée de La ligne SNS II
L`2	Travée de La ligne SNS I
L`3	Travée de La ligne Hadjar soud
L`4	Travée de la ligne Zaafrania
L`5	Travée de la ligne Annaba Port
L`6	Travée de la ligne ASMIDAL

Chapitre 4-Etude expérimentale de l'environnement électromagnétique dans un poste haute tension

La même méthodologie de mesures a été effectuée sauf que le pas est de l'ordre de 3 m ($\Delta x=3m$).

La figure 4.3 montre un dessin simple de cette sous-station ainsi les points de mesure dans le passage (P1).

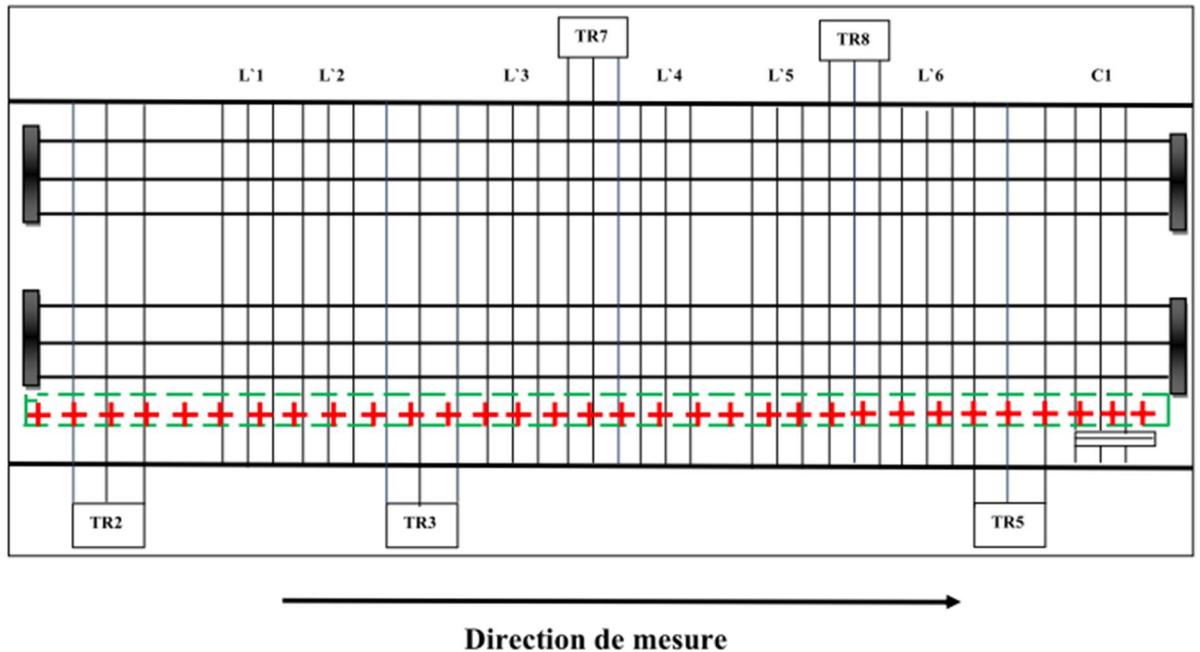


Fig 4.4 : Architecture de la sous-station 60 kV du poste el Hadjar.



Fig 4.5 : Photo du passage

4.4. Résultats et discussion

4.4.1. Dans le poste 220 kV

4.4.1.1. Comportement du champ électrique

Les résultats de mesures obtenues ont été représentés sous forme des courbes regroupées selon l'orientation des passages.

Pour les 8 premiers passages et pour une meilleure visualisation, les résultats ont été représentés en deux graphes, chaque courbe englobe 4 passages. Les figures 4 et 5 montrent la distribution des champs électriques dans ces passages.

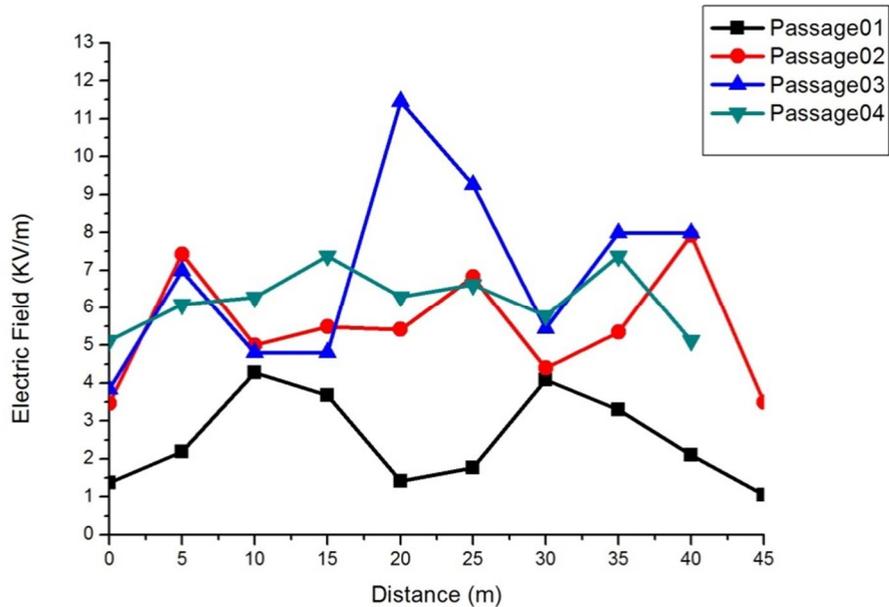


Fig 4.6 : Profil du champ électrique dans les quatre premiers passages du poste 220 kV

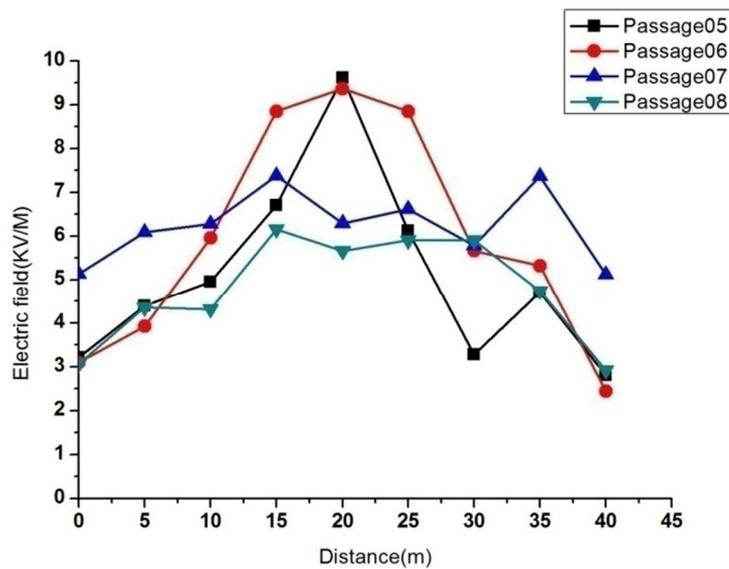


Fig 4.7 : Profil du champ électrique dans les quatre derniers passages du poste 220 kV

Les résultats montrent que les profils des champs électriques dans les différents passages de la station 220 kV sont très importants, la valeur maximale du champ électrique 11.450 kV/m a été enregistrée dans le point 5 du passage 3 (entre la travée de la ligne SNS et la travée de la ligne Kheraza), nous avons aussi trouvé des valeurs assez élevées 10.217 kV/m dans le point 5 du passage 04 (côté gauche de la travée de la ligne SNS 220 kV), ces valeurs dépassent les limites établies par les normes pour les professionnels (10 kV/m), autres valeurs qui dépassent les limites établies pour le publique ont été remarqué, il s'agit de (6.9820kV/m, 9.2549 kV/m, 5.4465 kV/m, 7.9838 kV/m, 5.1351 kV/m, 6.1954 kV/m, 9.0219 kV/m, 5.1629 kV/m).

Pour le passage 9 qui possède une direction différente des 8 premiers passages, la figure 8 montre le profil du champ électrique généré dans ce passage.

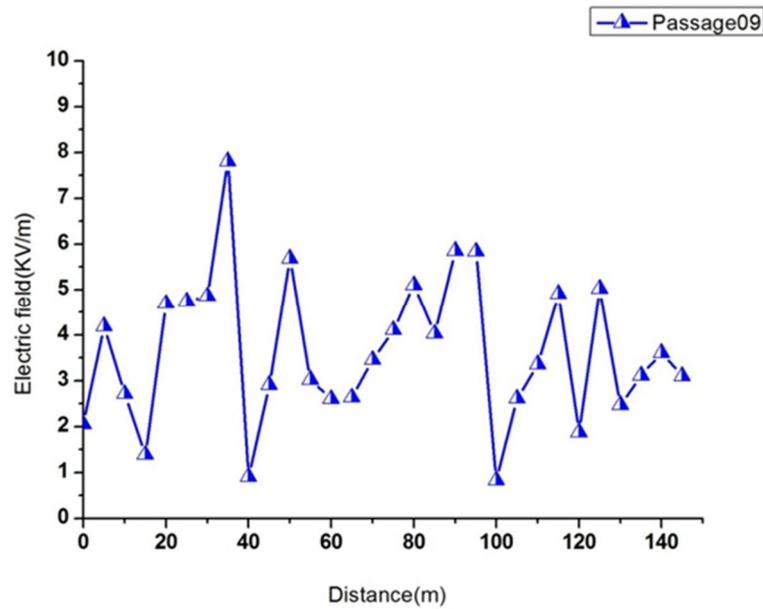


Fig 4.8 : Profil du champ électrique dans le passage 09 du poste 220 kV

Dans ce passage le profil du champ électrique est assez variable, cette variation est due à l'emplacement des points de mesure. Les valeurs les plus élevées ont été enregistrées dans les points qui se trouvent sous les phases des travées des lignes et des transformateurs par contre que les valeurs les moins élevées ont été trouvées dans les endroits ouverts entre une travée et une autre et dans les endroits qui se trouvent à proximité des obstacles (arbre, pylône) qu'on peut les considérer comme des systèmes de blindage involontaire.

