

17/621.770

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



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

Domaine : **Sciences et Techniques**  
Filière : **Electrotechnique**  
Spécialité : **Réseaux Electrique**

---

**COMPATIBILITE ELECTROMAGNETIQUE : étude théorique  
expérimentale de l'environnement électromagnétique généré par  
les lignes HT**

---

Présenté par :  
**ABAKAR IBRAHIM DJABAYE**



Sous la direction de :  
**Mr. Dr. BABOURI Abdelesselam**

**JUIN 2012**

# Remerciement

Je tiens à remercier tous ce qui m'ont aidé de pré ou de loin sur ce projet

J'adresse mes remerciement a tout ma famille mes amis, ainsi que tous me collègue avec le quel nos discussions sont amicale et fraternel

En fin

J'ai ne pourrai pas finir mes remerciement sans pensés a mon encadreur

Mr : BABOURI ABDELSSEM

Et sans oublier

Mr : LADJIMI ABDEL AZIZ ainsi que le chef de département

Mr : BOULOUH.M



## SOMMAIRE

### ➤ Introduction .....

### **Chapitre : bibliographique de l'environnement EM génère par le ligne haute tension**

I.1 Transporte d'énergie électrique .....	2
I.1. a) Les lignes électriques.....	2
I.1 b) Rôles des lignes électriques .....	2
I.1 c) type des lignes électriques .....	2
I. d.) Lignes aériennes et conducteurs.....	2
I.2. Schéma électrique équivalent d'une ligne .....	4
I.3. Les caractéristiques techniques de la ligne électrique .....	4
I.3 a) Configuration en triangle .....	5
I.3. b) Configuration en nappés .....	5
I. 4.) Différent type de conducteurs .....	5
I.4.1 Les câbles conducteurs .....	5
I.4.2)- configuration en triangle.....	6
I.5.) Modélisation de ligne haute tension.....	7
I.5. a) Calcul de capacité partielle La ligne électrique.....	8
I.5.b) Calcul des coefficients d'influences (capacitifs).....	8
I.6.) Modélisation avec la méthode numérique .....	9
I.6.1.) Element finis (FEM) .....	9
I.6.2) Le maillage .....	10
I.6.3. maillage linéaire .....	10
I.6.4 .maillage surfacique .....	11
I.6.5 mailage volumique.....	11
I.7.logicielle de éléments finis.....	11
I.7. a) Le champ électromagnétique.....	12
I.7.b) Mesure de champs électrique .....	13
I.7.c) Mesure des champs magnétiques.....	13
I. 7. d) Equation de Maxwell .....	14
I.8.) Compatibilité électromagnétique.....	14
I.8.1) Emissivité.....	15
I.8.2) L'immunité .....	15
I.9.) Mécanisme d'action des perturbations électromagnétiques.....	15
I. 9. a) Nature de source de perturbation.....	16
I.9.b) perturbation rayonnée .....	17
I.9.c perturbation d'une onde plane .....	18
I.10.) Mécanisme de transmission des perturbations.....	18
I.10.a) Les différents modes de couplage des perturbations électromagnétiques.....	18
I.10.b) Couplage par conduction.....	18
I.10.c) Couplage par rayonnement .....	19
I.10.d) Couplage par conduction.....	19
I. 11. Les couplages par liaison directe.....	19
I.11.1 Mode différentiel.....	19
I.11.2 Mode commun .....	19
I.11.3 Les couplages par impédance commune.....	19
I.11.4 Couplage par rayonnement .....	20

I.11.3 Les couplages par impédance commune.....	19
I.11.4 Couplage par rayonnement .....	20
I.11.5) Le couplage en champ lointain.....	20
I.11.6 Couplage de champ magnétique a câble en mode commun.....	20
I.12. Definition .....	21
I.12 a) La compatibilité électromagnétique.....	21
I.13. quelque étude.....	22
I.13.a) Etude N° 1 .....	22
I.14. Description du suyteme.....	23
I.15. États et Simulation de Frontiere Parametres.....	23
I.16. Etude N° 2 .....	27
I.16.a) Etude expérimentale d'environnement électromagnétique .....	27
I.16.b) Recherche expérimentale .....	27
I.17.matériels et méthodes .....	28
I.17. a) Modèle de description.....	28
I.17. b) Résultats.....	29
I.18. Conclusion générale.....	30

## **Chapitre II : Interactions des champs EM avec les milieux biologique**

II.1. Modélisation des Interactions Sources EM/milieux Biologiques .....	32
II.2. Comportement électrique des tissus biologiques.....	36
II.2.1 Phénomène de polarisation et relaxation.....	36
II.2.1a) Dispersion $\alpha$ .....	38
II.2.1b) Dispersion $\beta$ .....	39
II.2.1c) dispersions $\gamma$ .....	40
II.3. Modélisation des propriétés électriques des tissus.....	40
II.3.1 Modèle de Fricke.....	40
II.3.2 Le Modèle de Debye.....	40
II.3.3 Le mode de Cole-Cole.....	41
III.4.Techniques de mesure des propriétés électriques des milieux biologiques.....	42
II.4.1) Le contexte normatif.....	45
II.5. Un peu d'histoire.....	45
II.5.1 Le Standard IEEE C95.1-1999 .....	46
II.5.2 Les recommandations ICNIRP.....	47
II.5.3 Normes sur les implants.....	49
II.6. Diversité de l'étude et une bibliographiques récente.....	49

## **Chapitre III : Champs électromagnétiques rayonnés par les lignes hautes tensions**

III.1 Champs électromagnétiques basse fréquence .....	51
III. a) Définition .....	51
III.2. Sources de champs électromagnétiques .....	52
III.2.1 Les champs naturels .....	52
III.2.2 Les champs artificiels .....	52
III.2.3.Couplage avec les champs électriques bases fréquence .....	52
III.4.Couplage avec les champs magnétiques bases fréquence .....	53
III.5. Niveaux de champs rayonnés.....	54
III.6.Contexte normatif .....	56
III.6.1Tableau des normes.....	57
III.7. Champ électrique .....	57
III.7.a) Champ magnétique .....	57
III.7.b) Calcul analytique du champ électromagnétique .....	58

III.8. Calcul du champ électrique.....	58
III.9. Calcul du champ magnétique .....	59

**Chapitre : VI Modélisation du champ électrique et magnétique généré par une ligne haute tension**

VI .1 Présentation du modèle .....	64
VI.2 Caractéristiques de la ligne.....	65
VI.3 Modélisation Analytique .....	65
VI.3.2 Profile du champ magnétique .....	66
VI.3.1 Profile du champ électrique.....	66
VI .4. Modelé Numériques.....	67
VI.4 a)Méthode des Elément finis .....	67
VI.4.b) Champs Electrostatique et Magnétostatiques .....	67
VI.4.c) Electrostatique .....	68
VI.4.d) Magnétostatiques .....	68
VI.5 .Maillage du modèle .....	69
VI.6 comparalson et discussion .....	71
<b>Conclusion .....</b>	<b>72</b>

## *Introduction générale*

## INTRODUCTION GENERALE

La problématique de la source électromagnétique ainsi que la qualité de l'électricité concerne tous les acteurs en présence, qu'ils soient Gestionnaires de réseaux, utilisateurs de ces réseaux (producteurs ou consommateurs d'électricité) a, fait de l'exposition des humains a ces champs électromagnétiques un sujet qui préoccupe les physiciens et les scientifiques ainsi que les ingénieurs de Génie électrique, Intervenants (fournisseurs d'électricité ou de services, organismes de régulation...). Le champ électromagnétique a plusieurs aspects parmi lesquels, l'aspect positif qui consiste à l'utilisation de champs électromagnétiques en médecine pour les diagnostics (imagerie par résonance magnétique) En outre, le champ électromagnétique intervient aussi pour l'utilisation en thérapie (hyperthermie électrostimulations.....etc.) malgré l'avantage que rapporte le champ électromagnétique pour les besoins dans certains domaines essentiels en médecine mais elle a aussi d'autres conséquences sur les humains à long terme, ou à court terme.

En effet la perturbation électromagnétique, lors de l'implantation active (pacemaker, défibrillateur), effet en biologie effet sur la santé l'utilisation de champs électromagnétiques occupe un vaste sujet dans le domaine de la biologie à cause de sa diversité de propriétés des champs électromagnétiques elle occupe une position centrale vis à vis de Sa responsabilité est de mettre en œuvre les moyens permettant de maîtriser ces interactions des champs EM avec les tissus biologiques Quand les tissus sont soumis à un champ électromagnétique une partie est réfléchi et l'autre pénètre Le champ qui pénètre et bien calculer à l'aide des modèles en utilisant le fantôme (gel, eau, salé) ; Le rayonnement électromagnétique se divise en deux types de rayonnement :

Rayonnement ionisant (RI) et l'autre non ionisant (RNI), la source d'interférences dans la gamme de rayonnement non ionisant pouvant altérer ou perturber le bon fonctionnement de implants actifs sont de plus en plus nombreux et couvrent toutes les gammes des fréquences, de basses fréquences aux hautes fréquences surtout dans la fréquence intermédiaire dans lesquelles des essais *in vitro* et *in vivo* ont été réalisés

Le but d'un CEM est plusieurs :

Faire fonctionner la victime dans un milieu possédant un niveau de perturbations donné

Limité la perturbation de victime par son environnement.

La problématique classique de CEM met en jeu trois acteurs principaux

La source de perturbation, le couplage appelé aussi le milieu de propagation de signal perturbateurs et le dispositif perturbé appelé victime.

Dans ce mémoire le travail est divisé en quatre chapitres :

Le premier chapitre intitulé (étude bibliographique de l'environnement EM généré par les lignes HT) présente les différentes configurations des lignes haute tension ainsi que les caractéristiques des lignes

Le deuxième Chapitre intitulé (Interactions des champs EM avec les milieux biologique) présente le phénomène et le Comportement électrique des tissus biologiques.

Le troisième chapitre est intitulé (Champs électromagnétiques rayonnés par les lignes haute tension)

Présente rayonnement électromagnétique généré par la différente source de perturbation naturel et artificiel.

En fin le quatrième Chapitre intitulé (Modélisation du champ électrique et magnétique généré par une ligne haute tension) présente la simulation de ligne haute avec quelque étude par les deux méthodes Analytique et Numérique par des logiciels COMSOL et MATLAB.

## I. Les lignes Haute Tension.

### I.1 Transporte d'énergie électrique :

L'élément intermédiaire entre les centrales électriques et les différents consommateurs, qui peuvent assurer des puissances des lieux de leur production est appelé la ligne électrique. La figure 1 montre le transport de l'énergie électrique à partir d'une centrale électrique.

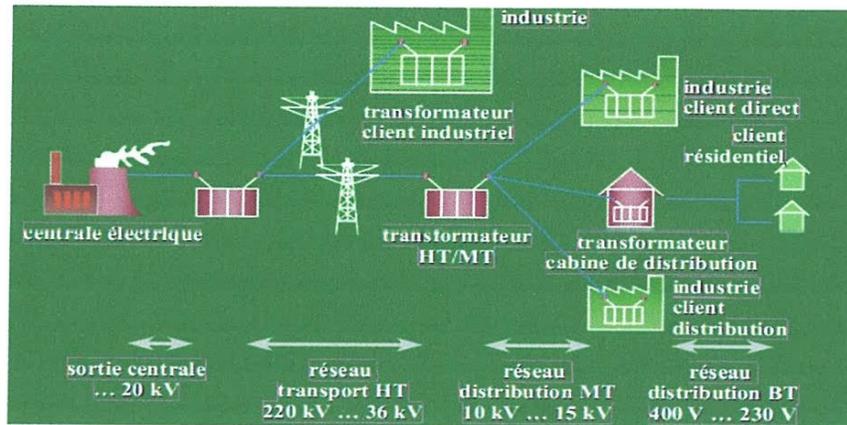


Figure 1.1: transport de l'énergie électrique

#### I.1 a). Les lignes électriques :

Une ligne est l'ensemble électrique des conducteurs, d'isolants et d'éléments accessoires destinés au transport de l'énergie électrique, les conducteurs solide (porcelaine, verre papier, matière plastique) combinée avec un gaz, air, Liquide... etc.

#### I.1. b). Rôles des lignes électriques :

Le transport d'énergie électrique du producteur (centrale électrique) au consommateur (ville, quartier; maison et ensemble industriel) se fait à l'aide des lignes électriques qui constituent les artères d'un système d'énergie électrique.

#### I .c).type des lignes électriques :

Les lignes électriques peuvent être classées suivant plusieurs critères, Situation dans l'espace ligne aérienne, ligne souterrains (câble)

On distingue deux classes de ligne de tension, Ligne a haute tension et ligne a basse tension

- Nature de la tension : continue, alternative, monophasée ou triphasée

#### I d.) Lignes aériennes et conducteurs :



*Figure I. 2. Transport de l'énergie électrique*

Les lignes hautes tensions sont les plus grosses ligne des réseaux de distributions d'électricité. Ce sont ces lignes Aériennes au souterraines, qui servent au transport et a la répartition des l'énergie électriques produit dans le diverse centrales de la province. Elle transporte l'énergie électrique à de tensions comprises entre 45 et 75 kV. A sortie de la centrale, L'électricité est portée aune tension élevée au moyen d'un transformateurs, afin de Réduire les pertes dues au transport de l'électricité, sur de longues distances, l'électricité et en suite ramené a Des tensions inferieurs en fonction des besoins des utilisateurs dans des postes de transformation les utilisateurs de la haute tension des industries des grandes consommations d'électricités, comme les entreprises du secteur de la chimie de grande usine, au de société de distribution d'électricités Les réseau de haute tension de l'Algérie est constitue de liaison dont la tension s'élève a (400kv), (220kv), (150kv), (90kv), (30kv), L'électricité aux sociétés des distributions et ramène a des tensions entre (5kv, et 15kv) les foyers domestique sont Alimentés en 230volte.

### I.2. Schéma électrique équivalent d'une ligne :

Les lignes électriques et les câbles sont des systèmes à constantes réparties c'est-à-dire que les grandeurs physiques (résistances, inductance, capacité,) sont réparties sur toute la longueur de la ligne et ne sont donc pas localisées (figures...)

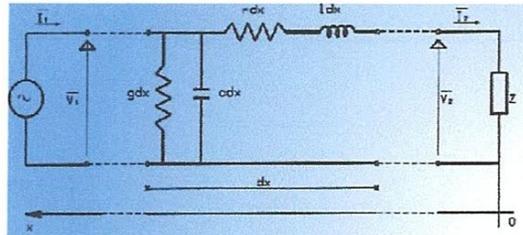


Figure 1.3 : Schéma par phase d'une ligne en régime sinusoïdale.

(La structure la plus employée pour représenter une ligne et le schéma équivalent en pi ; représenté à la figure) ...

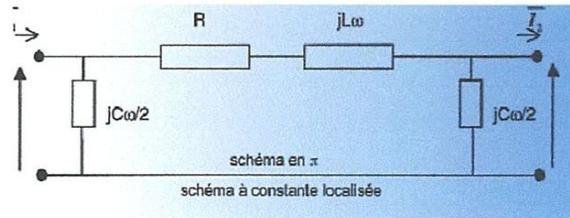


Figure I. 4 : Configuration d'une ligne Haute tensions

### I.3. Les caractéristiques techniques de la ligne électrique :

On distingue plusieurs configurations des lignes haute tension existantes, parmi lesquelles on a les configurations, en nappe en triangle, étagé, en drapeaux ou double drapeaux..

Une ligne électrique aérienne comporte les composants suivants :

- Le composant fixe : le pylône et sa fondation,
- le composant mobile : les câbles et le matériel d'armement.

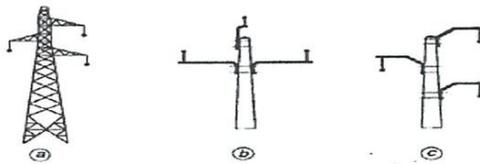
Pour transporter le courant électrique on utilise des câbles conducteurs qui sont portés par des pylônes. Ces câbles sont « nus » c'est-à-dire que leur isolément

Électrique est assuré par l'air.

La distance entre deux supports est d'environ 50 mètres. Les caractéristiques géométriques (hauteur, largeur, Emprise au sol) dépendent du type de pylône utilisé. Le type de pylône peut varier en fonction des efforts mécaniques à supporter, du relief et du mode d'insertion Paysagère. Pour tous les supports, les fondations sont constituées de quatre massifs indépendants en béton ou par des pieux métalliques battus ou forés, suivant les caractéristiques mécaniques de la sole .Les pylônes peuvent être peints pour de raisons d'environnement ou de servitudes aéronautiques. L'équipement de base de la ligne

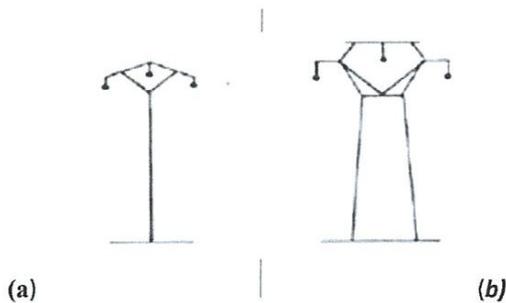
### I.3 a) Configuration en triangle :

Il existe plusieurs configurations en triangle selon les conducteurs constituant chaque câble :



### I.3. b) Configuration en nappés :

De mémé pour la configuration en triage selon les conducteurs.



### I. 4.) Différent type de conducteurs :

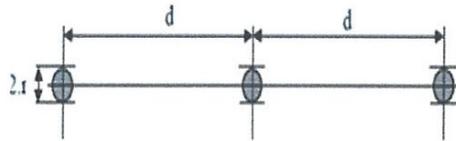
#### I.4.1 Les câbles conducteurs :

La ligne électrique aérienne constituée de deux circuits électriques triphasés, Chaque circuit est composé de trois phases, chaque phase étant elle-même composée de *Trois câbles*

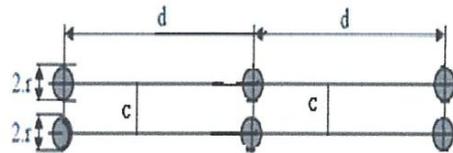
(Faisceau triple) reliés aux pylônes par l'intermédiaire de chaînes d'isolateurs en Verre trempé qui assurent

L'isolation entre le pylône et les câbles sous tension. Les faisceaux Seront constitués de 3 câbles.

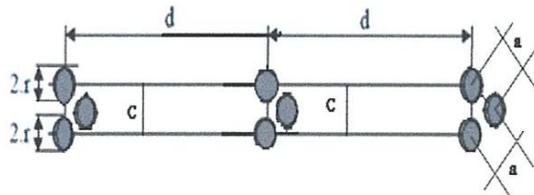
**Un conducteur dans chaque câble :**



**Deux conducteurs dans chaque câble**



**Trois conducteurs dans chaque câble**

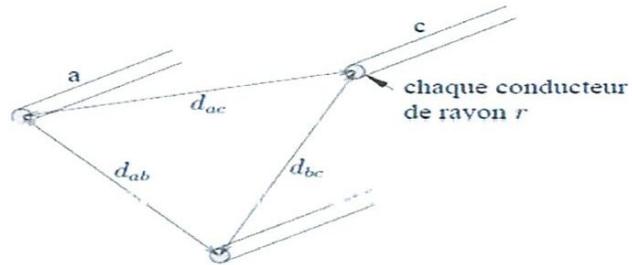


Le câblé de garde de section plus petite que les câbles conducteurs, ils sont directement raccordés à la Partie supérieure du pylône Ils ont une double utilité Il qui protègent les conducteurs d'éventuels coups de foudre directs et permettent, en cas d'incident l'écoulements de la terre des courants de foudre et de court-circuit, via les supports L'un d'entre eux est utilisé comme voie de télécommunication les liaisons de télécommunication incorporées au câble (fibres optiques) Permettent transporter les informations nécessaires au fonctionnement du réseau de transport d'électricité, d'un Poste électrique à l'autre.