4.4.1.2. Comportement du champ magnétique

Le champ magnétique dépend des courants qui circulent dans les différents conducteurs des lignes et des transformateurs, ces courants sont variables parce qu'ils dépendent de la charge.

Pour donner une idée sur les valeurs des courants pendant la période de mesures, le tableau 4.3 montre deux valeurs enregistrées dans chaque ligne et chaque transformateur, au début et à la fin des mesures.

Chapitre 4-Etude expérimentale de l'environnement électromagnétique dans un poste haute tension

Tab.4.3 : Variation du courant pendant la période de mesure (poste 220 kV)

Période de mesure	L 1	L 2	L 3	Primaire du TR1	Primaire du TR2	L 4	Primaire du TR3	L 5
	10h/13h	$I_1=165 \text{ A}$ $I_2= 150 \text{ A}$	$I_1= 490 \text{ A}$ $I_2= 460 \text{ A}$	$I_1= 79 \text{ A}$ $I_2= 71\text{A}$	$I_1= 79 \text{ A}$ $I_2= 72 \text{ A}$	$I_1= 81 \text{ A}$ $I_2= 76 \text{ A}$	$I_1= 129 \text{ A}$ $I_2= 126 \text{ A}$	$I_1= 84 \text{ A}$ $I_2= 77 \text{ A}$

La même stratégie a été effectuée pour évaluer les champs magnétiques générés dans les différents passages de cette sous-station, les figures 4.9 et 4.10 montrent le profil du champ magnétique distribuer dans les 8 premiers passages de la station 220 kV.

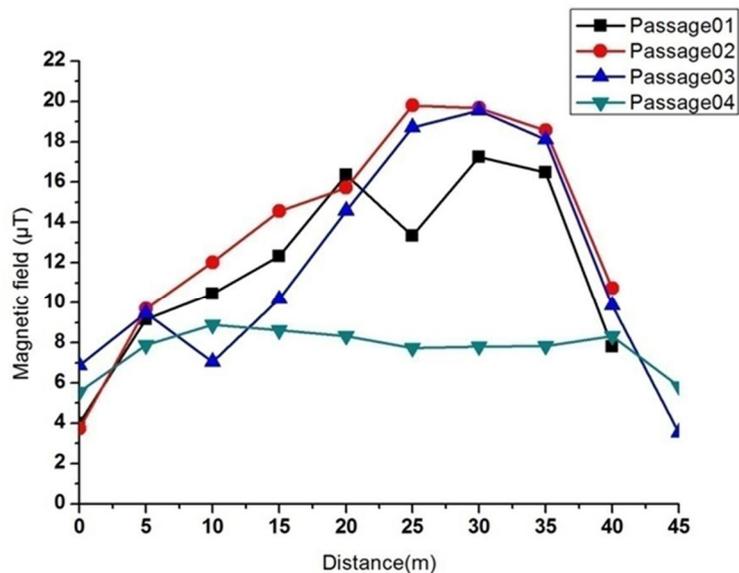


Fig 4.9 : Profil du champ magnétique dans les quatre premiers passages du poste 220 kV

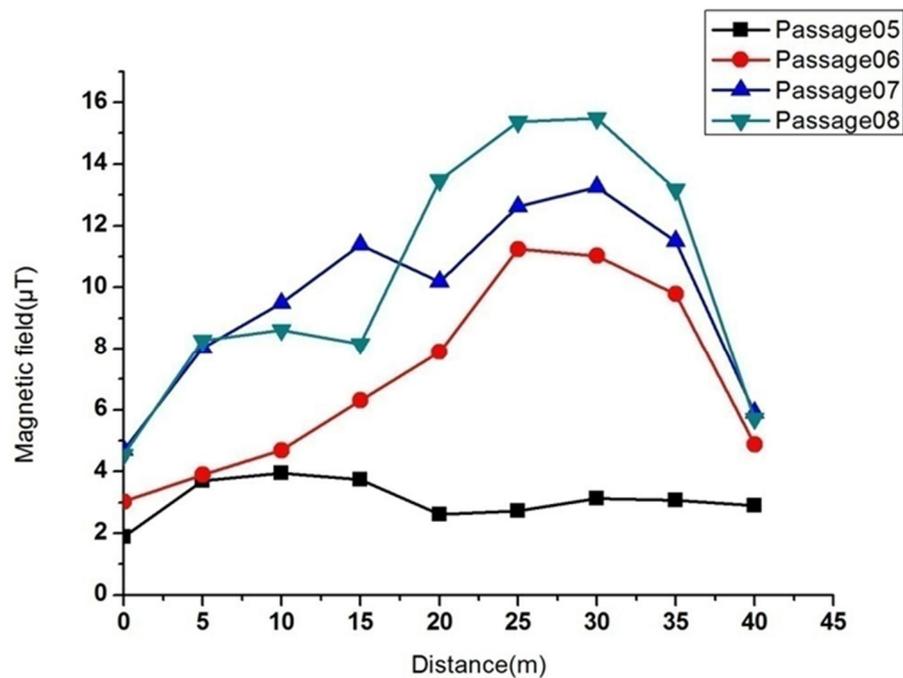


Fig 4.10 : Profil du champ magnétique dans les quatre derniers passages du poste 220 kV

Nous avons remarqué que le champ magnétique est variable presque dans tous les passages sauf dans les passages 4 et 5, où les valeurs de champ magnétique se varient légèrement entre ($2 \mu\text{T}$ et $3 \mu\text{T}$) et entre ($6 \mu\text{T}$ et $8 \mu\text{T}$), respectivement. La valeur maximale ($20 \mu\text{T}$) a été enregistrée dans le passage (P2). D'une façon générale, ces valeurs sont très loin de la limite établie par les normes ($500 \mu\text{T}$).

La figure 4.11 montre le profil du champ magnétique dans le passage P9.

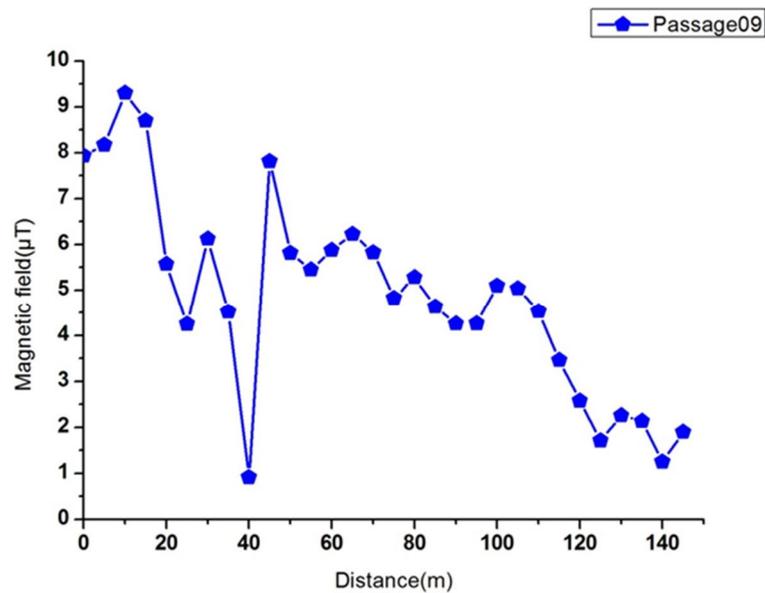


Fig 4.11 : Distribution du champ magnétique dans le passage 09 du poste 220 kV

Dans ce passage, la valeur maximale du champ magnétique enregistrée est $9,5 \mu\text{T}$ et la valeur minimale mesurée est $1 \mu\text{T}$, cette grande variation est due à la variation du courant dans les lignes et l'emplacement de l'appareil de mesure par rapport aux lignes et aux jeux de barre.

4.5. Dans le passage des transformateurs 220/60 kV

4.5.1. Comportement du champ électrique

La figure 10 illustre le profil de champ électrique à travers le passage à proximité des transformateurs (TR1, TR2, TR3).

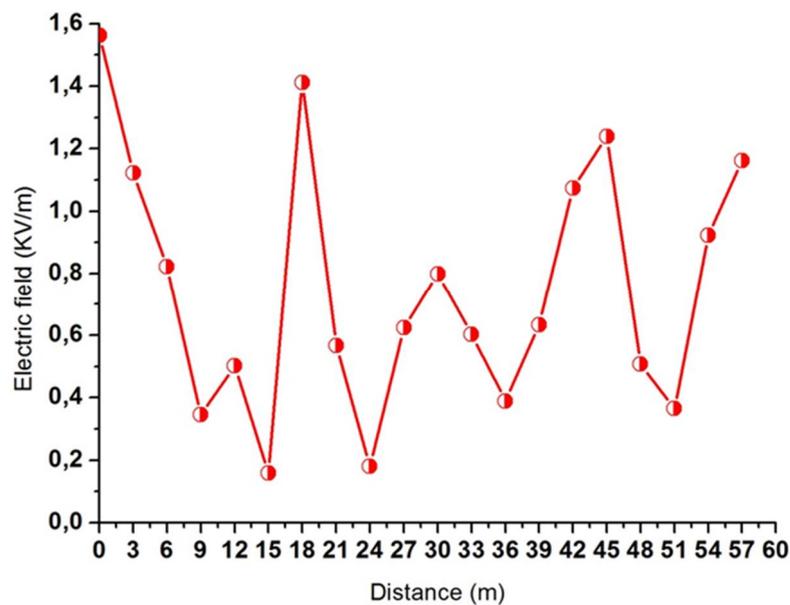


Fig 4.12 : Distribution du champ électrique dans le passage des transformateurs 220/60 kV

D'après cette courbe nous constatons que le profil du champ électrique est assez variable, et il est concentré au voisinage des transformateurs. La valeur maximale trouvée dans ce passage est de l'ordre de 1.5633 kV/m qui reste très loin par rapport aux limites établies par les normes.

4.5.2. Comportement du champ magnétique

Les valeurs des courants primaires des transformateurs relevées au début et à la fin des mesures dans le passage de transformateurs sont montrées dans le tableau 4.4.

Tab.4.4 : Variation du courant pendant la période de mesure (primaire de transformateurs 220 kV)

Période de mesure	Primaire du TR1	Primaire du TR2	Primaire du TR3
14h/15h	$I_1 = 80A$ $I_2 = 66A$	$I_1 = 77A$ $I_2 = 67 A$	$I_1=183 A$ $I_2 =174 A$

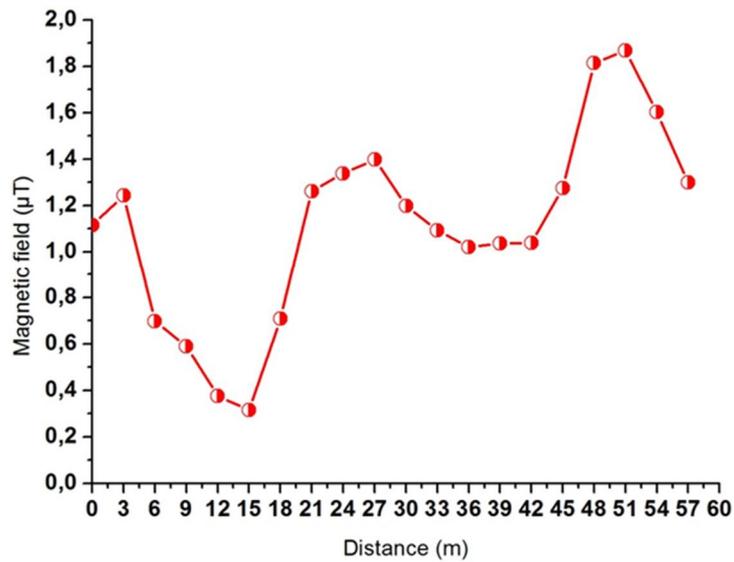


Fig 4.13 : Distribution du champ magnétique dans le passage des transformateurs 220/60 kV

Pour ce qui concerne le champ magnétique dans ce passage, les valeurs trouvées au voisinage des trois transformateurs sont un peu proches, la valeur maximale 1.8671 μT a été enregistrée sous les lignes du transformateur (TR3) et la valeur minimale 0.3150 μT a été trouvée dans la zone entre TR1 et TR2. Ces valeurs restent négligeables on comparaison avec les limites établie par les normes (500 μT).

4.6. Dans le poste 60 kV

4.6.1. Comportement du champ électrique

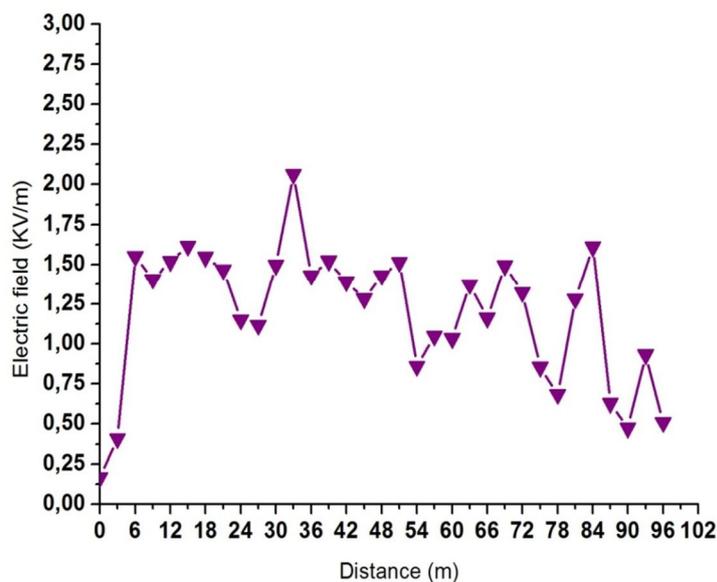


Fig 4.14 : Distribution du champ électrique dans le passage du poste 60 kV

Dans ce passage les valeurs du champ électrique se trouvent entre 0.1653 kV/m et 2.0634 kV/m, où ces valeurs sont considérées comme faibles par rapport aux valeurs obtenues dans la sous-station 220 kV, parce que le champ électrique dépend de la tension. La distribution du champ électrique dans cette sous-station est beaucoup plus faible par rapport aux limites d'exposition des professionnels (10 kV/m).

4.6.2. Comportement du champ magnétique

Les valeurs des courants des lignes et des transformateurs relevées au début et à la fin des mesures dans le passage (P1) du poste 60 kV sont montrées dans le tableau 4.5 et le tableau 4.6.

Chapitre 4-Etude expérimentale de l'environnement électromagnétique dans un poste haute tension

Tab 4.5 : Variation du courant pendant la période de mesure (poste 60 kV)

Période de mesure	Secondaire de TR2	L`1	L`2	Secondaire de TR3	L`3
10h/12h	$I_1= 238 \text{ A}$	$I_1= 232 \text{ A}$	$I_1= 151 \text{ A}$	$I_1= 254 \text{ A}$	$I_1= 298 \text{ A}$
	$I_2= 242 \text{ A}$	$I_2= 232 \text{ A}$	$I_2= 122 \text{ A}$	$I_2= 249 \text{ A}$	$I_2= 266 \text{ A}$

Tab 4.6 : Variation du courant pendant la période de mesure (poste 60 kV)

Période de mesure	Primaire de TR7	L`4	L`5	Primaire de TR8	L`6	Secondaire de TR5
10h/12h	$I_1= 52 \text{ A}$	$I_1= 155 \text{ A}$	$I_1= 190 \text{ A}$	$I_1= 53 \text{ A}$	$I_1= 193 \text{ A}$	$I_1= 90 \text{ A}$
	$I_2= 55 \text{ A}$	$I_2= 145 \text{ A}$	$I_2= 162 \text{ A}$	$I_2= 48 \text{ A}$	$I_2= 179 \text{ A}$	$I_2= 93 \text{ A}$