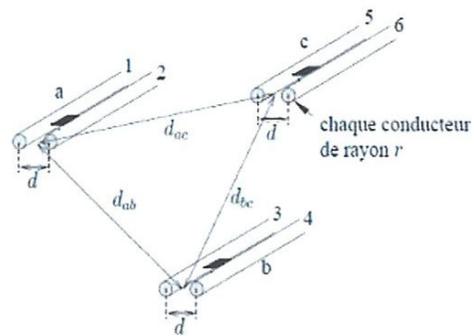
**I.4.2)- configuration en triangle**

Il existe plusieurs configurations en triangle selon les conducteurs constituant chaque câble :

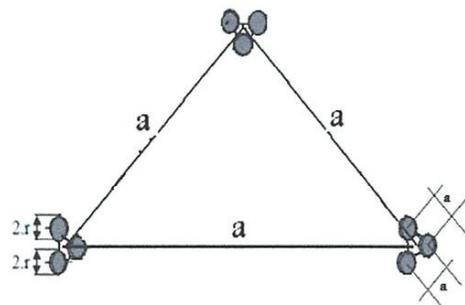
**-conducteur dans chaque câble**



**Deux conducteurs dans chaque câble**



**Trois conducteurs dans chaque câble**



## I.5.) Modélisation de ligne haute tension

*Chapitre I : étude bibliographique de l'environnement EM  
généralisé par les lignes HT*

### I.5. a) Calcul de capacité partielle La ligne électrique

### I.5.b) Calcul des coefficients d'influences (capacitifs).

Ces coefficients interviennent dans les équations de et se déterminent numériquement, En cet ouvrage, par la solution du problème du champ électrostatique de la ligne électrique triphasée Le procédé de calcul. On considère la ligne triphasée ayant une tension électrique non nulle arbitraire sur un Conducteur de phase seulement, les autres tensions des conducteurs de phase étant égales à zéro. Le procédé S'applique successivement, pour tous les conducteurs L'expression de calcul, pour les quatre variantes du problème du champ électrique analysées successivement, sont: avec éléments finis, FEMM, conformément au Procédé présenté en cet ouvrage. D'abord on calcule l'intensité du champ électrique à 1,8 m de hauteur et Les coefficients capacitifs de la ligne. Les valeurs Obtenues sont comparées avec les valeurs calculées

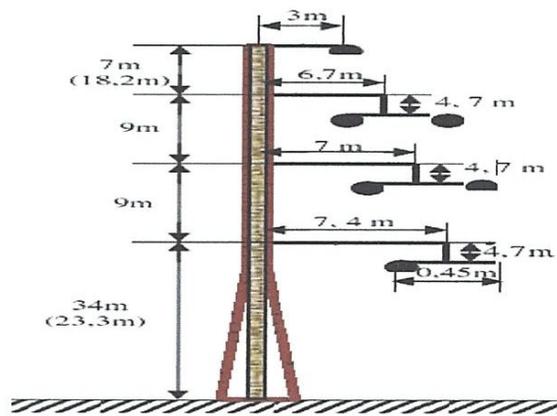


Figure I. 5. le pylon et le position des conducteurs de la ligne electrique

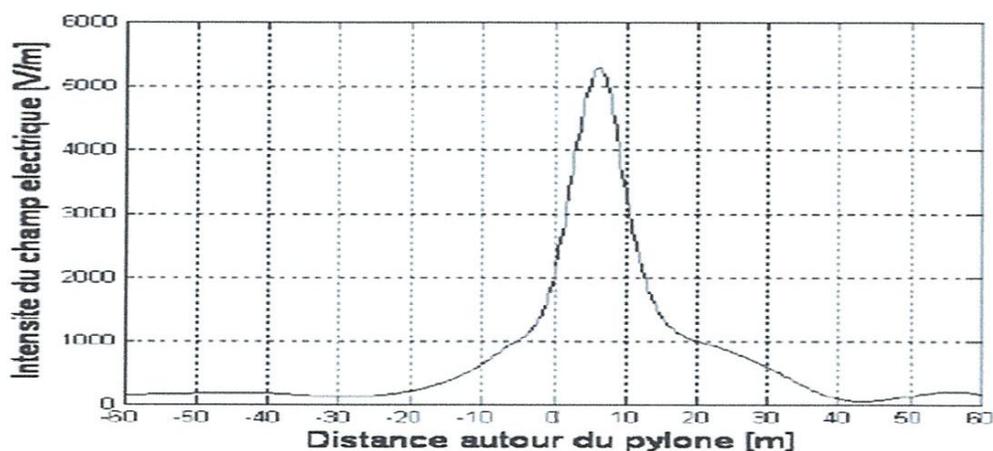


Figure .I. 6 : représenté le champ electrique de la ligne a 1,8m au dessus du sol

L'analyse aux éléments finis du champ électrique de la ligne électrique de transport prend en considération la structure réelle des lignes électriques aériennes à haute tension ayant les phases constituées d'un faisceau de deux conducteurs séparés, par comparaison, la méthode d'images électriques (la méthode CIGRÉ) réalise l'analyse en remplaçant les conducteurs en parallèle de la ligne par un seul

conducteur équivalent, ce qui produit d'erreurs supplémentaires de calcul. De l'analyse de l'exemple de calcul on observe que les valeurs d'intensité du champ électrique, des

charges électriques et des coefficients capacitifs, déterminés numériquement, sont comparables par rapport aux grandeurs déterminées, par le calcul analytique qui utilise des hypothèses simplificatrices. En conséquence, l'analyse avec éléments finis, en utilisant la transformation de Kelvin pour les domaines de champ ayant de frontières ouvertes, est un procédé numérique alternatif pour les méthodes analytiques de calcul du champ électrique d'une ligne électrique aérienne.

#### **1.6.) Modélisation avec la méthode numérique :**

##### **1.6.1.) Element finis (FEM) :**

méthode de élément fini ou résolution numérique système de physique, élaborés par le scientifique. Par ailleurs les récents progrès du calcul automatique ont permis la mise en œuvre de méthodes de calcul qu'il n'était pas concevable d'envisager auparavant. Ces méthodes numériques ont permis notamment, la possibilité d'effectuer une grande quantité de calculs dans des temps brefs, la prise en compte de non-linéarité dans toutes sortes d'équations ainsi la résolution de ces dernières. Cependant, il faut bien être conscient que la résolution numérique d'équation aux dérivées partielles conduit à l'obtention d'une solution approchée. En effet, comme on le verra ultérieurement, le principe des méthodes numériques repose sur l'approximation du problème continu initial par un système discret d'équations algébriques linéaires ou non linéaires stationnaire ou non stationnaire (selon la nature du problème initial), et elle peut résoudre le problème en une dimension, deux dimensions ou trois de grande dimension. En plus la méthode de élément finis, et l'une des méthodes pouvant résoudre les problèmes compliqués comme par exemple la simulation sur le milieu hétérogène, l'application de maillage dépeint de la taille de chaque élément constituent le système ; la figure résume une résolution numérique d'un système physique par la méthode EF. D'approximation et permettant de situer la proximité de la solution approchée par rapport à la solution exacte du problème initial ; une analyse de la stabilité des schémas numériques, compte tenu de l'influence possible de l'accumulation d'une part des erreurs systématiques

inhérentes aux procédés d'approximation et d'autre part des erreurs d'arrondi(ou de chute) ou de troncature dues à la mauvaise représentation des nombres réels en machines, et dont l'effet peut être de provoquer une perte importante

- Science de l'ingénieur pour construire l'équation aux dérivées partielles.
- méthode numérique pour construire et résoudre l'équation algébrique.

programmation et information pour exécuter efficacement de calculs sur l'ordinateur.

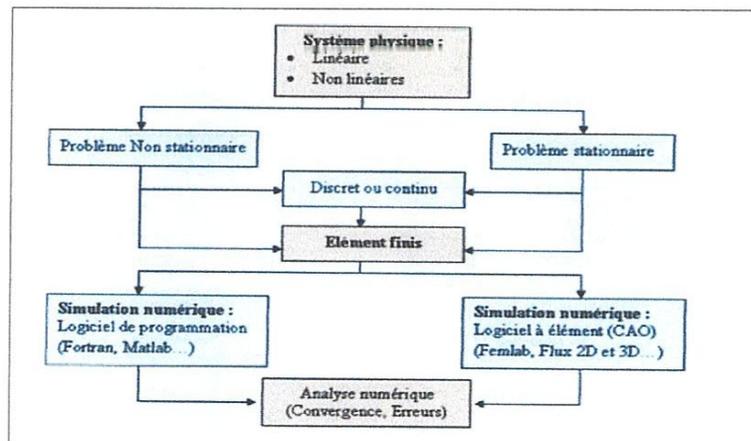


Figure 8 : représente la description de méthodes- résolutions d un système

### I.6.2) Le maillage

L'opération de maillage consiste à discrétiser le domaine  $\Omega$  en sous domaine  $\Omega$  et chaque sous domaine en maille élémentaire actuellement avec le développement d'électronique, le maillage ou la discrétisation du domaine se fait par de logicielle très performant appliquant la méthode de élément finis, Parmi eux le Flux 3D, FEMMLAB ; COMSOL ...etc. Ce logicielle dispose de 3sorte de mailles.

### I.6.3) Maillage linéaire :

Elles servent à mailler une courbe qui peut représenter le domaine linéique  $\Omega$  ou une section méridienne d'un domaine surfacique  $\Omega$  axisymétrique.

### I.6.4) Maillage surfacique :

Elles servent à mailler une surface qui peut représenter le domaine surfacique  $\Omega$

### I.6.5) Les maillages volumiques :

Dans ce cas le maillage ont une représentation volumique

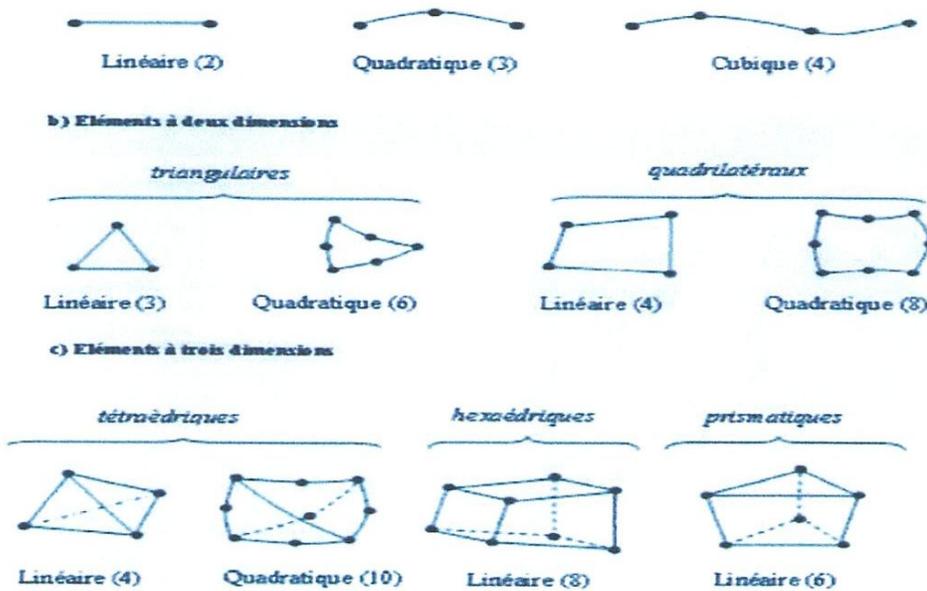


Figure 9 : représente les différents cas du maillage :

### I.7.) Le logiciel de élément finis :

dans notre étude le logiciel de simulation utilisé est COMSOL, ce qui permet de faire la simulation en 1D, 2D, 3D, avec une grande facilité d'utilisation, une bonne précision en usage dans de nombreux domaines, dans la mécanique, l'électronique et l'électrotechnique, la chimie, l'électromagnétique (figure 5) après avoir tracé le modèle sous forme d'un domaine, le maillage appliqué par ce logiciel se fait automatiquement, il prend en compte les différents sous-domaines du modèle. En plus, il est possible d'augmenter le nombre de mailles globalement ou bien pour chaque sous-domaine constituant le modèle. Il est possible de choisir la dimension de la maille pour chaque sous-domaine.

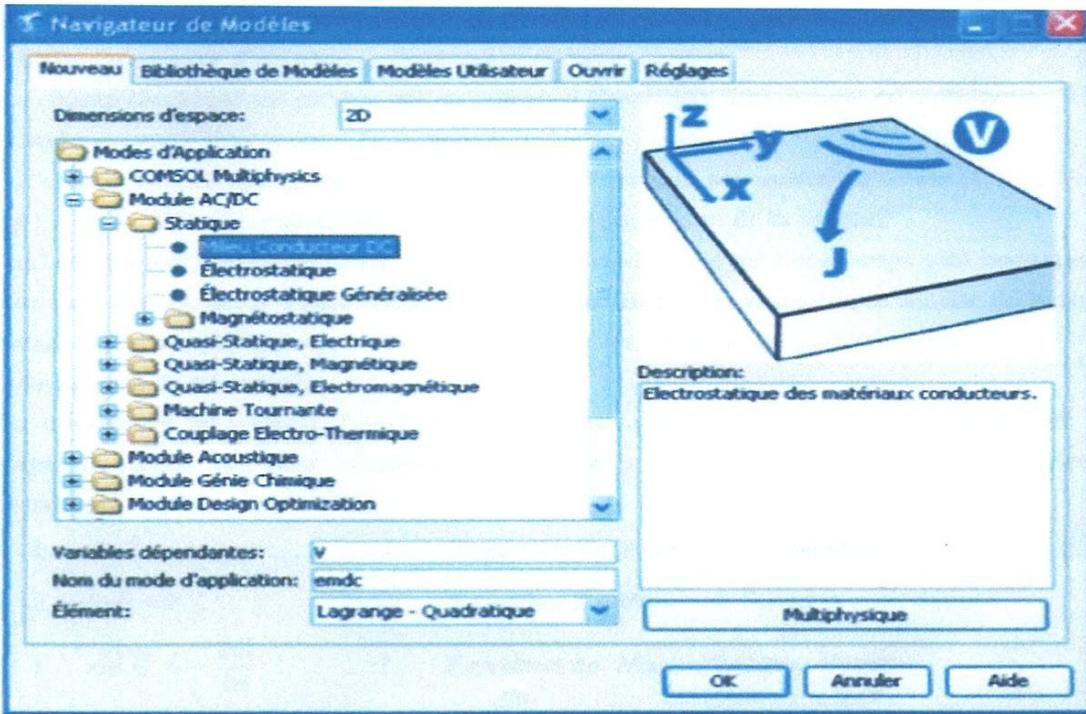


Figure .10- fenetre de logicielle COMSOL

### I.7. a) Le champ électromagnétique :

Lorsque les champs électriques ou magnétiques sont uniformes ou qu'ils oscillent mais avec une fréquence très basse, on peut les considérer séparément. Mais s'ils varient dans le temps avec des fréquences non négligeables (on parle de champs alternatifs), ils deviennent indissociables et on parle alors de champs électromagnétiques. Un champ électromagnétique est constitué d'un champ électrique sinusoïdal couplé à un champ magnétique également sinusoïdal. Ce champ électromagnétique se propage dans l'environnement à la vitesse de la lumière formant les ondes électromagnétiques. Un champ électromagnétique produit une force électromagnétique qui s'exerce sur toute particule chargée et qui est contrairement aux ondes sonores, qui ont besoin d'être supportées par un milieu matériel (l'air, par exemple), les ondes électromagnétiques peuvent se propager dans le vide. La somme de la force



### I. 7. d) Equation de maxwell :

Elle constituent une système d'équation aux dérivées partielles qui lie la variation spatiale et temporelle d'une grandeur vectorielle électrique à la variation spatiale et temporelle magnétique et autre :

$\text{div} \mathbf{D} = \rho_{\text{libre}}$ .....1	équation de maxwell Gauss électrique
$\text{div} \mathbf{B} = 0$ .....2	équation de maxwell Gauss électrique magnétique
$\text{rot} \mathbf{E} = -\partial \mathbf{B} / \partial t$ .....3	équation de maxwell Gauss électrique faraday
$\text{div} \mathbf{H} = \mathbf{j}$ .....4	équation de maxwell Gauss électrique Ampère

Ces équations sont complétées par les équations constitutives qui décrivent les propriétés électriques et magnétiques du milieu considéré.

$$5. \mathbf{B} = \mu \mathbf{H} \dots \dots \dots 5$$

$$6. \mathbf{D} = \epsilon \mathbf{E} \dots \dots \dots 6$$

$$7. \mathbf{J} = \sigma \mathbf{E} \dots \dots \dots 7$$

Avec  $\mathbf{B}$  induction magnétique,  $\mathbf{D}$  induction électrique,  $\mathbf{E}$  champ électrique,  $\mathbf{H}$  champ magnétique,  $\mathbf{J}$  densité de courant,  $\sigma$  conductivité électrique,  $\epsilon$  permittivité électrique,  $\mu$  perméabilité magnétique,  $\rho$  densité du courant .....

### I. 8.) Compatibilité électromagnétique

La Compatibilité Électromagnétique ou 'CEM' est une science relativement récente en tant que telle. La (CEM) prend depuis quelques années de plus en plus d'importance, compte tenu de la large diffusion et de la sophistication des nouveaux équipements électroniques (qui peuvent s'avérer sensibles aux perturbations électromagnétiques et aux émissions radio) et du développement de nouveaux services radioélectriques dont la radiotéléphonie numérique cellulaire.

La CEM (compatibilité électromagnétique) est une technique consistant à rendre compatibles plusieurs équipements fonctionnant ensemble, dans un milieu donné. Chaque équipement peut rayonner des signaux, induire des courants ou des tensions dans d'autres équipements. Ils doivent obéir à des normes limitant leurs perturbations, et à d'autres normes imposant un seuil

de susceptibilité suffisant pour ne pas être perturbé par d'autres équipements, ou par les perturbations naturelles comme la foudre.

La CEM est une expression qui comporte deux concepts :

**I.8.1) Emissivité :** le sigle EMI (interférence électromagnétique) caractérise les émissions produites par un appareil électrique ou électronique qui risquent, en fonction de leur intensité, de perturber d'autres équipements comme par exemples four à induction électromagnétique, les équipements de sécurité ou les dispositifs médicaux.

**I.8.2) L'immunité :** le sigle EMS (Susceptibilité Electromagnétique) caractérise l'immunité au rayonnement électromagnétique. On désigne ainsi la possibilité d'un appareil de fonctionner correctement malgré la présence de tels rayonnements.

La CEM couvre donc tous les thèmes qui participent de près ou de loin à la réalisation des deux principes fondamentaux cités précédemment. Parmi les domaines couverts, on peut citer:

1. la caractérisation de l'environnement électromagnétique (sources de perturbations ou d'émissions électromagnétiques).
2. l'étude des mécanismes de couplage.
3. l'étude de l'immunité des équipements aux perturbations.
4. les méthodes et moyens de protection (les dispositifs de filtrage et d'écrêtement des perturbations, le blindage, les règles d'ingénierie).
5. l'étude des effets biologiques des ondes électromagnétiques.

### **I.9.) Mécanisme d'action des perturbations électromagnétiques**

Le principe d'action des perturbations électromagnétiques est schématisé par le diagramme de la figure (1). Pour que se produise un phénomène de perturbation électromagnétique, trois éléments doivent être présents :

1. une source de perturbations,
2. un milieu de couplage,
3. une victime des perturbations

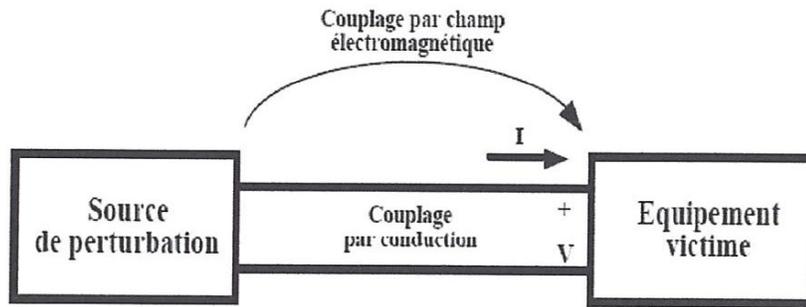


Figure 12 :represente couplage

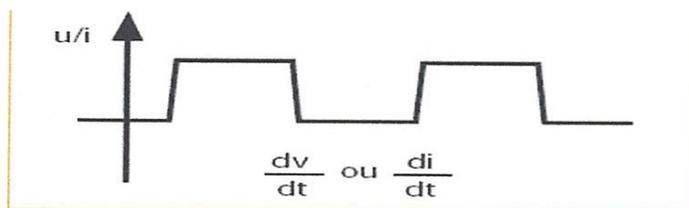
### I .9. a) Nature des sources des perturbations:

Les perturbations électromagnétiques peuvent prendre deux formes distinctes Les perturbations dites conduites et celles dites rayonnées. Les gammes de fréquences correspondant à chacune d'elles sont différentes et complémentaires (150kHz-30MHz et 30MHz-1GHz), Les signaux parasites émis par la source sont propagés vers la source d'énergie qui est désignée par le terme de "victime", de plusieurs façons, liées à leur environnement respectif,

Deux cas peuvent alors se présenter :

Si la source et la victime sont voisines avec ou sans liaison galvanique, le couplage est dit proche et il peut être de nature capacitive, inductive ou résistive les couplages sont représentés par des capacités mutuelles ou des résistances Les phénomènes perturbateurs sont dans ce cas les variations rapides de courant ou de tension ( $\frac{di}{dt}$ ,  $\frac{dv}{dt}$ ).