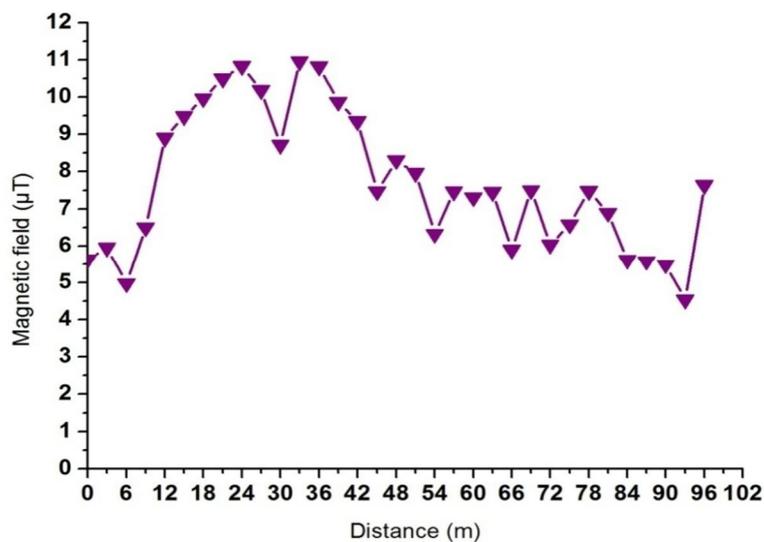


Fig 4.15 : Distribution du champ magnétique dans le passage du poste 60 kV

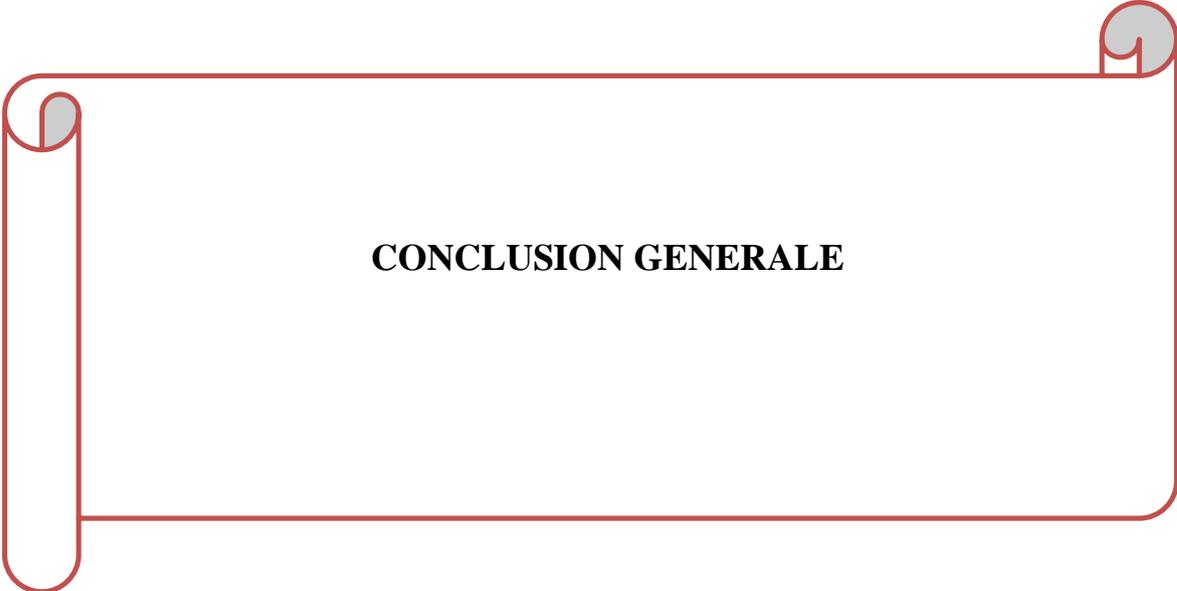
Chapitre 4-Etude expérimentale de l'environnement électromagnétique dans un poste haute tension

Le maximum du champ magnétique dans ce passage est de $10,954 \mu\text{T}$ et la valeur minimale est $4,5389 \mu\text{T}$. Cette variation est due aux écarts des courants dans chaque ligne, en plus de la position de la sonde par rapport à ces lignes, d'une façon générale ces valeurs restent négligeables par rapport aux limites établies par les normes internationales.

4.7. Conclusion

Dans ce dernier chapitre, nous avons présenté les résultats de mesures du champ électrique et magnétique obtenues dans les différents passages à l'intérieur d'un poste aérien haute tension. Les intensités des champs électromagnétiques trouvés ont été comparées avec les limites établies par ICNIRP ($10 \text{ kV} / \text{m}$ pour le champ électrique, $500 \mu\text{T}$ pour le champ magnétique). Dans les différents passages du poste 220 kV , nous avons constaté que les valeurs de champ électrique sont très importantes. Dans certains cas, les valeurs de champ électrique ont dépassé les niveaux de référence pour l'exposition professionnelle, ce qui peut menacer la santé des travailleurs. Les intensités de champ électrique enregistrées dans le passage du poste 60 kV et dans le passage des transformateurs $220/60 \text{ kV}$, sont suffisamment inférieures aux normes de l'ICNIRP. Dans tous les cas étudiés, les valeurs du champ magnétique restent très faibles à $500 \mu\text{T}$. Sur la base des résultats obtenus qui ont montré que les intensités du champ électrique généré à proximité des sources haute tension sont prépondérantes en comparaison avec celles du champ magnétique. Le fait que de nombreuses études ont prouvé qu'il est facile d'atténuer les champs électriques basse fréquence, nous suggérons de créer des vêtements spéciaux permet de protéger les organes des travailleurs contre la pollution de champ électrique.

CONCLUSION GENERALE



Conclusion générale

Dans le cadre de cette thèse, nous avons étudié l'environnement électromagnétique à la fréquence industrielle 50 Hz, au voisinage des lignes et des postes haute tension.

Dans un premier temps, nous avons présenté la problématique concernant les éventuels effets des champs électromagnétiques basses fréquences sur la santé humaine. Dans la littérature, beaucoup de recherches ont été effectuées pour tirer une conclusion concrète sur les types de maladies qui peuvent être apparues à cause de l'exposition aux champs électromagnétiques 50Hz. Bien que les effets à court terme sont connus et analysés. Les effets nocifs à long terme sont encore controversés.

En plus, nous avons effectué une étude bibliographique sur les interactions entre les champs électromagnétiques et les stimulateurs cardiaques. Sur la base du principe de précaution, des réglementations ont été définies visant à limiter l'exposition humaine aux ondes électromagnétiques. Ces limites sont basées sur les effets réversibles à court terme.

Dans un deuxième temps, nous avons réalisé une étude bibliographique intense sur les champs électromagnétiques générés par les lignes et les postes haute tension. Beaucoup de recherches ont été publiées dans ce domaine, dont les méthodes utilisées comportent des études expérimentales, des calculs analytiques et numériques. Par la suite, nous avons présenté un bref rappel sur les lignes à haute tension, où nous avons examiné les différents niveaux de tension et les types de pylônes utilisés par SONELGAZ. Ces paramètres ont une influence directe sur la distribution des champs électromagnétiques à proximité des lignes.

Nous avons ensuite appliqué la formulation analytique classique pour calculer les champs électrique et magnétique au voisinage d'une ligne haute tension. Pour résoudre des problèmes complexes (cas de plusieurs lignes parallèles, la présence d'un obstacle au voisinage de la ligne), nous nous sommes tournées vers la dosimétrie numérique. Ainsi, nous avons présenté les méthodes numériques les plus utilisées dans notre contexte, et nous avons choisi d'adopter la méthode des éléments finis pour la modélisation de ces phénomènes. Pour cela le logiciel COMSOL-MULTI PHYSICS a été utilisé comme moyen de validation. Nous avons créé sous l'environnement de ce logiciel un code de simulation 2D basé sur les modules électrostatique et magnéto-statique. Ce code a été validé d'abord en comparaison avec les résultats des mesures obtenus au voisinage d'une ligne haute tension 400 kV qui possède une géométrie simple. En outre, cette méthode nous a permis d'étudier d'une part les champs électromagnétiques produits par un ensemble de plusieurs lignes haute tension parallèles et

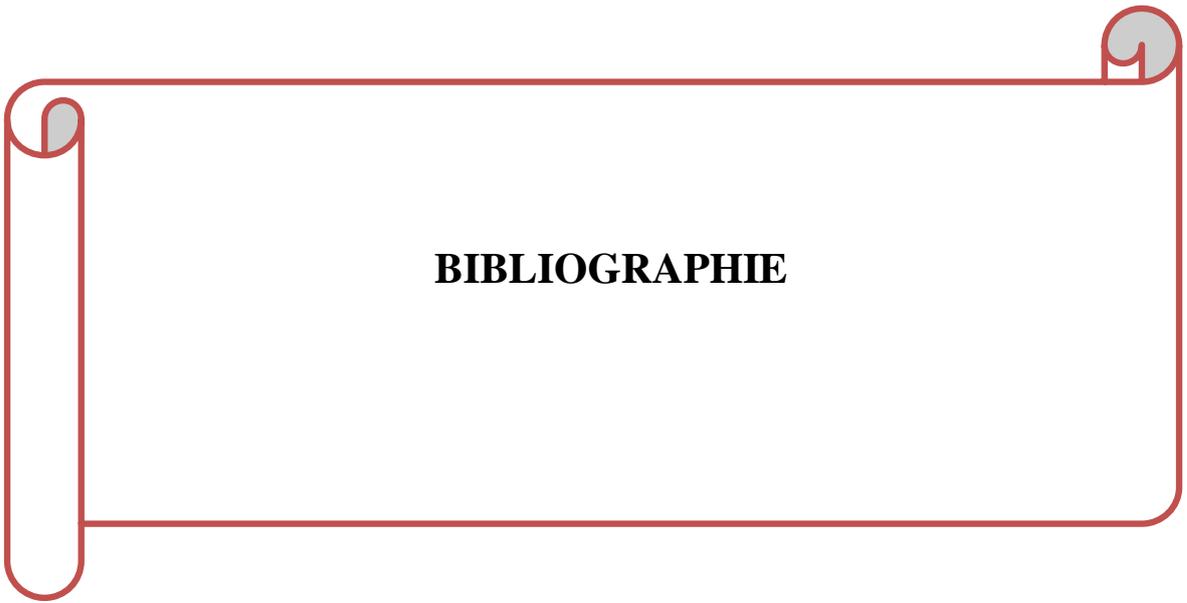
CONCLUSION GENERALE

d'autre part, de constater l'influence de plusieurs paramètres physiques, comme l'influence de l'effet Ferranti et des obstacles conducteurs sur la distribution du champ électrique. Dans tous les cas étudiés, nous avons comparé les résultats obtenus avec les normes de l'ICNIRP, au voisinage de la ligne 400 kV et pour des niveaux proches de sol, nous avons trouvé des valeurs de champ électrique qui dépassent les limites établies concernant l'exposition de grand public. Pour les lignes 220 kV et 60 kV les champs électriques pour les niveaux proches du sol sont bien inférieurs aux normes, pour les autres niveaux proches des conducteurs des lignes, des intensités de champ énormes ont été trouvées. Pour ce qui concerne la distribution des champs magnétiques, et pour des valeurs de courants approximativement déterminés, nous n'avons pas obtenu des valeurs qui dépassent la limite d'ICNIRP (100 μ T).

Enfin et afin d'évaluer l'exposition des professionnels à la pollution électromagnétique, une étude expérimentale de l'environnement électromagnétique à l'intérieur d'un poste haute tension (220/90/60/30 kV) a été effectuée. Les mesures ont été déroulées dans les passages des travailleurs proches des sources à haute tension (Travées de lignes HT, Transformateurs de puissance, Jeux de barres). Dans certains passages du poste 220 kV, nous avons enregistré des valeurs des champs électriques (à 1 m au-dessus du sol) qui dépassent la norme établie par ICNIRP pour l'exposition professionnelle au champ électrique basse fréquence (10 kV/m). Les champs magnétiques enregistrés dans les différents passages du poste sont suffisamment inférieurs à la norme de l'ICNIRP (500 μ T).

Les méthodes expérimentales et numériques que nous avons appliquées sont valables pour d'autres lignes et postes HT telles que les lignes à configuration complexe et les postes qui possèdent des tensions plus élevées.

En perspectives, il serait intéressant d'étudier et de développer des modèles 3D et d'étudier les effets du champ électromagnétique sur un modèle simulant les caractéristiques diélectriques des tissus biologiques. En outre, il est intéressant d'étudier les effets du champ électromagnétique pour des situations plus complexes tel que les champs créés par une ligne de transport en régime transitoire.



BIBLIOGRAPHIE :

[1] Site internet du Comité Européen de Normalisation pour l'Electrotechnique, [http://www. Cenelec.org](http://www.Cenelec.org).

[2] Site internet de l'AFNOR, <http://normesenligne.afnor.fr>.

[3] Site internet du Comité Electrotechnique Internationale, <http://www.iec.ch>.

[4] National Research Council (U.S.) Committee on the possible effects of electromagnetic field on biologic systems,editor. Possible health effects of exposure to residential electric and magnetic fields.Washington, DC National Academy press, 1997.

[5] Framework for developing health-based EMF standards, World Health Organization (WHO), 2006.

[6] Guidelines for limiting exposure to time varying electric, magnetic and electromagnetic fields (up to 300 GHz)", International Commission on Non-Ionizing Radiation Protection (ICNIRP) Health Physics, Vol. 74, No.4, 494-522, 1998.

[7] Nazar H. Malik, "AReview of the Charge Simulation Method and its Applications", IEEE Transactions on Electrical InsulationVol.24 No.1, February 1989

[8] Ramesh Garg,, "Analytical and Computational Methods in Electromagnetics", London,Artech House,2008,528.

[9] N.Wertheimer et E.Leeper, "Electrical wiring configuration and childhood cancer", American journal of Epidemiology 109,273-284

[10] TheriaultG, Goldberg M, Miller AB, "Cancer risks associated with occupational exposure to magnetic field among electric utility works in Ontario and Quebec,Canada, and France:1970-1989", American journal of Epidemiology,Vol 139,No 6, P 550-572,15 mar 1994

[11] Savitz DA, Loomis DP., "Magnetic field exposure in relation to leukemia and brain cancer mortality among electric utility workers", American journal of Epidemiology,Vol 141,Number 2,P 123-134, 15 jan 1995.

[12] M. S. Linet, E. E. Hatch, R. A. Kleinerman, "Residential exposure to magnetic field and acute lymphoblastic leukemia in children", *the new england journal of Medicine*, Vol 337 ;1-8,3 july1997.

<http://content.nejm.org/cgi/content/abstract/337/1/1>

[13] M.L.McBride, R.P Gallagher, G Thériault, Power frequency electric and magnetic field and risk of childhood leukemia in Canada, *.American journal of epidemiology*, Vol.149,831-42.1 may 1999.

<http://aje.oxfordjournals.org/cgi/reprint/149/9/831>

[14] Exposure to power –frequency magnetic fields and the risk of childhood cancer .UK childhood cancer investigators. *The Lancet* .Vol 354, Issue 9194, Dec 1999, P 1925-1931.

[15] A. Babouri, A. Hedjeidj. "In vitro investigation of eddy current effect on pace-maker operation generated by low frequency magnetic field", 29th Annual Int. Conf.IEEE Engineering in Medicine and Biology Society. Lyon (France), Aug. 22–26, 2007, 5684–5687

[16] A. Babouri, A. Hedjeidj, L. Guendouz, "Experimental and theoretical investigation of implantable cardiac pacemaker exposed to low frequency magnetic field", *J. Clin.Monitoring Comput.* 23 (2009), 63–73.

[17] https://fr.wikipedia.org/wiki/Pollution_%C3%A9lectromagn%C3%A9tique.

[18] Champ électromagnétique de très basse fréquence .Gestionnaire du réseau de transport de l'électricité. EDF.

[19] L. H. Hoang, "Contribution à la modélisation tridimensionnelle des interactions champ électromagnétique corps humain en basses fréquences", Thèse de Doctorat, ECL, 2007.

[20] Hydro Quebec. <http://hydro.quebec.com/comprendre/champs/index.html>

[21] ICNIRP. Guide de l'établissement de limites d'exposition aux champs électriques, magnétiques et électromagnétiques. Cahiers de note documentaire – Hygiène et Sécurité du travail – No 182, 1^{er} trimestre 2001.

[22] Pollution électromagnétique, CRIIREM, Valence, le 26 janvier 2006.

- [23] Organisation Mondiale de la Santé.[http:// www.who.int/peh-emf/about/WhatisEMF/fr/index1.html](http://www.who.int/peh-emf/about/WhatisEMF/fr/index1.html)
- [24] A.Aurengo, J. Clavel, R. de Seze, P. Guénel, J. Joussot-Dubien, B. Veyret, " Champs Magnétiques d'Extrêmement Basse Fréquence et Santé", Rapport remis à la DGS le 8 novembre 2004.
- [25] Ahlbom A, Day N, Feychting M, Roman E, Skinner J, Dockerty J et al., "A pooled analysis of magnetic fields and childhood leukemia", *Br J Cancer*, 83:692-698, 2000.
- [26] Ahlbom IC, Cardis E, Green A, Linet M, Savitz D, Swerdlow A. "Review of the epidemiologic literature on EMF and Health", *Environ Health Perspect* 109 Suppl 6:911-933, (2001) :
- [27] Greenland S, Sheppard AR, Kaune WT, Poole C, Kelsh MA, "A pooled analysis of magnetic fields, wire codes, and childhood leukemia", *Childhood Leukemia-EMF Study Group. Epidemiology*.11:624-634, 2000.
- [28] Feychting M, Ahlbom A., "Magnetic fields and cancer in children residing near Swedish high-voltage power lines", *Am J Epidemiol*; 138:467-481, 1993.
- [29] McBride ML, Gallagher RP, Theriault G, Armstrong BG, Tamaro S, Spinelli JJ et al. "Power frequency electric and magnetic fields and risk of childhood leukemia in Canada" , *Am J Epidemiol*; 149:831-842, 1999.
- [30] Milham, S., Jr., "Mortality from leukemia in workers exposed to electrical and magnetic fields", *New Engl. J. Med.* 307:249; 1982.
- [31] Savitz, D. A.; Ahlbom, A., "Epidemiologic evidence on cancer in relation to residential and occupational exposure.In:Biologic effects of electric and magnetic fields", Vol. 2. NewYork: Academic Press; 1994: 233–262.
- [32] Demers, P. A.; Thomas, D. B.; Sternhagen, A.; Thompson,W. D.; Curnen, M. G. M.; Satariano, W.; Austin, D. F.;Issacson, P.; Greenberg, R. S.; Key, C.; Kolonel, L. K.;West, D. W., "Occupational exposure to electromagnetic fields and breast cancer in men", *Am. J. Epidemiol.* 132:775–776; 1991.
- [33] Matanoski, G. M.; Breyse, P. N.; Elliott, E. A., "Electromagnetic field exposure and male breast cancer", *Lancet* 337:737; 1991.