Ce type de perturbations est appelé **perturbations conduites**



Ces perturbations peuvent être rayonnées ou Conduites en mode Différentiel et/ou en mode Commun. Elles créeront des dysfonctionnements sur les appareils Sensibles tels que les systèmes de mesure, récepteurs radio téléphones, capteurs, régulateurs.

Si source et victime sont éloignées et sans liaison galvanique, la perturbation est transmise par une onde électromagnétique, on parle de **perturbations rayonnées** ou propagées.

La plupart du cas, il y a une interaction entre ces deux modes de propagation.

Les perturbations rayonnées provoquent des courants et des tensions induits dans les conducteurs situés dans son voisinage, tel que les lignes de transmission, les lignes des alimentations de la même façon un conducteur non blindé parcouru par un courant peut se comporter en antenne émettrice, et rayonne à son tour tout ce qui l'entoure.

### I.9. b) Perturbations rayonnées:

Les circuits électriques, lorsqu'ils sont soumis à des différences de potentiel et ou parcourus par des courants,

Produisent des champs électromagnétiques dans l'espace. Leurs intensités dépendent de la nature, la fréquence

Et la distance par rapport à la source.

Le champ électrique s'exprime en V/m. Son émission est produite par un circuit électrique à haute impédance soumis à une différence de potentiel élevée.

Le champ magnétique s'exprime en A/m. Son émission est engendré par un circuit basse impédance parcouru par un courant.

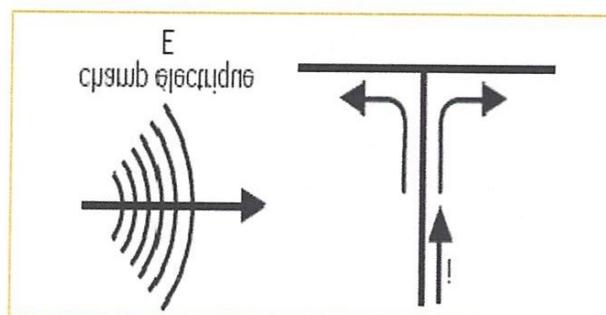
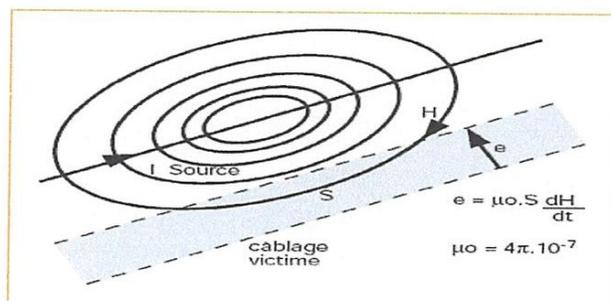
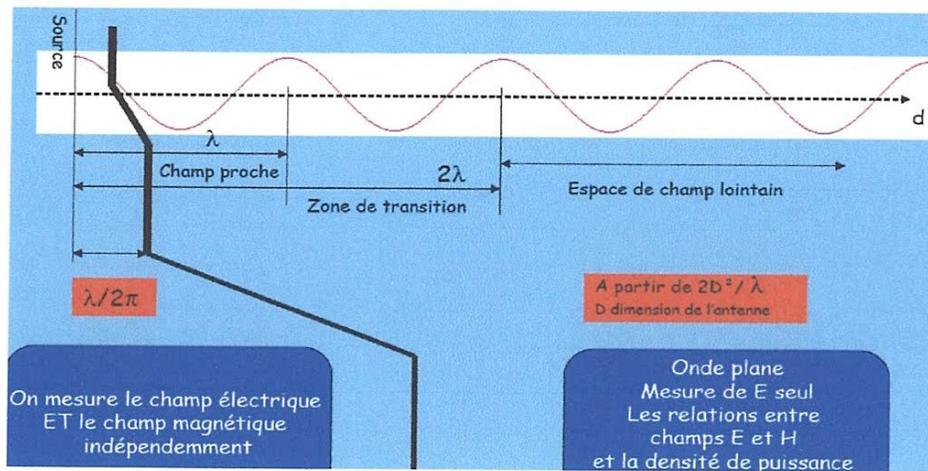


Figure 13 : représente un impedance parcouru par un courant

On note que pour des distances à la source inférieures à  $\lambda/2\pi$ , nous considérons que nous sommes en champ

Proche et pour des distances supérieures à  $\lambda/2\pi$  nous considérons que nous sommes en champ lointain.

En zone De champ lointain, **E** et **H** sont couplés **Le champ électromagnétique à les caractéristiques d'une onde plane. ...**



### I.9. C) Perturbations d'une onde plane :

Les perturbations électromagnétiques peuvent également transmise en utilisant Comme vecteur les connexions Électriques entre différents équipements Ces perturbations sont alors nommées perturbation conduites Bien évidemment ce courant et tension parasite circulent dans le câblé ou fils Interconnectant des équipements Entre eux vont eux mémé rayonner.

### I.10.) Mécanisme de transmission des perturbations :

Les ondes d'action de perturbation électromagnétique sur l'électronique s'appellent couplage Les modes de couplage entre une source de perturbation et une victime peuvent être classifiés Selon le type de perturbation et son support de propagation :

#### I.10.a) Les différents modes de couplage des perturbations électromagnétiques

Les trois types de couplage principaux sont :

le couplage par impédance commune, (Phénomène conduit),le couplage électrique, le couplage magnétique.

**I.10.b) Couplage par conduction :** propagation d'une tension ou d'un courant sur des conducteurs

**I.10. c) Couplage par rayonnement :** propagation d'un champ électromagnétique dans un milieu

Non-conducteur (air, autre type de matériau isolant) ou conducteur (blindage métallique).

**I.10.d) Couplage par conduction :**

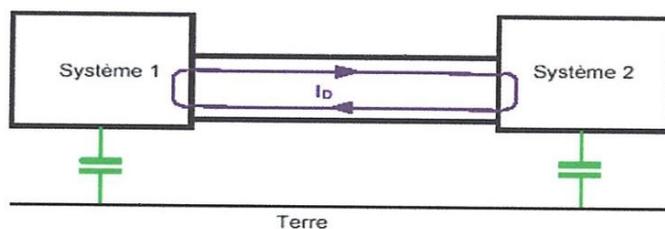
Ce mode de couplage se fait soit par **liaison direct** soit par **impédance commune**.

**I. 11. Les couplages par liaison directe:**

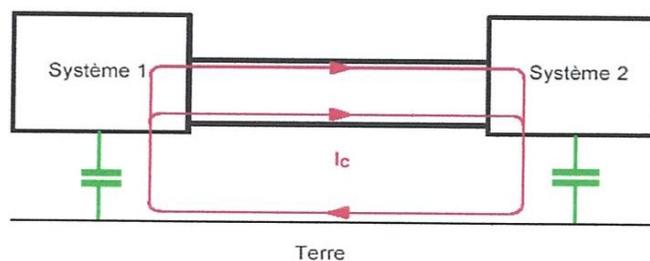
Les couplages par liaison directe permettent la propagation de la source à la victime par l'intermédiaire d'un canal de transmission d'information ou d'énergie.

Ces perturbations passent de la source à la victime en mode commun et en mode différentiel.

**I.11.1 Mode différentiel :** dans ce mode le courant passe à travers l'un des conducteurs et revient en opposition de phase par l'autre.



**I.11.2 Mode commun :** le courant se propage sur les deux conducteurs dans le même sens et revient par la liaison équipotentielle.



**I.11.3 Les couplages par impédance commune:**

Le couplage par impédance commune survient lorsqu'un circuit comporte une partie commune avec la source de perturbations. L'impédance commune peut être n'importe quel élément du circuit, résistance, capacité, inductance, retour des masses.....

#### I.11.4 Couplage par rayonnement :

Les perturbations électromagnétiques peuvent également se propager sans qu'il existe de contact entre la "source" et la "victime" On peut distinguer deux types de couplage dans ce mode le couplage en champ lointain et le Couplage en champ proche.

#### I.11.5) Le couplage en champ lointain:

Un champ électromagnétique peut se coupler sur toute structure filaire, donc tout câble, et générer sur ces structures des tensions soit en mode commun (par rapport à la masse), soit en mode différentiel (entre fils) (Fig.5, 6,7), soit et d'ailleurs plus généralement les deux. Ces couplages sont appelés **champ à câble**, c'est l'effet d'antenne, des pistes de circuits imprimés...etc.

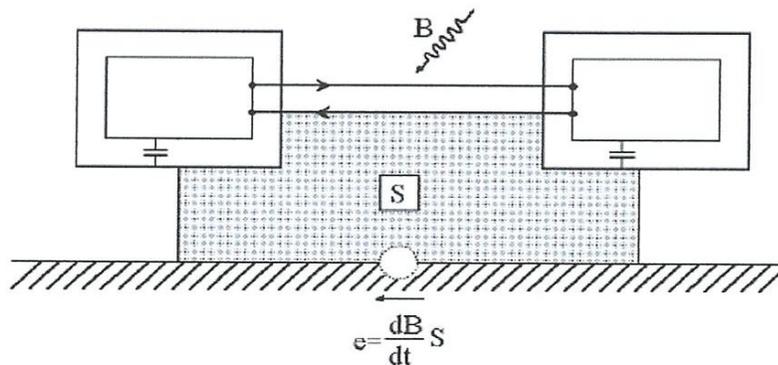


Figure. I.6: Couplage champ magnétique à câble en mode commun

#### I.11.6 Couplage de champ magnétique a câble en mode commun

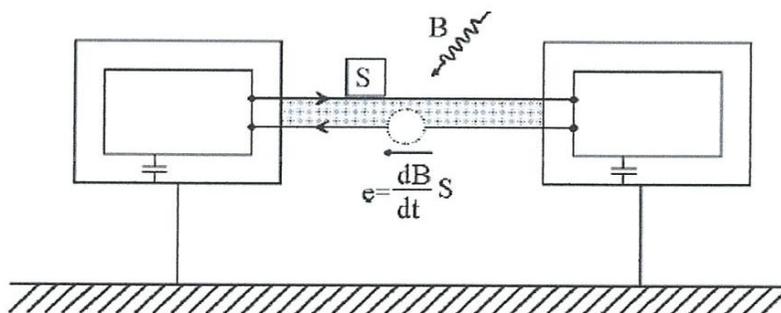


Figure I. 5. Couplage de champ magnétique en mode commun

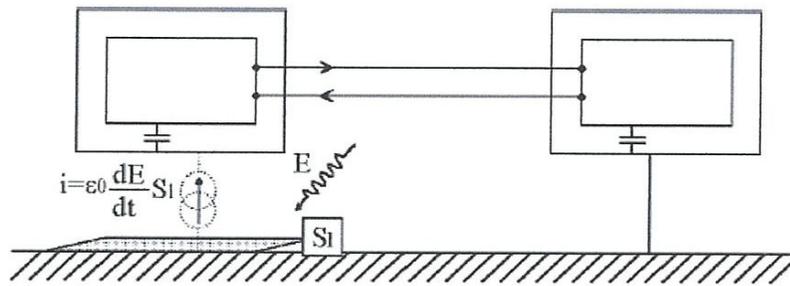


Figure. I.6 Le couplage en champ proche:

Ces couplages en champ électrique ou magnétique peuvent être représentés respectivement par des liaisons capacitives ou des mutuelles inductances. Quand ces couplages interviennent sur des connexions électriques, on parle alors de couplages **câble à câble** ou de phénomènes de **diaphonie capacitive** ou **inductive** (Figure 8).

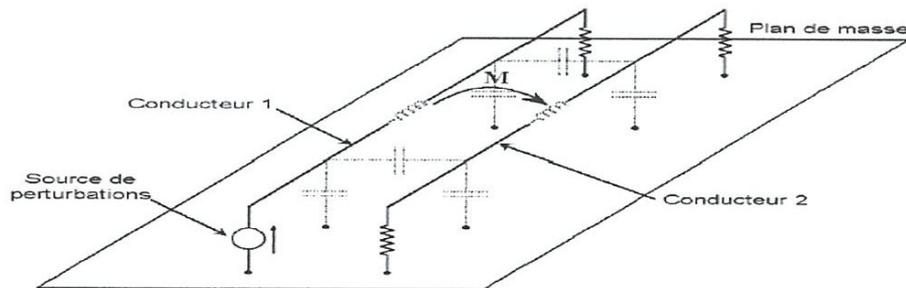


Figure I.7 couplage en champ proche :

### I.12. Definition :

#### I.12 a) La compatibilité électromagnétique

Est l'aptitude d'un dispositif, d'un appareil ou d'un système à fonctionner dans son environnement électromagnétique de façon satisfaisante et sans produire lui-même des perturbations électromagnétiques intolérables pour tout ce qui se trouve dans cet environnement, dans cet effort de clarification des concepts, on ne peut passer sous silence l'expression très courante de "Compatibilité Electromagnétique" (CEM). Où se situe la CEM vis-à-vis de la Qualité de l'Electricité La CEI4 définit la CEM comme l'aptitude d'un dispositif, d'un appareil ou d'un système à fonctionner dans son Environnement électromagnétique et sans produire lui-même des perturbations électromagnétiques intolérables pour tout ce qui se trouve dans cet environnement. C'est donc un concept plus large, couvrant les Perturbations entrant par les entrées/sorties d'un appareil en plus de son

alimentation électrique, les Perturbations rayonnées en plus des perturbations conduites, les phénomènes HF ( $> 9$  kHz) en plus des Phénomènes BF ( $< 9$  kHz). Une certaine ambiguïté résulte du fait que l'on utilise l'expression CEM dans Deux acceptions différentes dans le cadre de la normalisation, on tend à utiliser CEM au sens large : il s'agit d'assurer la compatibilité Par une bonne coordination des niveaux d'immunité des appareils sensibles et des niveaux d'émission des Appareils perturbateurs ; cela couvre tous les phénomènes Dans le langage courant, on considère le plus Souvent que CEM et Qualité de l'Electricité couvrent deux Domaines distincts, mettant en œuvre des techniques d'analyse et de compensation différentes, avec Certains recouvrements (la Qualité de l'Electricité se soucie des Perturbations à basse fréquence, pénétrant Par l'alimentation électrique ; la CEM se soucie des perturbations à haute fréquence, ou des perturbations pénétrant par d'autres voies que l'alimentation électrique - les prises de terre, les entrées/sorties de signaux, par Couplage inductif ou capacitif, par rayonnement).

### **I.13. Quelque étude :**

#### **I.13.a) Etude N° 1 :**

Cet article présente le modèle mathématique de champ électrique et de champ magnétique dans le système de ligne transmission il exécute l'équation différentielle de second ordre Cette recherche a pour objective l'analysé de champ électromagnétique rayonnement à l'atmosphère autour de la ligne de transmission, quand il ya transposition de ligne transmission en cas de distribution de fond Les six types de transposition de Ligne de transmission de 500 KV a HT avec le double circuit sera considérer, La simulation sur ordinateur appliqué a l'étude de élément finis cela est développé par programme de MATLAB. Le problème est considéré à deux dimensions, ce qui est l'harmonique de temps avec l'exécution de système graphique du champ électrique et magnétique L'impact de la simulation de six types la transposition de distribution de fond n'effectuera pas le changement du champ électrique et le champ magnétique qui entourent la ligne de transmission. En raison de la similitude entre (1) et (2) du Formulation de FEM utilisé pour les problèmes de champ magnétique est mathématiquement les mêmes.

On peut préciser cette similitude par le remplacement champ électrique (e) avec l'intensité de champ magnétique (h). Cet article a considéré le système régissant en employant le mode harmonique de temps et représentation du champ électrique sous forme complexe,

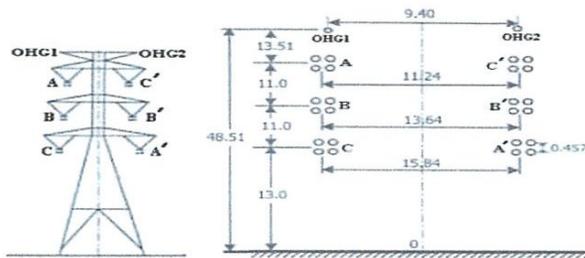
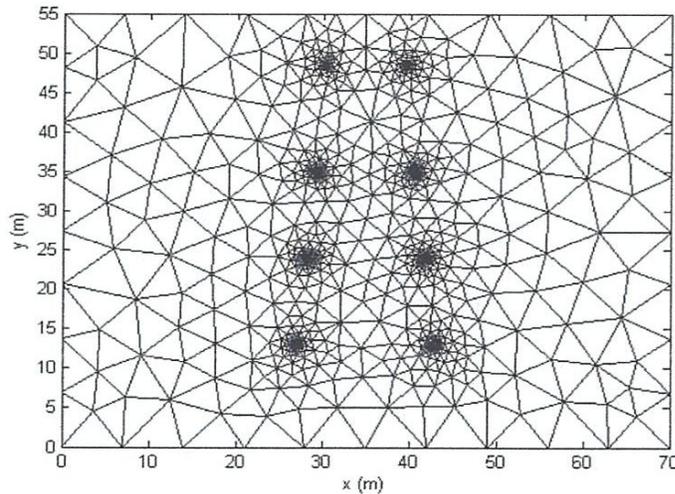


Fig. 1 500-kV double-circuit, four-bundled power transmission line with low-reactance orientation

Figure. I.8 ligne a quatre circuits doubles de transport d'énergie

#### I.14. Description du Systeme

Cet article détermine, un double-circuit de quatre lignes de transport d'énergie avec la puissance de ligne de transmission et d'orientation de base réactance, La taille des conducteurs représentés sur la figure est le fléchissement maximum de position Les plus bas conducteurs sont C et A 'à la taille de 13.0 m au-dessus du niveau du sol. Chaque conducteur de phase est MCM 795 (0.02772 m – Diamètre). Le fil de masse aérien a 3/8 pouce – diamètre a la (Figure) montre le domaine de l'étude discrétisation en employant les éléments triangulaires linéaires.