- [34] Tynes, T.; Andersen, A.; Langmark, F., "Incidence of cancer in Norwegian workers potentially exposed to electromagnetic fields", *Am. J. Epidemiol.* 136:81– 88; 1992.
- [35] Loomis, D. P.; Savitz, D. A.; Ananth, C. V, "Breast cancer mortality among female electrical workers", in the United States. *J. Nat. Cancer Inst.* 86:921–925; 1994.
- [36] Floderus, B.; Persson, T.; Stenlund, C.; Wennberg, A.; Ost, A.; Knave, B., "Occupational exposure to electromagnetic fields in relation to leukemia and brain tumors: a case-control study in Sweden", *Cancer Causes and Control* 4:465– 476; 1993.
- [37] Miller, A. B.; To, T.; Agnew, D. A; Wall, C.; Green, L. M., "Leukemia following occupational exposure to 60-Hz electric and magnetic fields among Ontario electric utility workers". *Am. J. Epidemiol.* 144:150 –160; 1996.
- [38] Guenel, P.; Nicolau, J.; Imbernon, E.; Chevalier, A.; Goldberg, M. , "Exposure to 50-Hz electric field and incidence of leukemia, brain tumors, and other cancers among French electric utility workers", *Am. J. Epidemiol.* 144:1107–21; 1996.
- [39] Sobel, E.; Davanipour, Z., " EMF exposure may cause increased production of amyloid beta and eventually lead to Alzheimer 9 s disease", *Neurology* 47:1594 –1600; 1996.
- [40] Babouri, Abdessalem, "Compatibilité électromagnétique des implants médicaux actifs: Evaluation théorique et expérimentale du comportement des stimulateurs cardiaques exposés à des perturbations électromagnétiques de basses fréquences", thèse de doctorat, 2007, Université Henri Poincaré, Nancy-I, France.
- [41] T.W. Dawson, K. Caputa, M.A Stuchly, R.B. Shepard, R. Kavet and A Sastre. 2002. "Pacemaker Interference by Magnetic Fields at Power Line Frequencies", *IEEE.Trans.Biomed. Eng.*Vol.49, No.3, pp. 254-261.
- [42] Scholten A;Silny J, "The interference threshold of cardiac pacemakers in electric 50 Hz fields", *Journal of medical engineering & technology* 2001 Vol. 25 n 1 pp 1-11.
- [43] Trigano A, Blandeau O, Souques M, Gemez JP, Magne 1 2005, "Clinical study of interference with cardiac pacemakers by a magnetic field at power line frequencies". *med./biol., J Am Coll Cardiol* 45 (6): 896 – 900.

- [44] T.W. Dawson, M.A StucWy, K. Caputa, A Sastre, R.B. Shepard and R. Kavet 2000. "Pacemaker Interference and Low-Frequency Electric Induction in Humans by External Fields and Electrodes", IEEE.Trans.Biomed. Eng.Vol.47, No.9, pp. 1211-1218.
- [45] T.W. Dawson, K. Caputa, M.A. StucWy and R. Kavet. 2002, "Pacemaker Interference by 60-Hz Contact Currents", IEEE.Trans.Biomed. Eng.Vol.49,No.8, pp. 878-886
- [46] Toivonen L., Valjus J., Rongisto M., Metso R. 1991, "The influence of elevated 50 Hz electric and magnetic fields on implanted cardiac pacemakers : the role of lead configuration and programming of the sensitivity", Pace. 14, N°12, pp. 2114-2122.
- [47] M.A. Stuchly and R. Kavet.2005, "Numerical Modeling of Pacemaker Interference in the Electric Utility Environment", IEEE Trans. Biomed. Dev.Mat.Rel. 5,N0.3, 481-87.
- [48] Butrous G.S., Bexton R.S., Barton D.G., Male le., Camm AI 1983,"Interference with the pacemakers of two workers at electricity substations", British Journal of industrial Medicine 40, pp. 462-465.
- [49] Kaye G.C, Butrous G.S., Allen A., Meldrum SJ, Male JC, Camm AJ.1988 "The effect of 50 Hz external electrical interference on implanted cardiac pacemakers" ,Pace. II, 999-1008.
- [50] Souques M, Frank R, Himbert C, Lambrozo J, Castet H, Bailly J-M and Magne I. 2002, "Effets des champs électromagnétiques de 50, 60 Hz et de 20 à 50 KHz sur le fonctionnement des cardiostimulateurs implantés Environnement Risques Santé vol 1.
- [51] IEEE. IEEE standar for safety level with respect to human exposure to radio frequency electromagnetic fields , 3 kHz to 300 GHz .IEEE std C95.1, 1999 edition , Institute of Electrical and Electronic Engineering, 1999.
- [52] R. Scorretti, "Caractérisation numérique et expérimentale du champ Magnétique B. F. Généré par des Systèmes Electrotechniques en vue de la modélisation des courants induits dans le corps humain", thèse de doctorat, 2003.
- [53] ICNIRP International Commission on Non-Ionizing Radiation Protection. Guidelines for limiting exposure to time-varying electric and magnetic fields (1 Hz–100 kHz). Health Phys 2010; 99 (6):818–36
- [54] M. Misakian, J. P. Casamento, and O. B. Laug, "Development of emulator for walk-through metal detectors," IEEE Trans. Electromagn. Compat., vol. 44, no. 3, Aug. 2002.

- [55] European Committee for Standardization/European Committee for Electrotechnical Standardization-CEN/CENELEC, "prEN45502-2-1: 2003, Final Draft, Active Implantable Medical Devices, Part 2-1: Particular requirements for active implantable medical devices intended to treat bradyarrhythmia (cardiac pacemakers)," Apr. 2003.
- [56] European Committee for Standardization/European Committee for Electrotechnical Standardization-CEN/CENELEC, "pr EN45502-2-2: 1998, Draft, Active Implantable Medical Devices, Part 2-2: Particular requirements for active implantable medical devices intended to treat tachyarrhythmia (Includes implantable defibrillators) ", Mar. 1998.
- [57] International Organization for Standardization (ISO), "ISO 14 708-1:2000, Implants for surgery-Active implantable medical devices, Part I: General requirements for safety, marking and for information to be provided by the manufacturer," 2000.
- [58] European Committee for Electrotechnical Standardization (CENELEC),"Safety of implantable cardiac pacemakers," EN50061:1998, May 1988.
- [59] American National Standards Institute/Association for the Advancement of Medical Instrumentation (ANSI/AAMI), "Active implantable medical devices-Electromagnetic compatibility-EMC test protocols for implantable cardiac pacemakers and implantable cardioverter defibrillators", ANSI/AAMI PC69:2000, May 2000.
- [60] J.R. Wait, " Complex image theory revisited", IEEE Antennas & Propagation Magazine 33 (4) (August 1991) 27–29.
- [61] R.G. Olsen, D. Deno, R.S. Baishiki, "Magnetic fields from electric power lines—theory and comparison to measurements", IEEE Transactions on Power Delivery 3 (4) (October 1988) 2127–2136.
- [62] N.H. Malik, "A review of the charge simulation method and its application, IEEE Transactions on Electrical Insulation", 24 (1) (February 1989) 3–20.
- [63] H. Singer, H. Steinbigler, P. Weiss, "A charge simulation method for the calculation of high voltage fields", IEEE Transactions on Power Apparatus & Systems PAS-93 (5) (September 1974) 1660–1668.
- [64] M.A. Elhribawy, T.T. Nguyen, L. Jennings, W.W.L. Keerthipala, "Calculation of electromagnetic fields established by power transmission line using finite difference

techniques", in: Proc. IEEE Canadian Conf. Electrical Computer Engineering, 2002, pp. 311–316.

[65] K. Hameyer, R. Mertens, R. Belmans, "Numerical methods to evaluate the electromagnetic fields below overhead transmission lines and their measurement", in: Proc. 1st IEEE International Caracas Conference on Devices, Circuits, Systems, Caracas, Venezuela, December 1995, pp. 32–36.

[66] B. Florkowska, A.J. Korczynski, M. Timler, " Analysis of electric field distribution around the high-voltage overhead transmission lines with an ADSS fiber-optic cable", IEEE Transactions on Power Delivery 19 (3) (July 2004) 1183–1189.

[67] A. Mpalantinos, "Tridimensional surface mesh generation—an application to potential problems solution by boundary element method (in Portuguese) ", M.Sc. dissertation, COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro, 2005. [Online]. Available: [http://www.coc.ufrj.br/teses/mestrado/rh/2005/Teses/MPALANTINOS%20NETO A 05 t M rhs.pdf](http://www.coc.ufrj.br/teses/mestrado/rh/2005/Teses/MPALANTINOS%20NETO%20A%2005%20t%20M%20rhs.pdf).

[68] F. Gutfleish, H. Singer, K. Förger, J.A. Gomollon, "Calculation of high-voltage fields by means of the boundary element method", IEEE Transactions on Power Delivery 9 (2) (April 1994) 743–749.

[69] J. Estacio, A. Escobar, G. Aponte, H. Cadavid, " A transmission line scale model for characterizing electric and magnetic fields", in: Electromagnetic Field Health and Environment, IOS Press, 2008.

[70] S. Tupsie, A. Isaramongkolrak, P. Paolaor, "Analysis of electromagnetic field effects using FEM for transmission lines transposition", World Academy of Science, Engineering and Technology 53 (2009) 870–874.

[71] S.S. Ahmed, R. Haque, A.K.M.R. Hasan, A.H. Siddiqui, "Determining EHV transmission line magnetic fields by applying the vector magnetic potential concept", Electric Power Systems Research 35 (1995) 127–132.

[72] N.A. Rahman, W.N.L. Mahadi, I. Said, H. Hussain, "Simulation approach in evaluating the electromagnetic fields from the new lines of extra high voltage (EHV) circuits near residential area in Malaysia", European Journal of Scientific Research 40 (2) (2010) 189–198.

- [73] I.A. Metwally, "Electrostatic and environmental analyses of high phase order transmission lines", *Electric Power Systems Research* 61 (2002) 149–159.
- [74] K.M. Srinivasa, et al., "Field measurements of electric and magnetic fields on HV and EHV transmission lines and substations", *IEEE International Symposium on Electrical Insulation* 2 (1998) 347–350.
- [75] J.M. Bakhashwain, M.H. Shwehdi, U.M. Johar, A.A.A. Naim, "Magnetic fields measurement and evaluation of EHV transmission lines in Saudi Arabia", in: *Proceedings of the International Conference on Non-Ionizing Radiation at UNITEN (ICNIR 2003), Electromagnetic Fields and Our Health*, 20th–22nd October, 2003.
- [76] A.M. Qabazard, "Survey of electromagnetic field radiation associated with power transmission lines in the state of Kuwait", in: *International Conference on Electromagnetics in Advanced Applications*, Torino, 2007, pp. 795–797.
- [77] Charalambos P. Nicolaou et al, "Measurements and predictions of electric and magnetic fields from power lines", *Electric Power Systems Research* 61 (2011) 1107–1116.
- [78] N. Kovac, D. Poljak, S. Kraljevic, N. Bozic, N. Grulovic, " Computation of maximal magnetic field value generated by a power substation", *Transactions of the Wessex Institute*, 10.2495/BIO070231.
- [79] A.S. Farag, T.C. Cheng, "EMF Design Guidelines for New Electrical Substation Facilities, EMF Design Guidelines Workshop (Substations and Measurements)", Sponsored by EPRI/CPUC/IEEE Substation, 1994.
- [80] S. Farag, et al., "Magnetic field management of substations in high-rise buildings,in: *IEEE Stockholm Power Tech. Conference*", Stockholm, Sweden, June 18–22, 1995.
- [81] A.S. Farag, et al., "Electromagnetic fields in substations – sources modeling and measurements, in: *GCC/CIGRE Sixth Symposium*", Bahrain, October 25–26, 1995.
- [82] I.O. Habiballah, A.S. Farag, M.M. Dawoud, A. Firoz, " Underground cable magneticfield simulation and management using new design configuration", *Electric Power System Research* 45 (May (2)) (1998) 141–148.

- [83] M.M. Dawoud, I.O. Habiballah, A.S. Farag, A. Firoz, "Magnetic field management techniques in transmission underground cables", *Electric Power System Research* 48 (January (3)) (1999) 177–192.
- [84] A.S. Farag, M.M. Dawoud, I.O. Habiballah, "Implementation of shielding principles for magnetic field management of power cables", *Electric Power System Research* 48 (January (3)) (1999) 193–209.
- [85] C. Munteanu, G. Visan, I.T. Pop, "Electric and magnetic field distribution inside high voltage power substations. Numerical modeling and experimental measurements", *IEEE Transactions on Electrical and Electronic Engineering* 5 (1) (2010) 40–45.
- [86] S. Nikolovski, P. Maric, Z. Baus, "Electromagnetic field calculation of transformer station 400/110 kV Ernestinovo using the CDEGS software", *Journal of Electrical Engineering* 58 (4) (2007) 207–213.
- [87] Retrieved from Safe Engineering and Technology Services homepage. <http://www.sestech.com/products/softpackages/cdegs.htm>.
- [88] N. Kovac, D. Poljak, S. Kraljevic, N. Bozic, N. Grulovic, "Computation of maximal magnetic field value generated by a power substation", *Transactions of the Wessex Institute*, 10.2495/BIO070231.
- [89] I. Said, S. Farag, H. Hussain, N.A. Rahman, "Measurement and simulation of magnetic field of a 132 kV air-insulated substation in Malaysia", in: 39th International Universities Power Engineering Conference, (UPEC 2004), vol. 1, Bristol, England, September 6–8, 2004, pp. 219–222.
- [90] Z. Yan, J.X. Li, Z.Y. Dong, Y. Zhu, "Prediction and improvement of the electric field distribution in high voltage AC substations", *Electric Power Systems Research* 11 (October (2)) (1986) 153–159.
- [91] I. Kosalay, "Fuzzy logic based ELF magnetic field estimation in substations", *Radiation Protection Dosimetry* 131 (2) (2008) 240–250.
- [92] M. Stojkov, D. Sljivac, L. Jozsa, "Electric and magnetic field computation of 35 kV voltage level of transformer substation 35/10 kV using the CDEGS software", *Acta Electrotechnica et Informatica* 10 (4) (2010) 64–68.

- [93] S. Helhel, S. Ozen, "Assessment of occupational exposure to magnetic fields in high-voltage substations (154/34.5 kV) ", *Radiation Protection Dosimetry* 128 (4) (2008) 464–470.
- [94] A.S. Farag, M.M. Dawoud, T.C. Cheng, J.S. Cheng, "Occupational exposure assessment for power frequency electromagnetic fields", *Electric Power Systems Research* 48 (January (3)) (1999) 151–175.
- [95] A.S. Safigianni, C.G. Tsompanidou, "Electric- and magnetic-field measurements in an outdoor electric power substation", *IEEE Transactions On Power Delivery* 24 (January (1)) (2009) 38–42.
- [96] S. Safigianni, A. Kostopoulou, "Electric and magnetic field measurements in an indoor electric power substation", *Journal of Materials Processing Technology* 181 (2007) 126–130.
- [97] A.N. Proios, S.D. Anagnostatos, A.D. Polikrati, P.T. Tsarabaris, E.I. Koufakis, "Magnetic field measurements near a compact kiosk type substation", in: *MELECON 2010 15th IEEE Mediterranean Electro technical Conference*, Valletta, April 26–28, 2010, pp. 332–336.
- [98] S. Ozen, "Evaluation and measurement of magnetic field exposure at a typical high-voltage substation and its power lines", *Radiation Protection Dosimetry* 128 (2) (2008) 198–205.
- [99] P.H. Pretorius, K.R. Hubbard, "Electric field exposure in a 765 kV open air substation", in: *CIGRE 2009 6th Southern Africa Regional Conference*, Somerset West, 2009, pp. 41–44.
- [100] A.H. Hamza, S.A. Mahmoud, N.M.A. Gawad, S.M. Ghania, " Evaluation of magnetic induction inside humans at high voltage substations", *Electric Power Systems Research* 74 (2005) 231–237.
- [101] K. Ellithy, Shafai, A.A. Assiry, A. Fahad, "Measurement of magnetic fields in an outdoor high voltage power substation", in: *North American Power Symposium (NAPS)*, Starkville, MS, USA, October 4–6, 2009, pp. 1–6.
- [102] I. Said, A.S. Farag, H. Hussain, N.A. Rahman, "Measurement of magnetic field from distribution substations in Malaysia", in: *Australasian Universities Power Engineering Conference (AUPEC 2004)*, Brisbane, Australia, September 26–29, 2004.

- [103] I.O. Habiballah, M.M. Dawoud, K. Al-Balawi, A.S Farag, "Magnetic Field Measurement & Simulation of A 230 kV Substation", in Proceedings of the International Conference on Non-Ionizing Radiation at UNITEN (ICNIR 2003), Electromagnetic Fields and Our Health, 20th–22nd October, 2003, pp. 1–12.
- [104] EMF Workstation Software 2.51, "Enertech Consultants of Santa Clara County Incorporated", Campbell, CA, USA, 2009.
- [105] V.T. Munteanu, M. Purcar, L. Grindei, A. Racasan, "Study of the electric field generated by the high voltage substations", selected topics in mathematical methods and computational techniques in electrical engineering, 2010, pp.74–77, ISBN: 978-960-474-238-7.
- [106] Charalambos P. Nicolaou , Antonis P. Papadakis, Panos A. Razis , George A. Kyriacou , John N. Sahalos, "Simplistic numerical methodology for magnetic field prediction in open air type substations", Electric Power Systems Research 81 (2011) 2120–2126.
- [107] Charalambos P. Nicolaou , Antonis P. Papadakis, Panos A. Razis , George A. Kyriacou , John N. Sahalos, "Experimental measurement, analysis and prediction of electric and magnetic fields in open type air substations", Electric Power Systems Research 90 (2012) 42–54.
- [108] K.Bounaya, S.Gouaidia, H.Labar, "Les réseaux électrique, première partie, Eléments de description et d'analyse de base ", Livre 2010, Université de Guelma.
- [109] CIGRÉ, Group de travail, 36.01 (Interférences et champs) , "Champs électriques et magnétiques engendrés par les réseaux de transport. Exemple de calcul des perturbations électromagnétiques par la méthode CIGRÉ", Travail 21-43, 1980, Paris.
- [110] Olivier Houet, "Dimensionnement d'une jonction triphasée", mémoire d'ingénieur, université de Liège, 2008.
- [111] M.BRAHAMI, A.TILMATINE, F.MEGHNEFI et H.SAYAH, "prédétermination des grandeurs liée aux conséquences de l'effet couronne sur les lignes haute tension", ACTA ELECTROTHERMICA, Vol 49 (1) 2008.