La figure I. 9 représente la Discrétisation du système

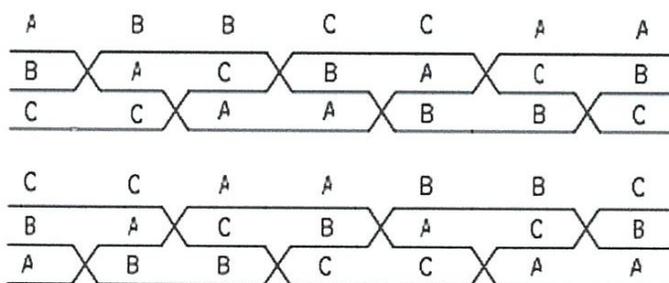
#### I.15. État et Sumilation de frontiere de Parametre

les lignes de transport d'énergie sont étudiées avec 6 conducteurs de ligne de transposition de transmission en cas de longue distance la distribution indiquant dans la figure les six types de transposition comme indiqué par des états de frontiere appliqués ici sont que des champs

électriques et magnétiques au du niveau du sol et les OHGW sont placés en tant que zéro. En revanche, les conditions de frontière sur les surfaces de conducteur sont pratiquement différentes. Elles dépendent fortement du courant de charge pour le cas magnétique, Cependant en cet article, les frontières d'états des champs électriques et magnétiques du conducteur des surfaces dans des lignes de puissance 500-kV sont assignées comme donné de dans, sous le chargement maximum de 3.15 kA/phase,

Ceci la simulation emploie la fréquence de système de 50 hertz les lignes sont les conducteurs dénudés de l'acier en aluminium de conducteur Renforce

**La figure 11 représente La transmission de ligne avec transposition en cas de longue distance Distribution**

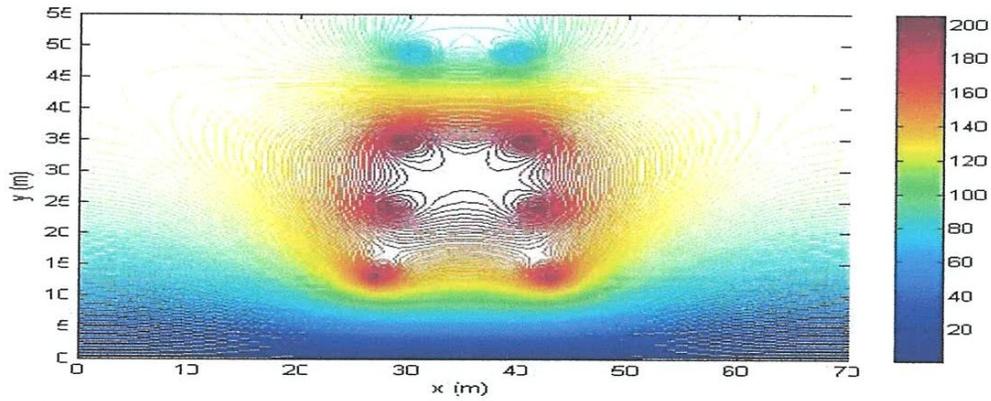


**Figure 12 représenté le six types de transposition**

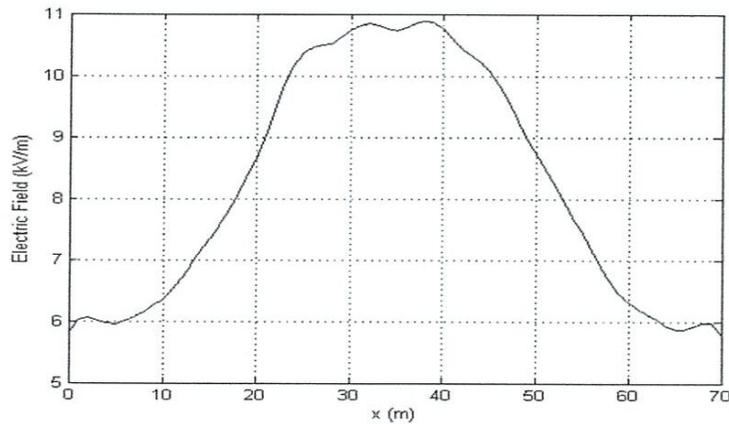
type1	type2	type3	type4	type5	type6
A C'	B C'	B A'	C A'	C B'	A B'
B B'	A A'	C C'	B B'	A A'	C C'
C A'	C B'	A B'	A C'	B C'	B A'

Distance de distribution de transmission ligne de la transposition en cas de longue distance Cet article utilise MATLAB programmant pour simuler la distribution de champ électrique et de champ magnétique pour six types désirent ardemment la transposition de distribution de distance.

Champ électrique simulé pour chacun des six types qui ont le même résultat chaque type peut être dépeint dedans Fig. 4 En outre, les résultats de simulation de distribution de champ magnétique pour les six types de transposition peut être montré dans fig. Suivant.



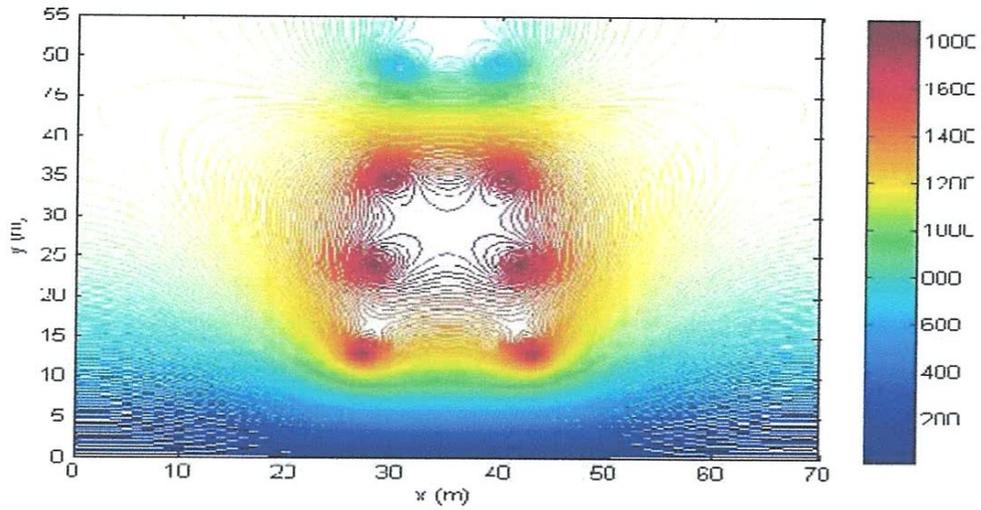
**Fig. 13 distribution de champ électrique (kV/m) pour tout le type transposition**



**Figure : 14-Distribution de champ électrique à 10 m au-dessus de la terre**

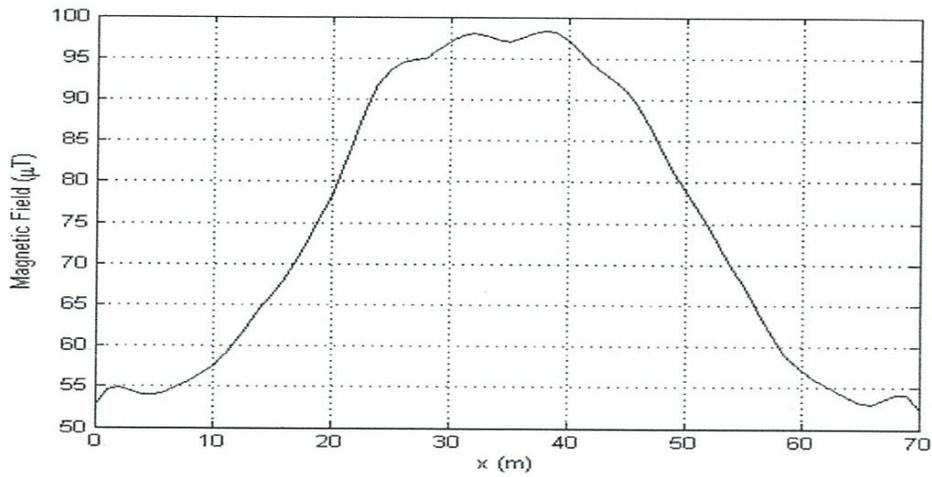
Quand on considère à quelques positions choisies pour plus de détail, Fig. l'exposition de 6-7 la parcelle de terrain de champ électrique à la taille de 1 m et 10 m au-dessus de la terre pour chacun des six dactylographie qui ont le même résultat chaque de dactylographier

En outre, l'exposition de 8-9 représente le parcelle »de champ magnétique de terrain à la taille de 1 m et de 10 m au-dessus de la terre pour chacun des six types respectivement.



**Figure : 1 5- représente la distribution de champ magnétique :**

Résulte de simulation de six types de ligne de transmission et transposition en cas de distribution de fond, il ne peut pas affecter le champ électrique et le champ magnétique qui entoure la ligne de transmission



**La figure 16 : représente la distribution champ magnétique**

Cet article a étudié le champ électrique et magnétique distribution résultant de six types distribution de fond transposition. 500-kV, double-circuit, puissance quatre-empaquetée lignes de transmission de l'électricité produit ont été étudiées. la FEM et développé en employant La programmation de MATLAB a été utilisée. En conséquence, l'impact de la simulation de six types distribution de fond la transposition n'effectuera pas changer du champ électrique et champ magnétique qui entourent la ligne de transmission.

#### **I.16. Etude N° 2 :**

##### **I.16.a) Etude expérimentale d'environnement électromagnétique a proximité des lignes à haute tension :**

L'énergie électrique peut être considérée comme nécessaire pour tous le secteurs de la société, industriel, domestique et social de telle manière qu'il ya de difficulté à imaginer un activité humaine qui n'a pas un certain rapport avec l'électricité (E) l'énergie électrique est transportée de la centrale électrique à la sous-station par les lignes électriques aériennes et souterraines jusqu'aux utilisateurs finales par des réseaux de distribution du milieu

l'énergie est transportée par les champs électromagnétique qui ce propagée dans toute la ligne Puisque les champs électromagnétique d'intensité élevée peuvent induire des tensions et des courants important dans l'élément de conduite localisé dans le leur proximité beaucoup de publication ont étudié sur l'effet des champs électromagnétique et la sûreté humaine à proximité de ligne de puissance et de station et communication mobile selon le principe de précaution, ce qui est une approche Les champs électromagnétiques produits par la ligne haute tension, dés auteurs ont développé les modèles mathématiques pour l'environnement électromagnétique de basse fréquence de champs de caractérisation à proximité de ligne de puissance. Base sur la transformé de la place et de équation de Max Wells

##### **I.16.b) Recherche expérimentale :**

Le mesure et des champs magnétiques ont été conduits dans le libre espace sous les lignes a haute tension afin de réaliser la caractérisation de l'environnement et Pour dessiner le profil du champ électrique et du champ magnétique Près des 220 et 90 kilovolts, les lignes sont localisé a quelques mètres de accouplement capacitif entre la différente phase.

Dans le quel beaucoup de Expérimentale mathématique on été faite pour obtenir de résultats sur le sujet des valeurs de résistance au champ ont été étudié Dans notre cas ont la considérée la terre comme conductrice parfait. L'étude a été faits à deux mètres d'intervalle

le long d'une ligne de puissance perpendiculaire a la direction Éviter la perturbation des champs électriques que avec de dispositif est équipement isotrope

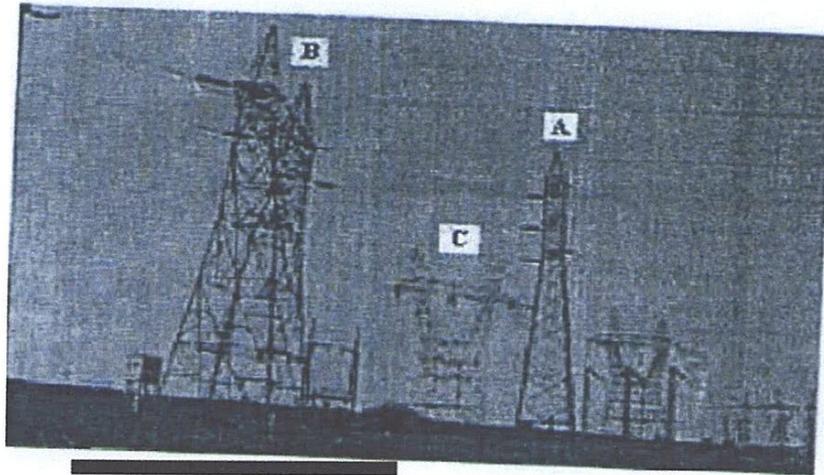


Figure 17: représente le du model étudiier

#### I.17. Matériels et méthodes

I.17. a) **Modèle de description** : on caractérise l'environnement électromagnétique des lignes de puissance a Conduite notre recherche et en coordination avec la Compagnie algérienne de l'électricité (SONELGAZ) Poste électrique de Hadjar situé dans l'Algérie orientale. de mesures ont été effectué au-dessous de 220 Lignes 90KV situées à côté l'un de l'autre figure 1, Les lignes B (90KV) et C (220KV) représente respectivement dans la ville de Souk-Ahras et EL-KALA, la ville a une configuration plate, au milieu de la ligne A (90kv) Représente la ville d'EL-Safa de Mejaz avec une verticale configuration, La distance entre les lignes de phase, le dégagement des conducteurs, de câbles de gardent,

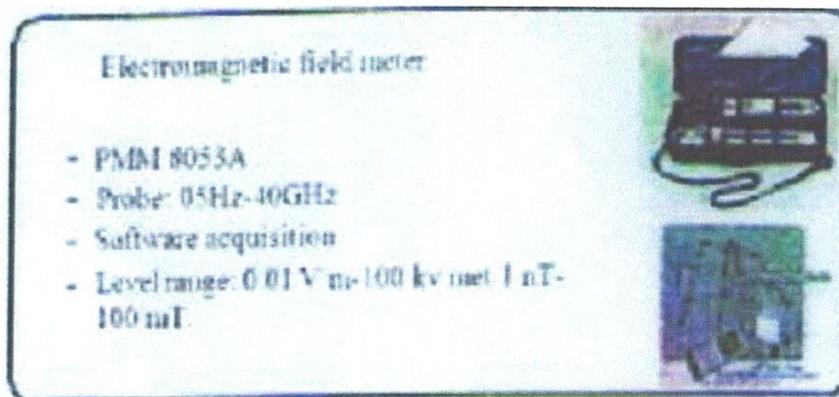


Figure I 18 Caractéristique et équipement de mesure

### I.17. b) Résultats :

Les résultats de champ électrique et magnétique sont montrés sur la figure suivante ; L'indication d'effet de l'accouplement inductif et capacitif et le changement de la direction de puissance de ligne de distribution et dans de endroits différents sur l'intensité de champ mesuré à la figure, clarifie la distribution de résistance de champs à 1m de hauteur au-dessus de la terre pour la ligne de circuit considérée. Cette figure montre la valeur maximum des champs électrique l'instrument des mesure de champ magnétique dans la direction orthogonale de la fréquence de range 5- 40GHZ le force de champs mesuré doit demeurer des constantes C'est la manière de mesure de champs et de s'assurer que les champs et dangereux.

Les Forces ne sont pas présentes que l'acquisition des données a été faite en temps réel par les résultats d'ordinateurs de les résultats de mesure ont été rapportés sur le cahier charge en v/m pour les champs électriques et magnétique  $\mu T$  pour le système internationale.

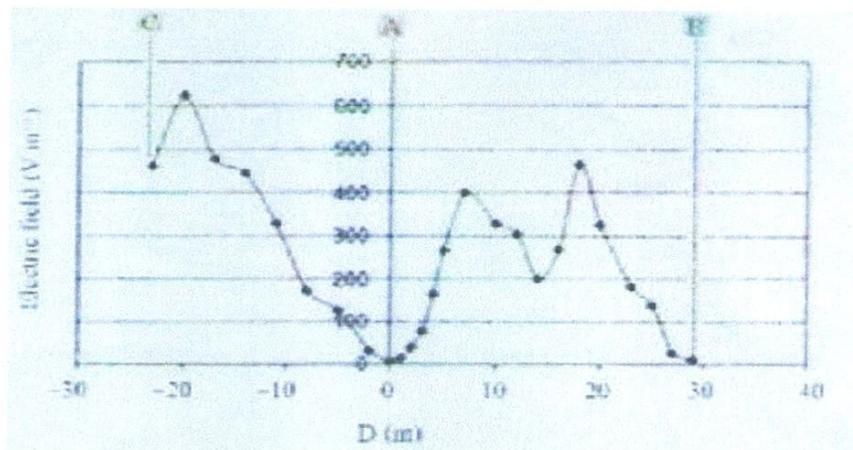
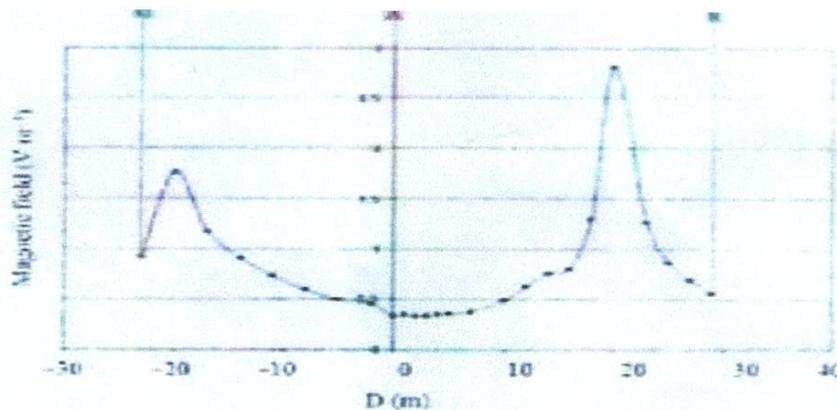


Figure I 19 : le champ électrique



La figure I : 20 représenté le champ magnétique :

## **Conclusion**

Nous avons présenté une étude bibliographique sur les différents domaines liés à l'étude de l'environnement électromagnétique au voisinage des lignes haute tension.

Des essais expérimentaux en collaboration avec la direction d'études de SONELGAZ est en cours dans le cadre d'un projet de recherche de type PNR sur la caractérisation des champs électromagnétiques au voisinage des lignes haute tension. En outre une simulation du modèle choisi sera effectuée avec la méthode des éléments finis.

## **Chapitre II : Interactions des champs EM avec les milieux biologiques**

## II.1. Modélisation des Interactions Sources EM/milieus Biologiques

La modélisation des interactions des champs électromagnétiques avec les milieux biologiques relève principalement d'un intérêt prédictif le problème général consiste à évaluer les champs induits situés et leurs conséquences au niveau du dispositif implanté et les tissus biologiques (courant et tension induites), par une source extérieure donnée.

Sur un plan théorique le champ électromagnétique défini par ses composantes  $E$  et  $H$  satisfait aux équations de Maxwell.

$$\nabla \times \mathbf{E} = -\frac{\partial \mathbf{B}}{\partial t} \quad \text{Équation de Maxwell-Faraday}$$

$$\nabla \cdot \mathbf{B} = 0 \quad \text{Équation de conservation du flux}$$

$$\nabla \times \mathbf{H} = \mathbf{J} + \frac{\partial \mathbf{D}}{\partial t} \quad \text{Équation de Maxwell-Ampère}$$

$$\nabla \cdot \mathbf{D} = \rho \quad \text{Équation de Maxwell-Gauss}$$

Dans ces expressions  $\mathbf{B}$  représente la densité de flux magnétique (ou induction magnétique), et  $\mathbf{D}$  est la densité de flux électrique, Ces dernières grandeurs qui permettent de traduire les interactions des champs électromagnétiques avec la matière, sont liées aux champs  $\mathbf{E}$  et  $\mathbf{H}$  par les relations :

$$\mathbf{B} = \mu \cdot \mathbf{H} \text{ et } \mathbf{D} = \epsilon \mathbf{E}$$

où  $\mu$  et  $\epsilon$  représentent respectivement la perméabilité magnétique et la permittivité électrique du milieu considéré. Ces paramètres s'expriment à partir de la perméabilité magnétique  $\mu_0$  et la permittivité électrique  $\epsilon_0$  du vide, par les relations  $\mu = \mu_0 \cdot \mu_r$  et  $\epsilon = \epsilon_0 \cdot \epsilon_r$  où  $\mu_r$  et  $\epsilon_r$  représentent respectivement la perméabilité relative et la permittivité relative du milieu.

$\rho$  est la densité volumique de charge et  $\mathbf{J}$  représente le vecteur densité de courant. Ce dernier est lié au champ électrique par la relation  $\mathbf{J} = \sigma \cdot \mathbf{E}$  où  $\sigma$  est la conductivité du milieu considéré

Ces équations locales restent très générales et, pour la résolution d'un problème spécifique impliquant une source quelconque et un milieu biologique, elles sont associées à d'autres équations qui traduisent les lois de conservation classiques ; la première concerne la loi de conservation de la charge et s'écrit :

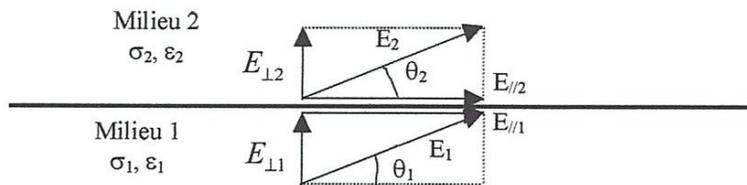
$$\nabla \cdot \mathbf{J} + \frac{\partial \rho}{\partial t} = 0$$

Les suivantes concernent les conditions de passage aux limites. Elles traduisent les conditions de continuité des différentes composantes du champ électromagnétique à l'interface de deux milieux de propriétés diélectriques différentes. Ces dernières expriment :

- la continuité de la composante tangentielle  $E_{\parallel}$  du champ électrique et de la composante normale  $H_{\perp}$  du champ magnétique
- la discontinuité de la composante normale  $E_{\perp}$  du champ électrique et de la composante tangentielle  $H_{\parallel}$  du champ magnétique

Si on considère le cas des champs de basses fréquences, les termes en  $\frac{\partial}{\partial t}$  peuvent être négligés dans les équations de Maxwell. Les interactions interviennent essentiellement dans la zone de champ proche pour le quasi totalité des cas possibles. Ainsi la pénétration des champs dans un milieu donnée doit être étudiée séparément selon la nature électrique ou magnétique du champ prépondérant.