- [112] CIGRÉ, Group de travail, 36.01 (Interférences et champs) , "Addendum to interference produced by corona effect of electric systems: description of phenomena and practical guide of calculation", 1997.
- [113] CIGRÉ, Group de travail, 36.01 (Interférences et champs) , "le transport de l'énergie électrique et l'environnement : Champ bruits et perturbation", 1991.
- [114] A. Taflove and S.C. Hagness, "Computational electromagnetics: the finite -difference time domain method. Artech House", Boston (USA), 2ème edition, 2000.
- [115] K.J. Binns, P.J. Lawrenson, and C.W. Trawbridge, "The analytical and numerical solution of electric and magnetic fields", chapter 8, pages 227-231. John Wiley & sons, Chichester (UK.), 1994.
- [116] KANE S. YEE. "Numerical Solution of Initial Boundary Value Problems Involving Maxwell's Equations in Isotropic Media", IEEE Tran on antennas and propagation, VOL.AP-14, NO.3. May, 1966.
- [117] A. Taflove and M. E. Brodwin. "Numerical solution of steady-state electromagnetic scattering problems using the time-dependent Maxwell's equations", IEEE, Transaction on Microwave Theory and Techniques, vol.23, n08, 1975.
- [118] Mur G., "Absorbing boundary conditions for the finite-difference approximation of the time-domain electromagnetic field equations", IEEE Tans. Electromagn. Compat., EMC-22, pp. 377-382, 1981.
- [119] Engquist B., Majda A, "Absorbing boundary conmtions for the numerical simulation of waves", Math.Comput., 31, pp. 629-651, 1977.
- [120] Berenger l, " A perfectly matched layer for the absorption of electromagnetic waves", J. Comput. Phys. ,114,pp. 185-200,1994.
- [121] IF. Deford and OM.P. Gandhi, "An impedance method to calculate CUITents induced in biological bodies exposed to quasi-static electromagnetic field", IEEE Trans. EMC, 27(3): 168-173, August 1985.
- [122] G. Dhatt, G. Touzot, E. Lefrançois, "Méthode des éléments finis". Hermes science 2005.

- [123] Ramesh Garg, "Analytical and Computational Methods in Electromagnetics", ARTECH HOUSE, USA 2008.
- [124] Alett, P. L., A. K. Baharani, and O. C. Zienkiewicz, "Application of Finite Elements to the Solution of Helmholtz's Equation," Proc. IEE, Vol. 115, 1968, pp. 1762–1766.
- [125] Juan PRADO OUVAREZ , "Conception et réalisation d'un microsystème de mesure par spectroscopie de bioimpédance" ,Thèse de doctorat 2006, UHP, Nancy 1.
- [126] J.C. Fernandez, H.L. Soibelzon, " The electric field of catenary high voltage power lines", in: EMC Europe 2002, vol. 2, Sorrento, Italy, 2002, pp. 1059–1062
- [127] El Bahi AZZAG, " Problèmes de contournement et perforation des isolateurs de haute tension " , Thèse de doctorat 2007, Université d'Annaba.
- [128] G.LE ROY, C. GARY, B. HULZER, J. LALOT, C.DUBANTON." Les propriétés diélectriques de l'air". Editions Eyrolles n° 51 ; 1984.
- [129] R.PELISSIER, " L'effet couronne sur les lignes aériennes", Techniques de l'ingénieur Tome 1, indice D-160,1951.
- [130] A.MAUDUIT " Installations électriques à haute et basse tension", Editions Dunod Paris 1964.
- [131] TOURAB wafa "caractérisation de l'environnement électromagnétiques au voisinage des Lignes haute tension " Thèse de doctorat, université de Annaba 2016.
- [132] Billel Ali Rachedi, Abdesselam Babouri:"Computation of electromagnetic field generated by multi-parallel power lines and effect of obstacles on their distribution" Acta Technica. Vol. 61 No.1 (2016), pp. 59-72.
- [133] W. Tourab, A. Babouri " Measurement and Modeling of Personal Exposure to the Electric and Magnetic Fields in the Vicinity of High Voltage Power Lines" Safety and Health at Work, Vol.7, Issue N° 2 (2016) Journal-Elsevier, ISSN: 2093-7911.
- [134] Ali Rachedi B, Babouri A. and X. Zhang " Electromagnetic Pollution Inside High-Voltage Substation" Revue Roumaine de Sciences et Techniques (Vol.61, N°2, 2016).

- [135] W. Tourab, A. Babouri "Monitoring of Electromagnetic Pollution inside switchyard substation (case study: El-Hadjar electrical post in Annaba city, Algeria)" *Revue des sciences et de Technologies (Synthèse) N°:31*, PP. 101-107.
- [136] Ali Rachedi B, Babouri A., Lemzadmi, A., Nemamcha, M., Berrouk F "Evaluation of electromagnetic field produced by multi-parallel high voltage lines" *IEEE International Conference on Intelligent Energy and Power Systems (IEPS), Kyiv, (Proceeding IEEE xplore) 2014 ISBN:978-1-4799-2265-9*.
- [137] Ali Rachedi B, Babouri A., Berrouk F. "Modeling of Electromagnetic Field Generated by High Voltage lines Using Comsol Multiphysics", *proceeding of 8th International Conference CEE 2014 November 16–17, Batna, ISBN:978-9961-9973-7-6*
- [138] A. Babouri, W. Tourab, et M. Nemamcha "A study of the electromagnetic environment in the vicinity of high-voltage lines" *4th, IEEE International Conference on Power Engineering, Energy and Electrical Drives, POWERENG2013, 13-17 May 2013 in Istanbul/Turkey. (Proceeding IEEE xplore) ISSN: 2155-5516, ISBN: 978-1-4673-6391-4*.
- [139] W. Tourab, A. Babouri et M. Nemamcha. "Experimental Study of Electromagnetic Environment in the Vicinity of High Voltage Lines." *American J. of Engineering and Applied Sciences 4 (2): 209-213, 2011*.
- [140] W. Tourab, A. Babouri et M. Nemamcha "Characterization of the electromagnetic environment at the vicinity of power lines" *21st International Conference on Electricity Distribution CIRED, Frankfurt, 6-9 June 2011*.
- [141] Ali Rachedi B, Babouri A., Berrouk F "Measurement and Calculation of Electromagnetic Pollution in the Vicinity of the Maximum Sag of Very High Voltage Line" *International Conference on Electro-Energy (ICEE'2014) le 09-11 November 2014 Skikda-Algeria*.
- [142] Ali Rachedi B, Babouri A., Berrouk F "Measurement of Electromagnetic field in the vicinity of Multi-Parallel Power Transformers Inside High Voltage Substation" *The International Conference on Information Processing and Electrical Engineering (ICIPEE14) Tebessa, November 24 – 25*.

- [143] Ali Rachedi B, Babouri A., Berouk F “A Study of Electromagnetic Field Generated by High Voltage Lines Using Comsol Multiphysics” Conférence Internationale en Sciences et Technologies Electrique au Maghreb (CISTEM 14) 3-6 Novembre 2014 à Tunis.
- [144] W. Tourab, A. Babouri et M. Nemamcha “Experimental and Theoretical Modeling of the Electric and Magnetic Field Behavior in the Vicinity of High Voltage Power Lines” International conference on Electrical, Computer, electronic and communication engineering ICECECE, JUNE 27-28, 2013 PARIS- France.
- [145] B. ALI RACHEDI, A. BABOURI, W. TOURAB et M. NEMEMCHA “Étude de risque des champs électromagnétiques générés par les lignes Haute Tension” Deuxième Conférence Internationale sur la Maintenance, la Gestion, la Logistique et l’Electrotechnique 19-21 Novembre 2012, ENSET Oran – ALGERIE.
- [146] W. TOURAB, A. BABOURI et BOULEHBAL A. “ Behavior of electric and magnetic fields in vicinity of over head multi-line power system” Deuxième Conférence Internationale sur la Maintenance, la Gestion, la Logistique et l’Electrotechnique 19-21 Novembre 2012, ENSET Oran – ALGERIE.
- [147] W. Tourab, A. Babouri et M. Nemamcha” Improvement of EMC in a high voltage line by reducing the electric field generated” 16ème édition du Colloque International sur la Compatibilité ElectroMagnétique (CEM 2012)., - 25 au 27 Avril 2012 Rouen, France.
- [148] W.Tourab, A. Babouri et M. Nemamcha,"Caractérisation d’une ligne haute tension comme source de perturbation électromagnétique : cas poste EL Hadjar au nord Est Algérien" 2ème Journées Internationales d’Electrotechnique, de maintenance et de Compatibilité Electromagnétique JIEMCEM 2010, 25-26 Mai 2010 Oran, Algérie.