Pour le cas d'une source de champ électrique, considérons le cas simple de la figure I-14 représentant l'interface entre deux milieux 1 et 2 supposés plans et infinis, caractérisés par leur conductivité électrique  $\sigma_1$  et  $\sigma_2$  et leur permittivité électrique  $\epsilon_1$  et  $\epsilon_2$ . Le champ électrique  $E_1$  dans le milieu 1 est orienté selon un angle  $\theta_1$  avec la ligne matérialisant l'interface, il se décompose en une composante tangentielle et un composante normale  $E_{1\perp}$ . Le champ induit  $E_2$  est orienté selon un angle  $\theta_2$  et ses composantes tangentielle et normale sont notées  $E_{2\parallel}$  et  $E_{2\perp}$ .



**Figure II-1 : Conditions de continuité du champ électrique**

Les équations de Maxwell, associées aux équations de continuité et à l'équation de conservation de la charge permettent de déduire les expressions du champ transmis dans le milieu 2. Ses composantes normale  $E_{2\perp}$  et tangentielle  $E_{2\parallel}$  s'expriment par :

$$\underline{E}_{2\perp} = \frac{\sigma_1 + j\omega\epsilon_1}{\sigma_2 + j\omega\epsilon_2} \underline{E}_{1\perp} \quad \text{Equation.1}$$

$$\text{et } \underline{E}_{1\parallel} = \underline{E}_{2\parallel} \quad \text{Equation.2}$$

Si les milieux 1 et 2 représentent respectivement l'air et les tissus biologiques, les valeurs prises par les paramètres  $\epsilon$  et  $\sigma$ , présentent des variations très importantes en fonction de la fréquence et donc le champ transmis dans les tissus varie de manière importante en fonction de ces paramètres.

Dans le cas statique ( $\omega=0$ ), l'expression 1 se réduit à

$$\frac{E_{1\perp}}{E_{2\perp}} = \frac{\sigma_2}{\sigma_1} \quad \text{Equation. 3}$$

$$\text{Et on a } \frac{\tan(\theta_1)}{\tan(\theta_2)} = \frac{\sigma_2}{\sigma_1} \quad \text{Equation. 4}$$

Etant donnée les valeurs importantes prises par le rapport  $\frac{\sigma_2}{\sigma_1}$ , les expressions 3 et 4 montrent que le champ incident  $E_1$  est pratiquement normale au plan délimitant les deux milieux et le champ transmis dans le second milieu se réduit pratiquement à sa composante normale  $E_{2\perp}$  qui prend alors des valeurs très faibles.

Lorsque la fréquence augmente, les propriétés diélectriques des tissus varient fortement avec la fréquence. Ces variations traduisent des phénomènes de relaxations complexes au niveau des tissus qui sont décrits brièvement au paragraphe suivant. Dans la gamme de fréquence qui fait l'objet de ce travail, les valeurs prises par la permittivité des tissus restent très élevées et la conductivité est très faible, ce qui se traduit par un champ transmis très faible et quasiment normale au plan délimitant les deux milieux. La pénétration du champ électrique  $E_2$  dans le

milieu biologique va être limitée principalement à cause de la dissipation d'énergie dans le milieu mais également à cause de l'effet de peau dont les conséquences deviennent très rapidement prépondérantes lorsque la fréquence augmente. Ce dernier phénomène se traduit par une diminution du champ  $E_2$  à une distance  $z$  de l'interface, selon une loi exponentielle :

$$E_2(z) = E_{20} \cdot e^{-z/\delta}$$

Où  $E_{20}$  est l'amplitude du champ à l'interface.

$\delta$  Représente la profondeur de pénétration qui est définie par la distance à partir de laquelle le champ  $E_2$  est diminué d'un facteur égale à  $\frac{1}{e} \approx 0.368$ . Ce paramètre est essentiellement lié aux propriétés diélectriques du milieu, pour un milieu parfaitement conducteur  $\delta$  est donnée par l'expression :

$$\delta = \frac{1}{\sqrt{\pi \cdot f \cdot \mu \cdot \epsilon}}$$

Pour les milieux biologiques qui ne sont ni des conducteurs parfaits ni des isolants parfaits, ce paramètre est donné par l'expression :

$$\delta = \frac{1}{\omega \sqrt{\frac{\mu \cdot \epsilon}{2} (\sqrt{1 + p^2}) - 1}}$$

$$\text{Où } p = \frac{\sigma}{\omega \cdot \epsilon_0 \cdot \epsilon_r}$$

Dans le cas d'une interface Air/muscle par exemple, l'épaisseur de peau varie de 50cm environ pour une fréquence de 10 MHz jusqu'à des valeurs inférieures à 1mm pour des fréquences supérieures à 10 GHz. Dans la gamme de fréquences considérées, les conséquences de l'effet de peau restent minimales.

Pour résumer, la pénétration d'un champ électrique de basse fréquence dans un milieu biologique est très faible, principalement à cause des valeurs élevées de la permittivité électrique du milieu. L'effet de peau dont l'importance augmente avec la fréquence agit dans le même sens. Si une personne porteuse d'un dispositif médical implanté (stimulateur cardiaque) est soumise à une source de champ électrique, le champ électrique induit au niveau

de l'implant sera faible, de même que les risques de dysfonctionnement de l'implant. En quelque sorte le corps humain joue bien un rôle de protection contre les champs électriques de basses fréquences. Ces aspects ont été confirmés dans de nombreuses études concernant l'effet, sur les stimulateurs cardiaques, des champs électriques produit par les lignes de Haute tension.

Le problème avec une source de champ magnétique est totalement différent et ce, principalement à cause du caractère non magnétique de la plupart des tissus biologiques. Ainsi, un champ magnétique incident n'est pas atténué par la présence des tissus biologiques et les effets sur un stimulateur cardiaque implanté dépendent essentiellement de la nature statique ou variable du champ magnétique.

Pour un champ statique, aucun signal électrique induit n'est attendu. Les effets potentiels sont essentiellement liés à la présence dans les stimulateurs d'un dispositif de protection permettant de détecter la présence d'un champ magnétique (interrupteur ILS), qui place le stimulateur dans un mode particulier de fonctionnement. Dans ce mode dit « magnétique », le stimulateur fournit des impulsions à une fréquence programmée, indépendamment de toute activité électrique extérieure. D'autres problèmes de compatibilité électromagnétique de ces implants avec un champ statique peuvent être attendus mais n'entrent pas dans le cadre de ce travail. Ils concernent par exemple le cas des systèmes IRM (Imagerie par Résonance Magnétique nucléaire) qui combinent des champs magnétiques statique, lentement variables et radiofréquences.

Si le champ magnétique est variable, des signaux induits peuvent être produit aux extrémités des stimulateurs. Ces signaux interférents sont générés par couplage inductif directe et par couplage par impédances communes (Figure I-9).

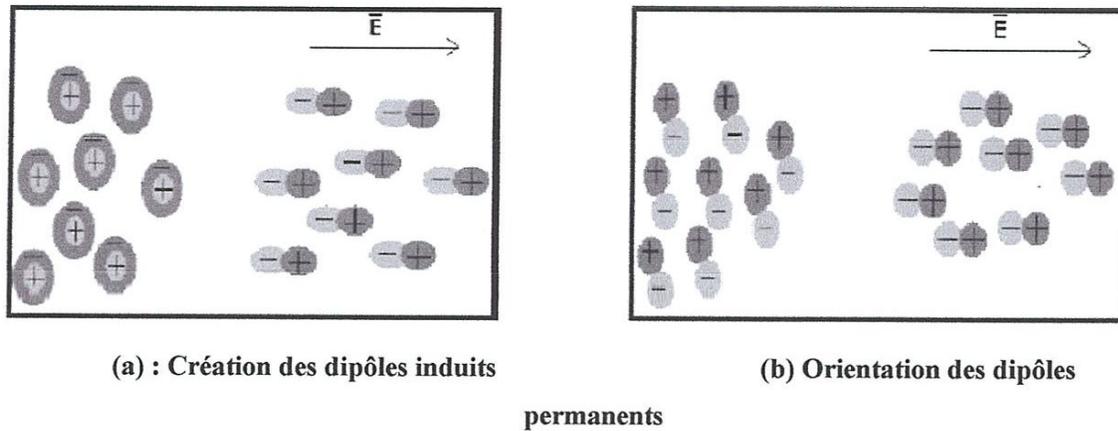
## **II.2. Comportement électrique des tissus biologiques**

### **II .2.1 Phénomène de polarisation et relaxation**

Lorsqu'un champ électrique traverse un milieu biologique, celui-ci se polarise. Cette polarisation à pour résultante l'apparition de moments dipolaires  $\vec{M}$  créés par l'alignement des dipôles présents dans le milieu biologique. Ces dipôles ont plusieurs origines :

Les dipôles induits correspondent à des molécules dont les charges positives et négatives vont se séparer légèrement en présence d'un champ électrique (figure II a).

Les dipôles permanents existent même en l'absence de champ électrique (molécules d'eau). De tels dipôles tendent à s'orienter parallèlement à la direction du champ excitateur (figure II-II b).



**Figure II-2 : Orientation des dipôles à la présence d'un champ électrique.**

La polarisation  $\vec{P}$  du milieu est le moment dipolaire par unité de volume :

$$\vec{P} = \frac{d\vec{M}}{dV}$$

la polarisation est reliée au champ électrique appliqué  $\vec{E}$  par la relation suivante :

$$\vec{P} = \epsilon_0 (\epsilon' - 1) \vec{E}$$

$\epsilon_0, \epsilon'$  : représentent successivement la permittivité diélectrique du vide et la permittivité diélectrique relative du milieu.

L'étude des variations de la polarisation en fonction de la fréquence du champ électrique montre qu'il ne s'agit pas d'une simple relation de proportionnalité. En basse fréquence, les dipôles oscillent avec le champ électrique. La polarisation et le champ électrique sont en phase. Lorsque la fréquence augmente, l'inertie des molécules ainsi que les forces de frottement et de rappel empêchent les dipôles de suivre instantanément les variations du champ électrique. Il en résulte que les champs  $\vec{P}$  et  $\vec{E}$  ne sont plus en phase.

Afin de traduire ce déphasage, une grandeur complexe ( $\epsilon^*$ ) remplace la permittivité relative définie précédemment. La partie réelle reflète la capacité des tissus biologiques à stocker l'énergie électrique alors que la partie imaginaire, directement reliée à la conductivité

électrique, traduit la consommation d'énergie liée à la rotation des dipôles. Les tissus sont donc assimilables à des diélectriques à perte. Dans le cas d'un champ statique, la polarisation observée est maximale, tout comme la partie réelle de la permittivité. Cependant, même dans cette situation, les tissus biologiques ne sont pas des diélectriques parfaits. En effet, la conductivité électrique n'est pas nulle mais présente une composante liée aux déplacements des charges libres : la conductivité statique  $\sigma_s$ .

Lorsque la fréquence du champ électrique augmente, on observe l'influence des différents types de polarisations. Le spectre de la partie réelle de la permittivité présente alors plusieurs chutes brutales associées à des augmentations plus progressives de la conductivité. Ces variations sont appelées relaxations. A des fréquences inférieures à 10GHz, les tissus biologiques présentent trois types de phénomènes de relaxation dénommés  $\alpha$ ,  $\beta$ , et  $\gamma$ . (figure I-16) d'après [SCHW57].

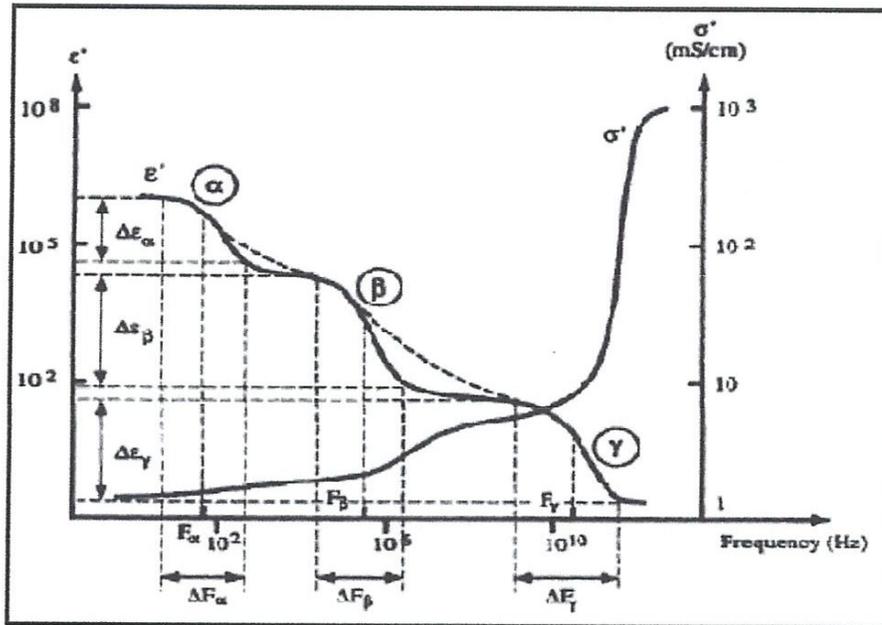


Figure II-3: Phénomènes de dispersions dans les tissus [SCHW57]

**II.2.1a) Dispersion  $\alpha$  :** Sous l'effet d'un champ électrique, un phénomène de diffusion ionique intervient à la surface de la membrane cellulaire entraînant l'apparition d'un dipôle à l'échelle de la cellule. Cette dispersion intervient dans la gamme des basses fréquences, entre quelques hertz et quelques kilohertz et se traduit par une très forte baisse de la permittivité. La conductivité ne varie pas de façon

significative. A ces fréquences, l'effet capacitif des membranes interdit le passage du courant dans le milieu

- Intracellulaire. La conductivité observée est donc représentative du milieu extracellulaire.

**II.2.1.b) Dispersion  $\beta$ :** Intervenant dans la gamme 500 kHz – 20 MHz, cette dispersion est principalement due à la relaxation inter faciale associée à l'effet capacitif des membranes cellulaires. Lorsque la fréquence augmente, la réactance capacitive de la membrane décroît ce qui autorise la circulation d'un courant dans le milieu intracellulaire. Il en résulte donc une augmentation de la conductivité apparente du milieu et cette dernière devient représentative du milieu intracellulaire en plus du milieu extracellulaire. Par ailleurs, la polarisation membranaire n'a plus le temps de s'établir totalement ce qui se traduit par une réduction de la permittivité apparente. La relaxation dipolaire est bien modélisée par la théorie des mélanges de Maxwell-Wagner. En particulier, cette théorie prévoit que même si les propriétés diélectriques des constituants du mélange sont indépendantes de la fréquence, les propriétés du mélange sont dépendantes de celle-ci. La figure 17 montre un modèle simple expliquant ces relaxations inter faciales. Ce modèle est constitué par un condensateur formé de deux couches d'épaisseurs  $d_1$  et  $d_2$  de matériaux électriquement différents, dont les propriétés électriques sont :  $\varepsilon'_1, \sigma'_1$  et  $\varepsilon'_2, \sigma'_2$ .

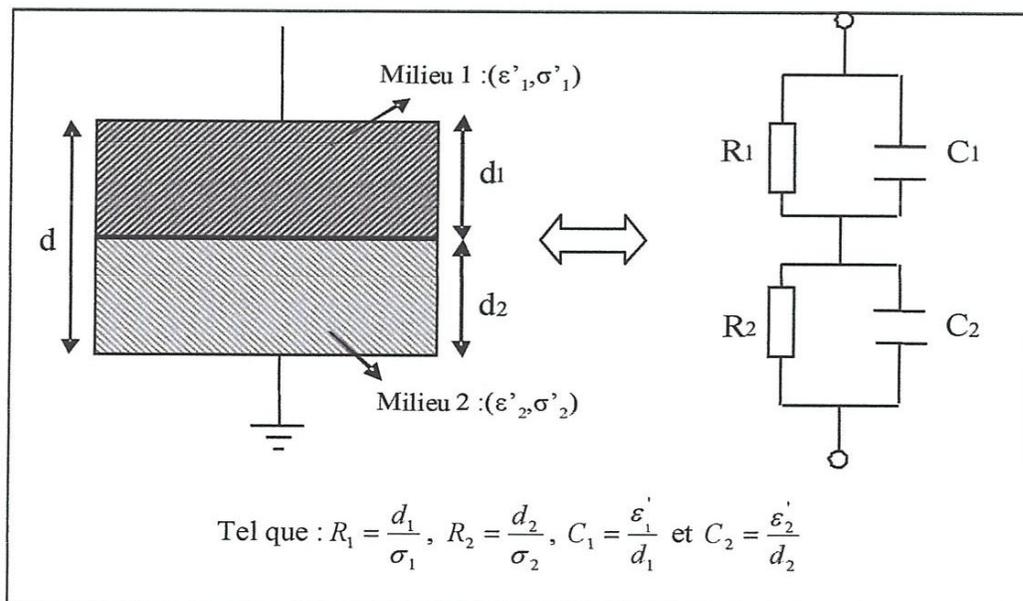


Figure II-4: modèle équivalent de la relaxation inter faciale (cas d'un matériau double couche)

**II.2.1b) Dispersion  $\gamma$  :** Cette dispersion est associée à l'orientation dipolaire des molécules d'eau libre et n'intervient qu'aux très hautes fréquences, soit aux environ de 17 GHz. A ces fréquences, les membranes sont électriquement transparentes et le milieu est perçu comme un électrolyte.

### II.3. Modélisation des propriétés électriques des tissus

La matière vivante possède des propriétés électriques très particulières, plusieurs modèles ont été proposés pour décrire le comportement des tissus biologiques soumis à un champ électrique : Maxwell [MAX 81], Wagner [WAG14], Debye [DEB 29], Cole et Cole [COL 41] et Fricke [FRI 32]. Nous présentons les trois principaux modèles :

#### II.3.1 Modèle de Fricke

Le modèle de Fricke assimile les tissus biologiques à une cellule dans un milieu dilué. Ce modèle est basé sur un circuit électrique, composé d'une capacité  $C_m$  associée en série avec une résistance  $R_i$  traduisant la présence du milieu intracellulaire. Le milieu extracellulaire est modélisé par une résistance  $R_e$  (Figure I-18).

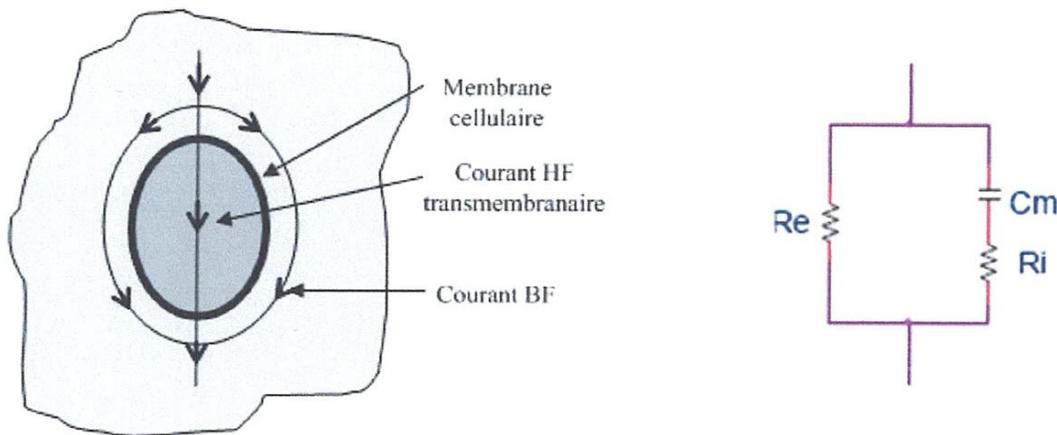


Figure II-5 : Modèle électrique de Fricke.

#### II.3.2 Le Modèle de Debye

Le modèle de Debye (figure I-19) assimile la relaxation dipolaire à un système mécanique du premier ordre. Les variations de la permittivité entre une valeur maximale ( $\epsilon_s$ ) mesurée en

statique et une valeur minimale ( $\epsilon_{\infty}$ ), en fonction de la fréquence sont décrite par l'équation suivante :

$$\epsilon_r^* = \epsilon_{r\infty} + \frac{\epsilon_{rS} - \epsilon_{r\infty}}{1 + j\omega\tau}$$

$\tau$  : Caractérise la constante de temps du phénomène de relaxation considéré.

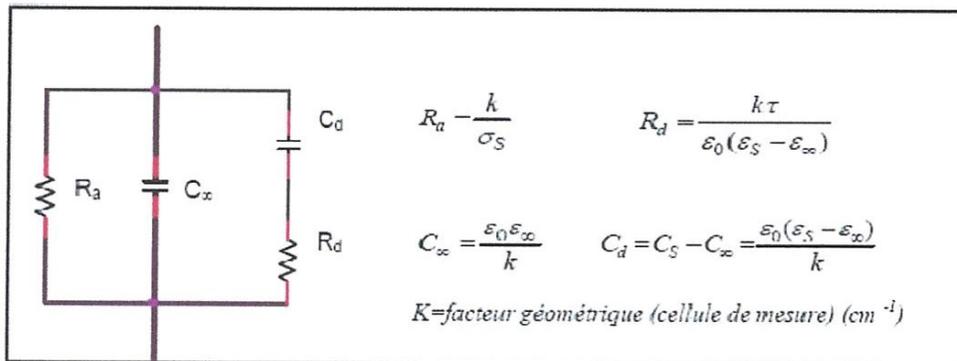


Figure II-6 : Le modèle électrique équivalent à l'équation de Debye [RIG 96]

### II.3.3 Le mode de Cole-Cole

Le modèle de Debye permet d'introduire une suite de valeurs discrètes des constantes de temps  $\tau$ . Or l'hétérogénéité des tissus biologiques implique des mécanismes plus complexes.

Le modèle de Cole-Cole [COL 41] introduit la notion de dispersion, au sens où les constantes de temps sont réparties suivant une distribution gaussienne autour d'une constante de temps moyenne  $\tau_c$  (figure I-20).

L'équation de Cole-Cole est donnée par :

$$\epsilon_r^* = \epsilon_{r\infty} + \frac{\epsilon_{rS} - \epsilon_{r\infty}}{1 + j\omega\tau_C^{(1-\alpha)}} - j \frac{\sigma_S}{\omega\epsilon_0}$$

$\alpha$ : paramètre permet d'ajuster la largeur de la dispersion. Lorsque  $\alpha=0$  il n'y a pas de dispersion et on retrouve l'équation de Debye.

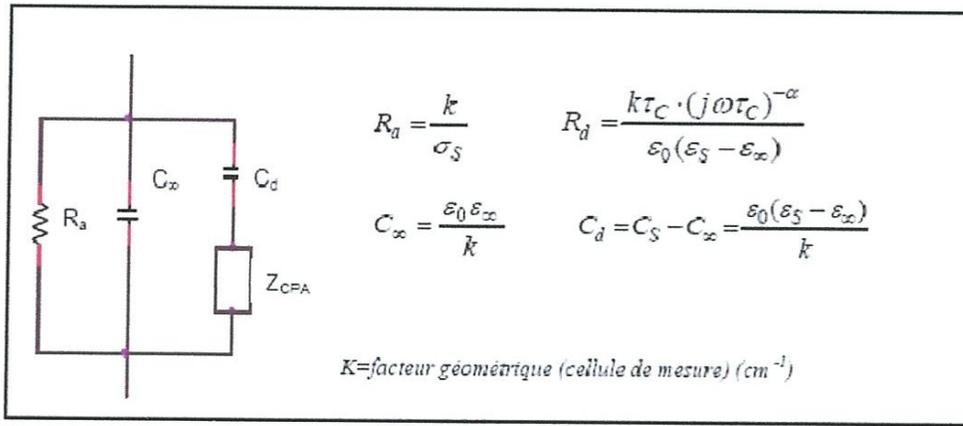


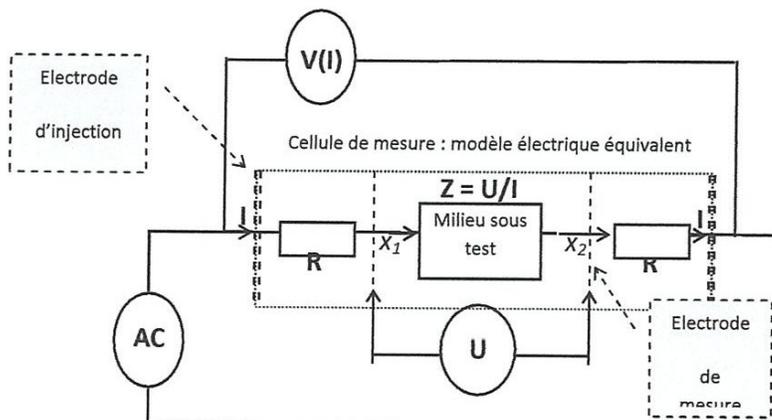
Figure II 7 : Le modèle électrique équivalent à l'équation de Cole-Cole [RIG 96]

## II.4. Techniques de mesure des propriétés électriques des milieux biologiques

Plusieurs techniques permettent de mesurer l'impédance d'un tissu biologique. Ces techniques sont basées essentiellement sur la fréquence de travail, la gamme d'impédance à mesurer, la précision attendue. Les méthodes les plus utilisées sont la mesure par pont, par résonance, volt Ampère métrique (V/I) [JGRPC92], [BOT78], [HON89], [VAL96], [BCB73].

Dans notre étude nous avons utilisé la technique de mesure directe V/I (Volt Ampère métrique) pour mesurer les propriétés électriques du modèle à base de gélatine simulant les caractéristiques électriques des tissus biologiques.

Cette méthode, utilisée en particulier par Baker [BCB73], Zheng [ZSW88], Rigaud [RHCGSM94], [RMC96], Essex [ESSG75] et notre laboratoire (DEA de Châteaux [CHA95], thèse de Goeury [Goe00]) repose sur l'exploitation directe de la loi d'Ohm. L'impédance à mesurer peut ainsi être calculée à partir des valeurs mesurées de la tension  $U$  et du courant  $V(I)$ , le schéma de la figure I-21 ci-dessous donne le principe de mesure dans une configuration à 4 électrodes :



**Figure II-8 : Schéma de principe de la méthode U/I en configuration tétra polaire.**

On obtient alors l'impédance du milieu :  $Z=U/I$  Dans le tableau I-2 et I-3 ci-dessous,

Nous donnons la conductivité électrique et la permittivité relative de quelques tissus du corps humain pour une fréquence variant entre 10Hz et 100KHz d'après [GLG96a]. Ces valeurs correspondent à des mesures in vitro.

CONDUCTIVITÉ en ( $S m^{-1}$ ) [GLG96a]					
FRÉQUENCE	GRAISSE	MUSCLE	OS	REINS	FOIE
$1.00 \cdot 10^1$	0.0122	0.2020	0.0756	0.0544	0.0544
$1.59 \cdot 10^1$	0.0142	0.2048	0.0780	0.0599	0.0599
$2.51 \cdot 10^1$	0.0167	0.2112	0.0796	0.0699	0.0699
$3.98 \cdot 10^1$	0.0188	0.2240	0.0805	0.0830	0.0830
$6.31 \cdot 10^1$	0.0201	0.2442	0.0809	0.0947	0.0947
$1.00 \cdot 10^2$	0.0208	0.2667	0.0810	0.1022	0.1022
$1.59 \cdot 10^2$	0.0212	0.2845	0.0811	0.1060	0.1060
$2.51 \cdot 10^2$	0.0214	0.2964	0.0812	0.1079	0.1079
$3.98 \cdot 10^2$	0.0217	0.3056	0.0813	0.1091	0.1091
$6.31 \cdot 10^2$	0.0220	0.3138	0.0814	0.1106	0.1106
$1.00 \cdot 10^3$	0.0224	0.3211	0.0815	0.1127	0.1127
$1.59 \cdot 10^3$	0.0228	0.3271	0.0817	0.1160	0.1160
$2.51 \cdot 10^3$	0.0232	0.3316	0.0820	0.1205	0.1205
$3.98 \cdot 10^3$	0.0235	0.3352	0.0822	0.1260	0.1260
$6.31 \cdot 10^3$	0.0237	0.3381	0.0824	0.1318	0.1318
$1.00 \cdot 10^4$	0.0238	0.3408	0.0826	0.1377	0.1377
$1.59 \cdot 10^4$	0.0240	0.3435	0.0828	0.1437	0.1437
$2.51 \cdot 10^4$	0.0241	0.3463	0.0831	0.1497	0.1497
$3.98 \cdot 10^4$	0.0242	0.3497	0.0833	0.1561	0.1561
$6.31 \cdot 10^4$	0.0243	0.3544	0.0836	0.1631	0.1631
$1.00 \cdot 10^5$	0.0244	0.3619	0.0839	0.1713	0.1713

CONDUCTIVITÉ en ( S m <sup>-1</sup> ) [GLG96a]					
FRÉQUENCE	SANG	INTESTIN	RATE	VEINES	VESSIE
1.00 · 10 <sup>1</sup>	0.7000	0.5111	0.0396	0.2505	0.2505
1.59 · 10 <sup>1</sup>	0.7000	0.5159	0.0500	0.2514	0.2514
2.51 · 10 <sup>1</sup>	0.7000	0.5192	0.0650	0.2533	0.2533
3.98 · 10 <sup>1</sup>	0.7000	0.5210	0.0799	0.2576	0.2576
6.31 · 10 <sup>1</sup>	0.7000	0.5219	0.0902	0.2659	0.2659
1.00 · 10 <sup>2</sup>	0.7000	0.5224	0.0957	0.2779	0.2779
1.59 · 10 <sup>2</sup>	0.7000	0.5230	0.0983	0.2899	0.2899
2.51 · 10 <sup>2</sup>	0.7000	0.5239	0.0997	0.2984	0.2984
3.98 · 10 <sup>2</sup>	0.7000	0.5255	0.1007	0.3030	0.3030
6.31 · 10 <sup>2</sup>	0.7000	0.5283	0.1018	0.3055	0.3055
1.00 · 10 <sup>3</sup>	0.7000	0.5324	0.1030	0.3071	0.3071
1.59 · 10 <sup>3</sup>	0.7000	0.5375	0.1044	0.3084	0.3084
2.51 · 10 <sup>3</sup>	0.7000	0.5431	0.1059	0.3097	0.3097
3.98 · 10 <sup>3</sup>	0.7000	0.5488	0.1075	0.3109	0.3109
6.31 · 10 <sup>3</sup>	0.7000	0.5543	0.1091	0.3120	0.3120
1.00 · 10 <sup>4</sup>	0.7000	0.5597	0.1108	0.3131	0.3131
1.59 · 10 <sup>4</sup>	0.7001	0.5650	0.1126	0.3141	0.3141
2.51 · 10 <sup>4</sup>	0.7002	0.5706	0.1145	0.3152	0.3152
3.98 · 10 <sup>4</sup>	0.7005	0.5768	0.1167	0.3163	0.3163
6.31 · 10 <sup>4</sup>	0.7012	0.5842	0.1192	0.3175	0.3175
1.00 · 10 <sup>5</sup>	0.7029	0.5942	0.1222	0.3187	0.3187

Tableau II-2 : conductivité électrique de quelques tissus humains.

PERMITTIVITÉ RELATIVE [GLG96a]					
FRÉQUENCE	GRAISSE	MUSCLE	OS	REINS	FOIE
1.00 · 10 <sup>1</sup>	7974000	25700000	10020000	27990000	27990000
1.59 · 10 <sup>1</sup>	6147000	24980000	5715000	25150000	25150000
2.51 · 10 <sup>1</sup>	3940000	23340000	2756000	20050000	20050000
3.98 · 10 <sup>1</sup>	2107000	20060000	1207000	13330000	13330000
6.31 · 10 <sup>1</sup>	1002000	14940000	509600	7307000	7307000
1.00 · 10 <sup>2</sup>	457100	9320000	217000	3518000	3518000
1.59 · 10 <sup>2</sup>	214100	5110000	97570	1634000	1634000
2.51 · 10 <sup>2</sup>	109000	2700000	48740	802300	802300
3.98 · 10 <sup>2</sup>	62300	1462000	27690	449000	449000
6.31 · 10 <sup>2</sup>	38740	803500	18080	293000	293000
1.00 · 10 <sup>3</sup>	24100	434900	12320	212900	212900
1.59 · 10 <sup>3</sup>	13900	231200	8381	160000	160000
2.51 · 10 <sup>3</sup>	7529	123600	5581	117900	117900
3.98 · 10 <sup>3</sup>	3903	68550	3671	83490	83490
6.31 · 10 <sup>3</sup>	2028	40500	2434	57250	57250
1.00 · 10 <sup>4</sup>	1085	25910	1658	38750	38750
1.59 · 10 <sup>4</sup>	605	18060	1176	26410	26410
2.51 · 10 <sup>4</sup>	354	13630	874	18420	18420
3.98 · 10 <sup>4</sup>	216	11010	682	13270	13270
6.31 · 10 <sup>4</sup>	138	9324	556	9906	9906
1.00 · 10 <sup>5</sup>	83	8089	472	7652	7652

PERMITTIVITÉ RELATIVE [CLG86a]					
FRÉQUENCE	SANG	INTESTIN	RATE	VEINES	VESSIE
$1.00 \cdot 10^1$	5260	20510000	43300000	10000000	10000000
$1.59 \cdot 10^1$	5260	11890000	35860000	9854000	9854000
$2.51 \cdot 10^1$	5260	5974000	25080000	9504000	9504000
$3.98 \cdot 10^1$	5260	2870000	14330000	8729000	8729000
$6.31 \cdot 10^1$	5260	1469000	6970000	7247000	7247000
$1.00 \cdot 10^2$	5260	873100	3117000	5092000	5092000
$1.59 \cdot 10^2$	5260	617100	1378000	2936000	2936000
$2.51 \cdot 10^2$	5260	492700	636700	1451000	1451000
$3.98 \cdot 10^2$	5259	411700	320800	668600	668600
$6.31 \cdot 10^2$	5259	338500	178200	308700	308700
$1.00 \cdot 10^3$	5259	264000	106600	149000	149000
$1.59 \cdot 10^3$	5258	193300	67120	76050	76050
$2.51 \cdot 10^3$	5257	134300	43420	40030	40030
$3.98 \cdot 10^3$	5255	90940	28820	22520	22520
$6.31 \cdot 10^3$	5252	61760	19680	12930	12930
$1.00 \cdot 10^4$	5248	43050	13890	7691	7691
$1.59 \cdot 10^4$	5241	31280	10160	4743	4743
$2.51 \cdot 10^4$	5230	23860	7720	3026	3026
$3.98 \cdot 10^4$	5212	18110	6092	1990	1990
$6.31 \cdot 10^4$	5179	15090	4987	1344	1344
$1.00 \cdot 10^5$	5120	13850	4222	930	930

Tableau II-3 : la permittivité relative de quelques tissus humains.

### II.4.1) Le contexte normatif

### II.5. Un peu d'histoire

Les premières recommandations pour limiter l'exposition humaine aux radiations électromagnétiques non ionisantes remontent aux années 50. Exactement en 1953 aux Etats-Unis [MMP01] une limitation de la densité de puissance du champ électromagnétique à  $10 \text{ mW/cm}^2$ . Cette limitation concernant la bande HF (10MHz -10GHz). Dans la même période, l'URSS a établi des normes beaucoup plus restrictives [Sin97], la limite de la densité de puissance du champ électromagnétique est de  $10 \text{ } \mu\text{W/cm}^2$ . Les normes américaines et russes étaient basées sur deux approches opposées (modèle thermique pour les américains et modèle non thermique pour les soviétiques).

En 1966, le premier standard ANSI C95.1-1966 a été formalisé par l'U.S. Navy et l'IEEE à partir des recommandations de 1953. Des limitations sur  $\|\vec{E}\|^2$  et  $\|\vec{H}\|^2$  ont été introduites en 1971 et le taux d'absorption spécifique (SAR) en 1982. La quatrième édition du standard (IEEE C95.1-1991) introduit des limitations sur les courants induits. Les éditions de 1999 et

2002 de ce standard sont : IEEE C95.1-1999 des limitations pour la bande 3KHz- 300GHz, et IEEE C95.6-2002 pour la bande 0-3KHz. Le dernier standard IEEE C95.1-2005 porte sur les limites d'expositions humaines au champ électromagnétique de radiofréquences de 3KHz-300GHz.

En Europe, les premières recommandations datent de 1974 par un groupe de travail sur les radiations non ionisantes (NIR) de la part de l'Association internationale pour la protection contre les radiations (IRPA), rebaptisée INIRC en 1977, puis l'International Commission on Non-Ionizing Radiation Protection (ICNIRP) en 1992. Ce groupe a publié des recommandations en 1988, 1990 et 1998 [ICN98] concernant l'exposition à des champs variables dans le temps et en 1994 concernant les champs statiques. On peut citer aussi des autres organismes européens : (COST 244 bis), le Bureau National de Protection contre les radiations (NRPB, United Kingdom) et le programme de recherche EMF de l'Organisation Mondiale pour la santé (OMS).

### **II.5.1 Le Standard IEEE C95.1-1999**

L'édition de 1999 du standard américain [IEE99] porte sur la bande de fréquence 3KHz-300GHz. La discussion qui suit est limitée à la bande qui nous concerne (basses fréquences), 3KHz-1M. Ce standard fait la distinction entre environnements contrôlés, et non contrôlés. C'est-à-dire l'exposition à des rayonnements élevés notamment dans les lieux de travail. Tous les autres endroits sont considérés non contrôlés. Les grandeurs électriques prises en considération sont:

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

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

FRÉQUENCE [MHz]	CHAMP ÉLECTRIQUE [Vm <sup>-1</sup> ]	CHAMP MAGNÉTIQUE [Am <sup>-1</sup> ]
0.003 – 0.1	614	163
0.1 – 3.0	614	16.3/f
	COURANT [mA]	
0.003 – 0.1	1000f	
0.1 – 100	100	

Tableau II-4 : Limites d'exposition maximales (IEEE C95.1-1999).

## II.5.2 Les recommandations ICNIRP

Les recommandations du comité ICNIRP [ICN98] portent sur la bande de fréquence 1Hz-300GHz. Une distinction est faite entre l'exposition dans un cadre professionnel et le grand public. Des restrictions (Tab. I-5) portent sur les grandeurs physiques suivantes:

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

Les valeurs limitent reportées dans le tableau I-5, sont à comparer avec des grandeurs moyennées. Dans le cas du SAR, il faut considérer la valeur moyennée dans le temps sur 6 min, et dans l'espace sur une masse de 10g de tissu. Pour la densité de courant, il faut d'abord moyenner sur une surface de 1 cm<sup>3</sup> normale à  $\vec{J}$ , et ensuite considérer la valeur quadratique moyenne sur un temps de 6 min Les limitations des champs électrique et magnétique dans un cadre professionnel sont présentées dans la figure I-22.

FRÉQUENCE [Hz]	SAR [W kg <sup>-1</sup> ]	DENSITÉ DE COURANT [mA m <sup>-2</sup> ]
0 – 1 Hz		40
1 – 4 Hz		40/f
4 Hz – 1 kHz		10
1 – 100 kHz		f/100
	0.4 globale	
0.1 – 10 MHz	10 tête, thorax et ventre	f/100
	20 bras, jambes	

Tableau II-5 : Restrictions de base (ICNIRP 1998)

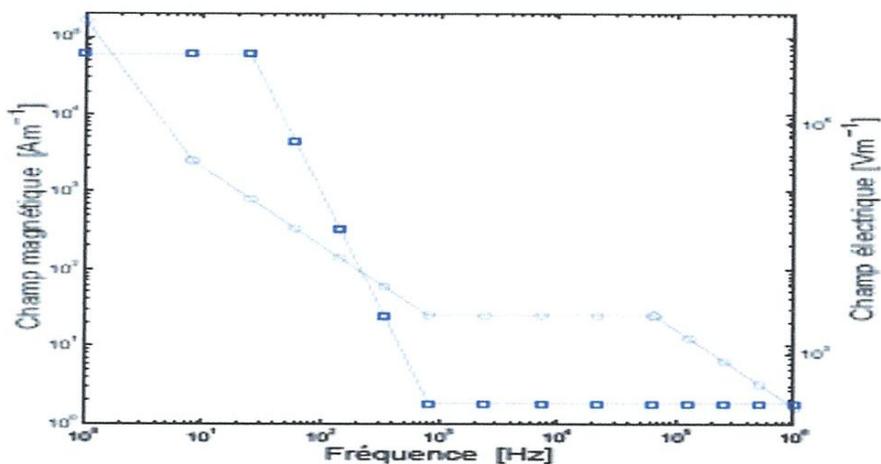


Figure II- 9: Gabarits du champ électrique (□) et magnétique (○) dans un cadre professionnel.

Les limites de l'exposition aux ondes électromagnétiques ont été fixées par le comité sur la base de considérations sur les effets à court terme :

L'exposition continue pour 30 min à une onde électromagnétique d'une fréquence de 10 MHz à quelques GHz, avec un SAR globalement égal à 4W/Kg, produit le réchauffement du corps de plus de 1C°. Un facteur 10 de sécurité a été convenu : SAR ≤ 0.4 WK/g, il a aussi limité la densité de courant à 10mA/m<sup>2</sup>, ce qui correspond à 1/10 du seuil d'excitation neuromusculaire.

### **II.5.3 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[MCL02], EN 45502-2-1 :2003 [ECS03], EN 45502-2-2 :1998[ECS98], ISO 14708-1 :2000[ISO00], EN50061:1988 [ECES88] et ANSI/AAMI PC69: 2000[ANSI00]. Des autres standards préliminaires aussi sont disponibles mais ces standards ne couvrent pas une gamme de fréquence spécifique. Plusieurs standards sont en cours de révision (ANSI/AAMI PC69 :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 fréquence de 16.6Hz-167KHz, le standard préliminaire EN45502-2-1 :2003 est spécifié pour des signaux expérimentaux atteignant 1Vpp au maximum, pour une source électromagnétique qui donne un champ magnétique entre 760A/m et 18800A/m pour la bande de fréquence entre 0.3KHz et 7.4KHz, La tension induite EMI par une boucle de surface 225cm<sup>2</sup> est 1V.

### **II.6. Diversité de l'étude et une bibliographiques récente**

Nous vivons dans un environnement électromagnétique, nous sommes exposés à plusieurs sources d'interférences électromagnétiques naturelles et artificielles. Le champ électrique naturel est de l'ordre de 100-200 V/m, il peut atteindre des valeurs de l'ordre de 10KV/m pendant un orage. Le champ magnétique terrestre est d'environ 50μT. Ces champs naturels sont essentiellement des champs statiques. Cependant les champs électromagnétiques les plus importants dans notre environnement sont d'origine artificielle. Il est difficile de caractériser les sources de ces champs et d'étudier leurs influences sur la matière vivante et sur les Implants médicaux étant donné que ces sources sont très nombreuses et d'origines diverses. Cette diversité est liée aux fréquences des signaux, à leurs natures, à leurs formes... etc.

Figure 11: Energy level diagram for the  $^{137}\text{Ba}^{56+}$  ion showing the ground state and the first excited state.



### III.1- Champs électromagnétiques rayonnés par les lignes hautes tensions :

#### III.1 Champs électromagnétiques basse fréquence :

##### III. a) Définition :

Un champ électromagnétique est l'association d'une onde de champ électrique et d'une onde de champ magnétique (figure 1) qui varient dans le temps et se propagent dans l'espace. Ces champs sont susceptibles de déplacer des charges électriques. Les champs électromagnétiques sont caractérisés par plusieurs propriétés physiques dont les principales sont leur fréquence ou leur longueur d'onde, leur intensité et leur puissance.

-Le champ électrique est produit par le voltage, il se mesure en Volt/mètre (V/m), et diminue avec l'éloignement de la source (environ au carré de la distance).

-Le champ magnétique produit par un courant électrique se mesure en Gauss (G) ou Tesla (T) ( $1\text{A/m}=1,27\mu\text{T}$ ) et diminue lui aussi avec l'éloignement de la source

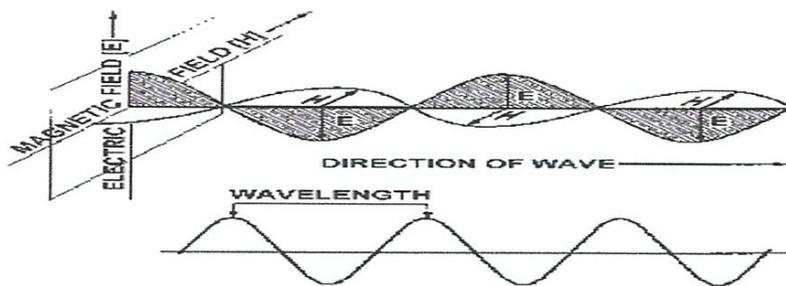


Figure.III.1.

Les champs électromagnétiques sont classés en fonction de leur fréquence, l'ensemble de ces fréquences forme le spectre électromagnétique (figure.III.2). Les champs de 0 à 300 Hz sont dits de très basse fréquence ou ELF. Tous les équipements qui consomment ou acheminent de l'électricité émettent des champs à 50 Hz, cas des lignes électriques haute tension qui vont

Faire l'objet de notre étude.

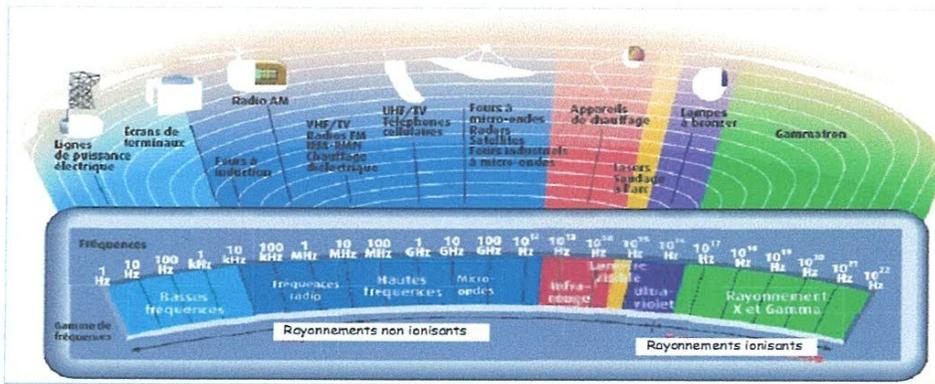


Figure .III.2

### III.2. Sources de champs électromagnétiques :

Les champs électromagnétiques (CEM) constituent un phénomène naturel et ont donc toujours été présents sur terre. L'exposition à la source artificielle de CEM a toutefois fortement augmenté au cours du 20<sup>ème</sup> siècle en raison des besoins en électricité, des Technologies sans fil (tout particulièrement pour les télécommunications), ainsi que des modifications des pratiques professionnelles et de comportement social, on distingue :

#### III.2.1 Les champs naturels :

- Le champ terrestre et indispensables à la vie (la lumière avec capteur de champ électromagnétique l'œil).
- Le champ magnétique terrestre qui est de l'ordre de 30 à 60  $\mu$ T, continu, éclairé (10  $\mu$ T).
- Le champ électrique terrestre 100 V/m.
- Le champ endogène (0,1 V/m).

#### III.2.2 Les champs artificiels :

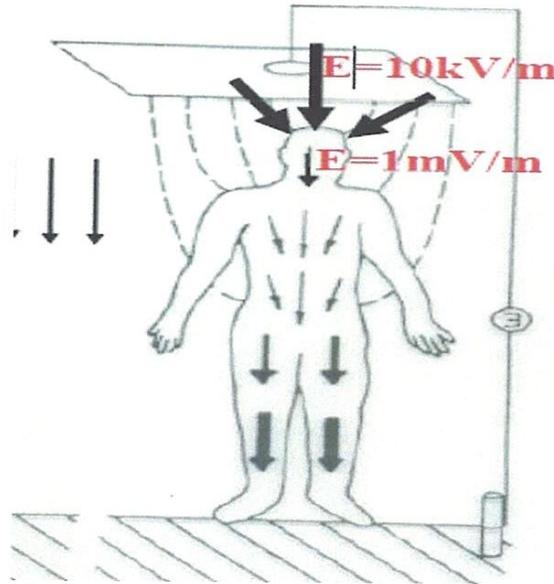
- les champs intentionnels : émission radio, Tv, GSM
- les champs non intentionnels : les lignes HT (50Hz), écran, appareillage, etc.....

Mécanisme de couplage avec un champ électromagnétique basse fréquence

Il existe deux mécanismes fondamentaux de couplage, par lesquels les champs électrique ou magnétique de basse fréquence interagissent avec le corps humain :

### III.23. Couplage avec les champs électriques basse fréquence :

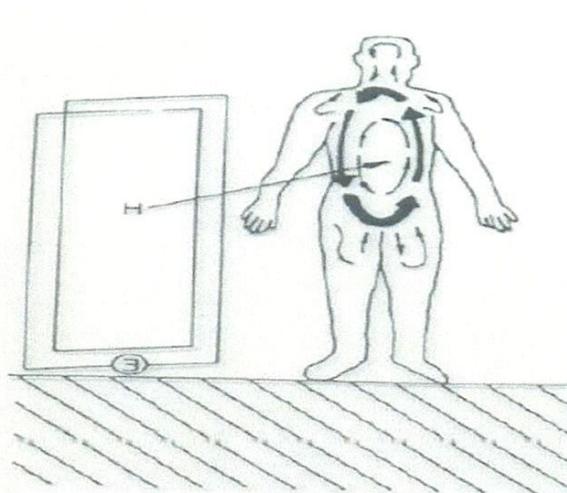
L'être humain plongé dans un champ électrique 50Hz, déforme le champ électrique crée par une source externe (quelques KV/m).Ce faisant il est parcouru par un courant de même fréquence, orienté dans le sens du champ électrique externe, a l'intérieur du corps ce champ est l'ordre du mV/m, il est quasiment nul (figure.III. 3).



**Figure III.3 : couplage du corps humain avec un champ électrique basse fréquence**

#### **III.4.Couplage avec les champs magnétiques bases fréquence :**

L'interaction champs magnétiques basse fréquence-corps humain crée des champs électriques induits et provoque la circulation de courants électrique qui forment des boucles a la même fréquence. L'être humain plongé dans un champ magnétique crée par une source externe ne le déforme pas.



**Figure III.4 : couplage du corps humain avec un champ magnétique basse fréquence**

### III.5. Niveaux de champs rayonnés

Les champs électromagnétique se composent de deux champs qui en basse fréquence sont partiellement découplés : le champ électrique E et le champ magnétique H. dans la vie quotidienne, nous vivons toujours dans un environnement électromagnétique créée par des sources naturelles et artificielles qui sont la plupart alternatifs. les réseaux de haute tension constituent la principale source de champ électrique, et les appareils industriels et domestiques sont les principales sources de champ magnétique. les tableaux 1 et 2 donnent les ordres de grandeurs des champs électromagnétiques basses fréquences

Ordre de grandeur des électromagnétiques des lignes aérienne (EDF)

	Champ électrique (v/m)	Champ magnétique ( $\mu$ T)
Champs lignes aérienne		
400Kv	(1)-5000 (2)-2000 (3)-200 (1)-3000	(1)-30 (2)-12 (3)-1.2 (1)-20
225Kv	(2)-400 (3)-40 (1)-1000	(2)-3 (3)-0.3 (1)-10

90kV	(2)-100 (3)-10 (1)-250	(2)-1 (3)-0.1 (1)-6
20kV	(2)-10 (3)-négligeable (1)-9	(2)-0.2 (3)-négligeable (1)-0.4
230 KV	(2)-0.3 (1)-négligeable	(2)-négligeable (3)-négligeable

Sous la ligne, (2) a 30 m de l'axe, (3) a 100 m de l'axe

Champ magnétique moyen rayonné par certains appareils domestiques [HQ]

Source de champs magnétique	Induction magnétique
Téléviseurs	0,2 $\mu$ T a 60 cm 0,7 $\mu$ T a 30 cm
Sèche-cheveux	0,1 $\mu$ T a 30 cm 30 $\mu$ T a 15 cm
Fer a repassé	0,1 $\mu$ T a 30 cm 0,8 $\mu$ T a 15 cm
Ecran de micro-ordinateur	0,5 $\mu$ T a 30 cm 1,4 $\mu$ T a 15 c

### III.6.Contexte normatif :

Les lignes a haute tension sont des sources d'énergie électromagnétique et en général, elles produisent de l'énergie non rayonnant champs électromagnétique).les champs électriques et magnétiques présents sous une ligne haute tension est un sujet qui a longtemps les foules. Bien qu'aucune enquête épidémiologique a long n'ait encore prouvé les méfaits des champs électriques, le législateur a déjà pris des mesures pour les limiter. Les champs électrique et magnétiques engendrés par les lignes de transporte a haute tension interagissent avec l'environnement et lors de l'évaluation de ces interférences, le type du champ généré par la ligne de transmission a marqué effet sur la réaction de public a l'exposition a ces champs..les perturbations électromagnétique associées sont limitées par les normes générales sur la compatibilité électromagnétique et par les directives 89/336,92/68/ CEE du conseil de la communauté Européene,Ces perturbations sont analysées et les résultats des recherches sont communiqués dans plusieurs travaux de spécialité, parmi les organisations scientifiques qui s'intéressent aux champs électromagnétiques bas fréquence on peut citer l'ICNIRP,

Champs lignes aérienne	Champ électrique (v/m)	Champ magnétique ( $\mu$ T)
400kV	(1)-5000 (2)-2000 (3)-200 (1)-3000	(1)-30 (2)-12 (3)-1.2 (1)-20
225kV	(2)-400 (3)-40 (1)-1000	(2)-3 (3)-0.3 (1)-10

Commission internationale pour la protection contre les rayonnements non ionisants, Cette commission est chargée d'étudier les risques liés aux différents types de RNI, d'élaborer des guides internationaux pour l'établissement de limites d'exposition et de traiter de tous les aspects de la protection contre ces rayonnements.

Les directives de l'ICNIRP fixent une limite de base de la densité de courant électrique induits dans le corps par des champs ELF restrictions de base).comme la densité de courant induit est difficile a mesuré, celles-ci prescrivent également les niveaux de référence plus facile a mesurés sur le terrain. Le respect des niveaux de référence assure la conformité aux

restrictions de base. et dans la plupart des applications les niveaux de référence peuvent effectivement être considérés comme des limites d'exposition si l'exposition dépasse les niveaux de référence, cela ne signifie pas forcément que la restriction de bases est également dépassée. Ainsi la détermination et la vérification des courants induits suite a l'exposition est nécessaire. Donc différentes limites ont été établies par l'ICNIRP pour l'exposition au travail et pour le public général et sont donnés dans le tableau suivant :

### III.6.1 Tableau des normes

Champs électrique et magnétique généré par une ligne haute tension

#### -III.7. Champ électrique :

Le champ électrique autour de la ligne de transmission apparaît s'il ya des tensions dans les phases de lignes, et ne dépendent pas de courant électrique. Si il ya des courants dans les conducteurs, en plus du champ électrique, un champ magnétique est formé autour de la ligne de transmission. L'intensité du champ électrique dépend de la disposition des conducteurs et de la valeur des tensions, et elle diminue avec la distance de la source, tenant compte que le potentiel électrique a la surface du sol.

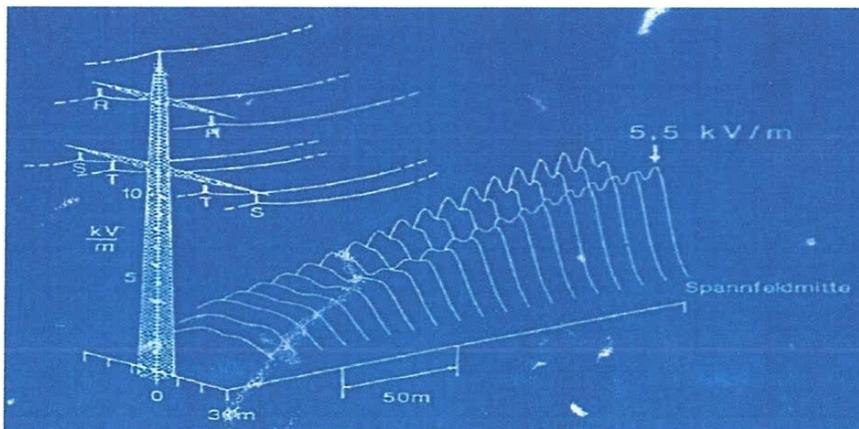


Fig.III.5 allure du champ électrique sous une ligne haute tension

#### III.7.a) Champ magnétique :

Le champ magnétique aussi dépend de la distance des conducteurs par rapport au point de mesure, de la distance mutuelle des conducteurs et de l'hauteur des conducteurs par rapport au terrain ; il ne dépend pas du niveau de tension mais est directement proportionnel au courant.

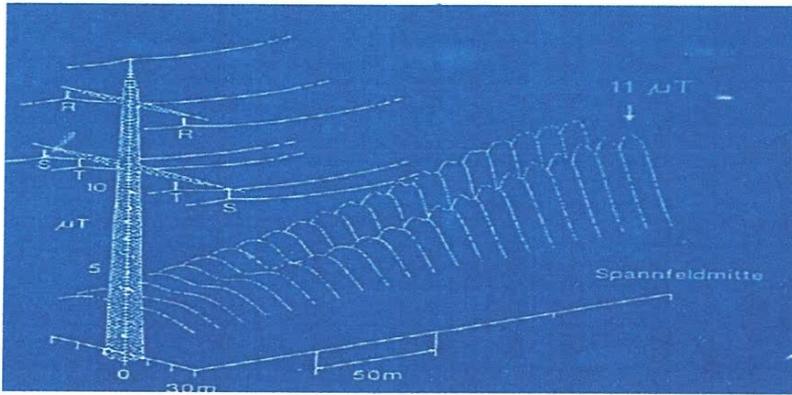


Fig.III.6. Allure du champ magnétique sous une ligne haute tension

**III.7.b) Calcul analytique du champ électromagnétique :**

**III.8. Calcul du champ électrique :**

Pour le calcul du champ sous la ligne électrique, les conducteurs de phase sont considéré des frais de ligne infinie, afin de déterminer le champ électrique sur la ligne de transmission, de Maxwell potentiel matrice [P] est calculée sur la base des coordonnées des équations de phase (3.1)et (3.2) ci-dessus donne les distances des coefficients [P] sont :

$$P_{ii} = \ln \left( \frac{2H_i}{r_{eq}} \right) \dots \dots \dots 3.1$$

$$P_{ij} = P_{ji} = \ln \left( \frac{I_{ij}}{A_{ij}} \right) \dots \dots \dots 3.2 \quad i \neq j$$

Ou :

H : est la hauteur du i nième conducteur-dessus du sol

Iij=est la distance entre i nième conducteur et l’image de j nième conducteur

Aij =est la distance entre i nième et j nième conducteur,

$$r_{eq} = R \left( N, \frac{r}{N} \right)^{1/N} \dots \dots \dots 3.3$$

Req : est le rayon équivalent du faisceau de conducteurs

R : est le rayon équivalent du sous-conducteur dans le faisceau du cercle primitif sur laquelle sous du se faisceau se trouvent

N : est le nombre de sous-conducteurs dans un faisceau

En outre l’inverse de Maxwell coefficient potentiel est pré-multiplié par vecteur colonne [V] comme indiqué dans l’équation 3.4 ou vecteur colonne [V] contient la ligne de tension de

masse de tous les conducteurs de phase et les fils de terre , ce qui donne la ligne densités de charge [Q] des conducteurs de phase ainsi que les fils de terre :

$$[Q] = [P]^{-1} \cdot [V] \dots\dots 3.4$$

Ensuit, les composantes horizontal et vertical du champ en raison des trois conducteurs de phase à l' endroit souhaité sont calculés séparément en utilisant l'équation (3.5) et (3.6) donnée ci-dessus

Fig.3.2 montre la composants électriques ELD au point d'observation A(x,y) du a une conducteur de phase de son image , la composante horizontale du champ électrique E de i nième phase conducteur est donnée par l'équation suivante.

$$E_{hi} = \left( \frac{q_i}{2r\pi\epsilon_0} \right) (x - x_i) \left[ \frac{1}{D_i^2} - \frac{1}{D_i'^2} \right]$$

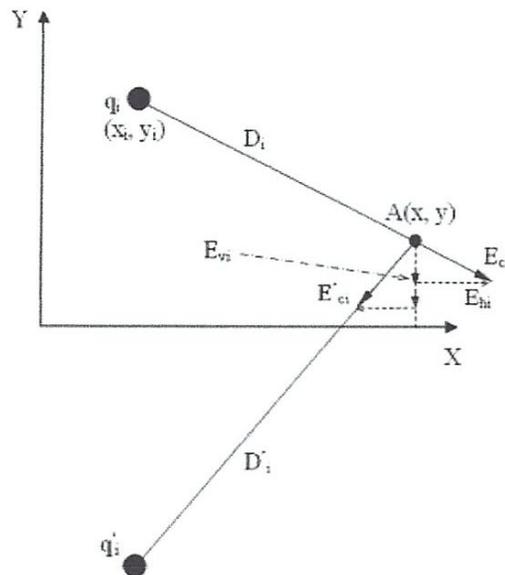


Figure.III.7 : Composantes du champ électrique dû à la ligne HT

De même, la composante verticale du champ électrique E se présente comme suit

$$E_{vi} = \left( \frac{q_i}{2r\pi\epsilon_0} \right) \cdot \left[ \frac{(y-y_i)}{D_i^2} - \frac{(y+y_i)}{D_i'^2} \right] \dots\dots\dots 3.6$$

Résultant des composants horizontale et vertical du champ donne la totalité du champ électrique a l'endroit souhaité comme indiqué dans l'équation 3.7

$$E_{tn} = (E_{hn}^2 + E_{vn}^2)^{1/2} \dots\dots\dots 3.7$$

$$E_{hn} = \sum_{i=0}^n E_{hi} \quad \text{et} \quad E_{vn} = \sum_{i=0}^n E_{vi}$$

### III.9. Calcul du champ magnétique :

Méthode des vectorielles pour le calcul du champ magnétique

Le champ magnétique émis par une ligne triphasée aérienne en un point M situé a une certaine distance par rapport a l'axe du pylône figure 1 peut être calculé comme étant la résultante des trois champs émis par chaque phase séparément, Dans ce contexte un code mathématique basé sur le calcul vectoriel a été développé, pour le calcul de la densité de distribution magnétique d'une ligne de puissance électrique haute tension.

En se référant a la figure 1, les coordonnées des trois phases A,B,C dans le repère cartésien formé par l'axe du pylône et l'axe des distances sont respectivement  $(x_A, y_A), (x_B, y_B), (x_C, y_C)$  ; elle sont parcourues par un système de courants triphasés :

$$i_A = I_m \sin \omega t$$

$$i_B = I_m \sin(\omega t - 120^\circ)$$

$$i_C = I_m \sin(\omega t + 120^\circ)$$

Le champ magnétique sera calculée au moment ou le courant qui circule dans la phase A est maximal pour  $\omega t = \omega t_1 = 90^\circ$

Ainsi le système de courant triphasé prend la forme :

$$i_A = (\omega t_1) = I$$

$$i_B = (\omega t_1) = -0.5I$$

$$i_C = (\omega t_1) = -0.5I$$

Les courants des phases sont notés positifs lorsqu'ils se dirigent vers l'observateur , dans le cas contraire ils sont notés négatifs, dans se cas l'intensité du champ magnétique émise par la ligne aérienne triphasée est la somme vectorielle des intensités de champ émise par les trois courants. Figure 1

$$H_m = H_A + H_B + H_C$$

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

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

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

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

Avec  $r_A, r_B, r_C$  représentent les distances du point M aux phases A, B, C, et  $e_{rA}, e_{rB}, e_{rC}$  les vecteurs unitaires de ces distances, celles-ci sont calculées d'après la dépendance géométrique suivante :

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

Les projections du vecteur champ magnétique résultant dans les mêmes coordonnées, son module et son déphasage par rapport à l'axe des x sont respectivement :

$$H_x = H_{Ax} + H_{Bx} + H_{Cx}$$

$$H_y = H_{Ay} + H_{By} + H_{Cy}$$

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

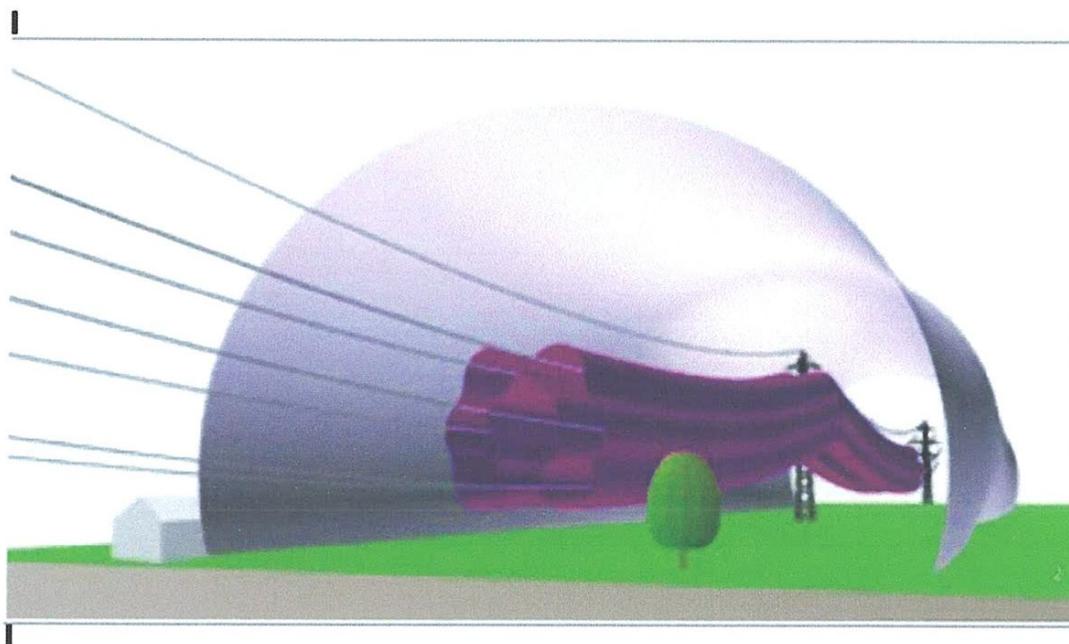
La densité du flux magnétique (B) est donnée par :

$$B = \mu_r \mu_0 H \quad \text{Avec}$$

$\mu_r$  : permittivité magnétique relative (=1.00000038)

$\mu_0$  : permittivité magnétique du vide (=4 $\pi$ .10<sup>-7</sup>) H/m

## Chapitre IV : Modélisation du champ électrique et magnétique généré par une ligne HT



## Introduction

Notre objectif est d'étudier les effets des champs électromagnétiques générés par les lignes haute tension non seulement sur les milieux biologiques (animaux, êtres humains...etc.) mais aussi sur les appareils électroniques et électriques (implants médicaux, système de commandes dans les automobiles, avion ... etc.)

Notre contribution consiste à étudier et caractériser une ligne Haute tension comme une source de perturbation. Donc nous présentons une modélisation analytique et numérique à base de la méthode des éléments finis.

### VI.1 Présentation du modèle :

Le modèle étudié est une ligne Haute Tension avec une configuration en nappe simple et horizontale les trois phases alimentées par une tension de 220 KV et par une intensité de courant de 270 A. La figure ci-dessous présente le modèle étudié (Figure VI.1).



**Figure VII 1 : modèle étudié Ligne simple en Nappe Horizontal de 220 KV**

Tout comme pour les lignes de distribution, le champ électrique produit par les lignes de transport varie peu car elles ont une tension relativement stable. Les arbres, les clôtures la structure de la maison atténuent ce champ électrique.

Ce qui a trait au champ magnétique, son intensité dépend de l'intensité du courant électrique, mais aussi de la distance par rapport à la source ainsi le champ magnétique généré par une ligne à haute tension (LHT) est plus fort immédiatement en dessous des fils et il diminue rapidement à mesure que nous nous en éloignons, il faut noter que seuls les conducteurs où circule le courant électrique produisent des CEM. Les pylônes qui supportent les fils ne créent pas de champ magnétique parce que le courant n'y circule pas au-delà d'une centaine de mètres de la bordure de l'emprise d'une LHT, le champ magnétique se confond généralement avec celui produit par les autres sources de cet environnement, le champ magnétique observé dans les maisons situées immédiatement en bordure d'une emprise de ligne est, en moyenne, supérieur aux autres

## VI.2 Caractéristiques de la ligne :

Un système triphasé correspond à l'utilisation, non pas d'une, mais

de trois tensions sinusoïdales  $v(a)$ ,  $v(b)$  et  $v(c)$ .

Ces tensions sont identiques mais déphasées entre elles de  $120^\circ$  représenté sur les tableaux

suivants :  $V(a) = 220000 * (-0.5 + j * 0.866) \text{ V}$

$V(b) = 220000 \text{ V}$

$V(c) = 220000 * (-0.5 - j * 0.866) \text{ V}$

LIGNE 220 KV EHD/ARM : (L, S)=(2.40 km , 1x411 mm <sup>2</sup> )				
SUPPORT N° :1	C+0	Distance entre phase 7.70	Hauteur de phase /Sol 20.20	Hauteur CDG /sol 24.80
SUPPORT N° :2	A 0	7.00	22.80	25.30
SUPPORT N°3	C+0	7.70	20.20	24.80

**Tableaux VI:1 ligne el hadjar/ kheraza (pylônes type chat)**

## VI.3 Modélisation Analytique :

On considère une ligne électrique aérienne triphasée à haute tension ayant l'arrangement et les coordonnées géométriques, rapportées au pylône de suspension, modéliser à la figure

suivante, chaque phase de la ligne (L1, L2, L3), les model est constituées en nappes horizontales Avec :  $U=220\text{kV}$   $P=84\text{kV}$ ,  $Q=69\text{Mvar}$ ,  $I=270\text{A}$



$d$  Distance entre la phase en mètre  $= 7.70\text{m}$

$h$ -hauteur des phases /sole et de  $20.20\text{m}$

**VI.3.1 Profile du champ électrique :**

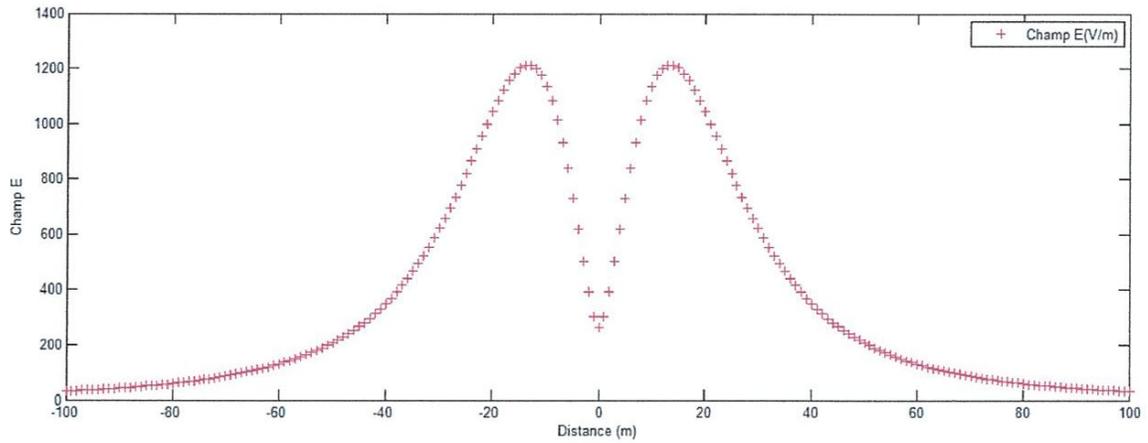


Figure VI: 7.Représente le profil de Champ électrique

**VI.3.2 Profile du champ magnétique :**

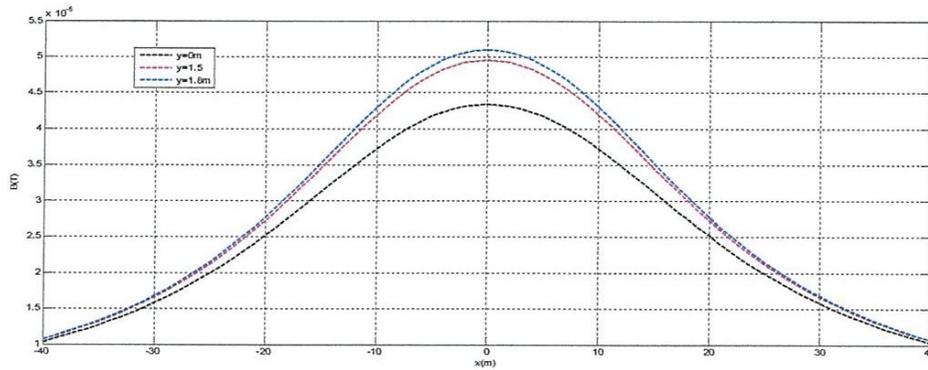


Figure VI : 6 Représente le profil de Champ Magnétique

#### VI.4. Modelé Numériques.

La simulation numérique est effectuée par le logiciel COMSOL MULTI PHYSICS en 2D, celui-ci utilise la méthode des éléments finis. nous utilisons le module Electrostatique et Magnétostatique du COMSOL pour en faible courant. Les effets du champ électromagnétique sont négligeables par rapport au champ électrique.

##### VI.4 a) Méthode des Elément finis

Dans notre travail, nous avons fait appel à la méthode des Eléments finis, cette méthode approuvé son efficacité dans le cadre de la modélisation des dispositifs électromagnétiques. Son principe consiste à subdiviser le domaine d'étude ( $\Omega$ ) en un nombre d'éléments sous forme de triangle.

##### VI.4.b) Champs Electrostatique et Magnétostatiques

L'analyse quasi statique est valide dans la prétention cela  $\partial D / \partial t = 0$ . Ceci implique cela

Les équations des maxwells peuvent être réécrites de la façon suivante.

$$\nabla \times \mathbf{H} = \mathbf{J} = \sigma (\mathbf{E} + \mathbf{V} \times \mathbf{B}) + \mathbf{J}_e$$

$$\nabla \times \mathbf{E} = -\partial \mathbf{B} / \partial t$$

$$\nabla \cdot \mathbf{B} = 0$$

$$\nabla \cdot \mathbf{D} = \rho$$

$$\nabla \cdot \mathbf{J} = 0$$

The first part of the paper is devoted to the study of the asymptotic behavior of the estimator of the variance-covariance matrix of the parameters of the model. It is shown that the estimator is consistent and asymptotically normal under certain regularity conditions.

In the second part, the asymptotic behavior of the estimator of the parameters of the model is studied. It is shown that the estimator is consistent and asymptotically normal under certain regularity conditions.

$$E(\hat{\theta}) = \theta$$

The third part of the paper is devoted to the study of the asymptotic behavior of the estimator of the parameters of the model. It is shown that the estimator is consistent and asymptotically normal under certain regularity conditions.

The fourth part of the paper is devoted to the study of the asymptotic behavior of the estimator of the parameters of the model. It is shown that the estimator is consistent and asymptotically normal under certain regularity conditions.

$$E(\hat{\theta}) = \theta$$

The fifth part of the paper is devoted to the study of the asymptotic behavior of the estimator of the parameters of the model. It is shown that the estimator is consistent and asymptotically normal under certain regularity conditions.

structure dans le besoin de problème pour être petit comparé à la longueur d'onde employé pour la définition du potentiel.

L'organigramme ci-dessous montre l'application de la méthode des éléments finis

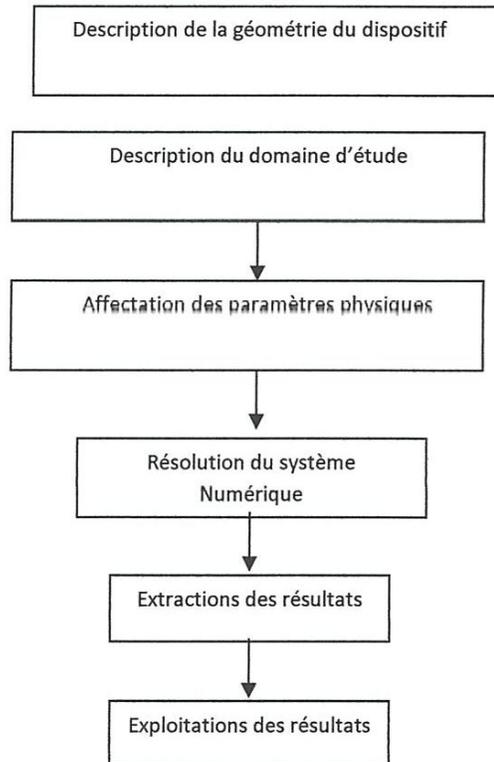
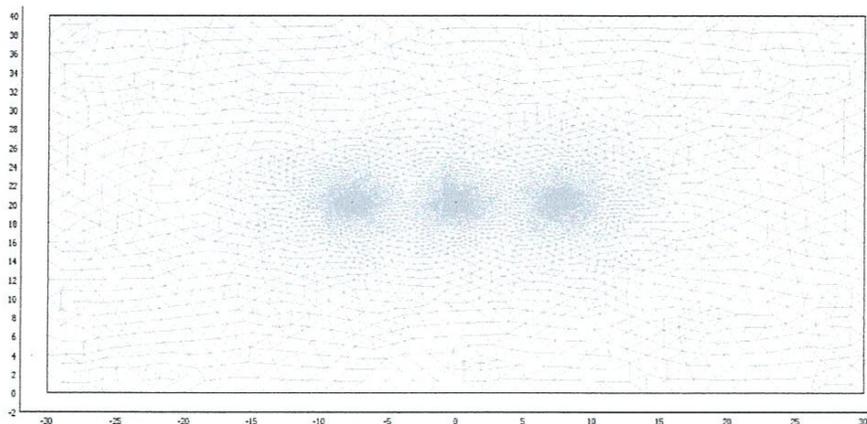


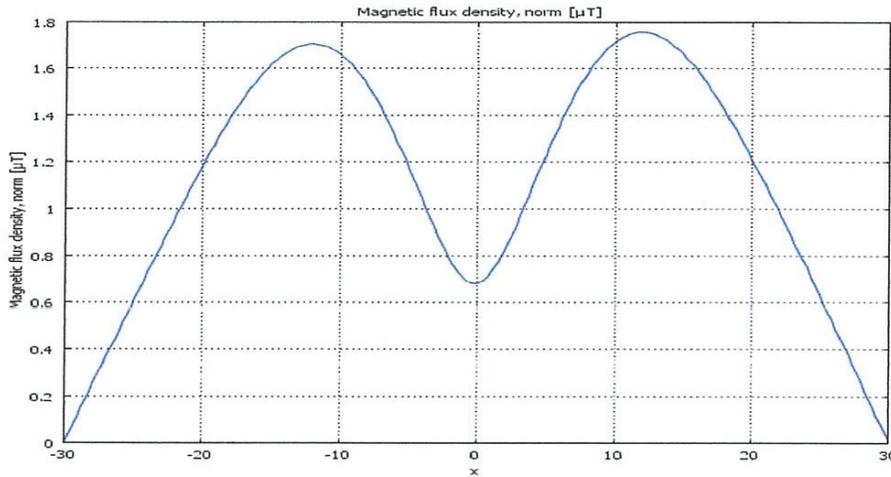
Figure VI.8 Représente l'Organigramme de calcul par éléments finis

### VI.5 .Maillage du modèle :

La figure suivante illustre le maillage des éléments du modèle étudiée, la taille minimale de la maille est de 1mm et les nombre des maille est de 14968 éléments.

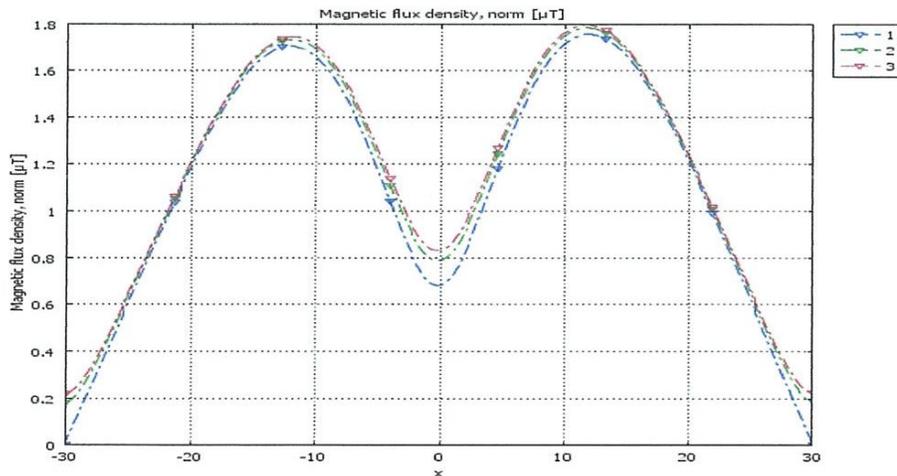


**Figure VI.7 maillage du modèle étudié**



**Figure VI.9 Représente le Profil du Champ Magnétique**

La figure VI.9 illustre le profil du champ magnétique sur le sol et la figure VI.10 montre les profils de la densité de champ magnétique pour les trois niveaux, pour  $Y=0$  en bleu (représente le sol ou bien les pieds, pour  $Y=1.5$  m couleur verte (représente l'endroit du cœur d'un être humain) et pour  $Y=1.8$  m en couleur rouge (qui représente l'endroit du cerveau humain).



**Figure VI : 10. Profil de champ magnétique pour (0m, 1.5m et 1.8m)**

La figure VI.11 montre les profils de la densité de champ électrique pour les trois niveaux, pour  $Y=0$  en bleu (représente le sol ou bien les pieds, pour  $Y=1.5$  m couleur verte (représente l'endroit du

cœur d'un être humain) et pour  $Y=1.8\text{m}$  en couleur rouge (qui représente l'endroit du cerveau humain).

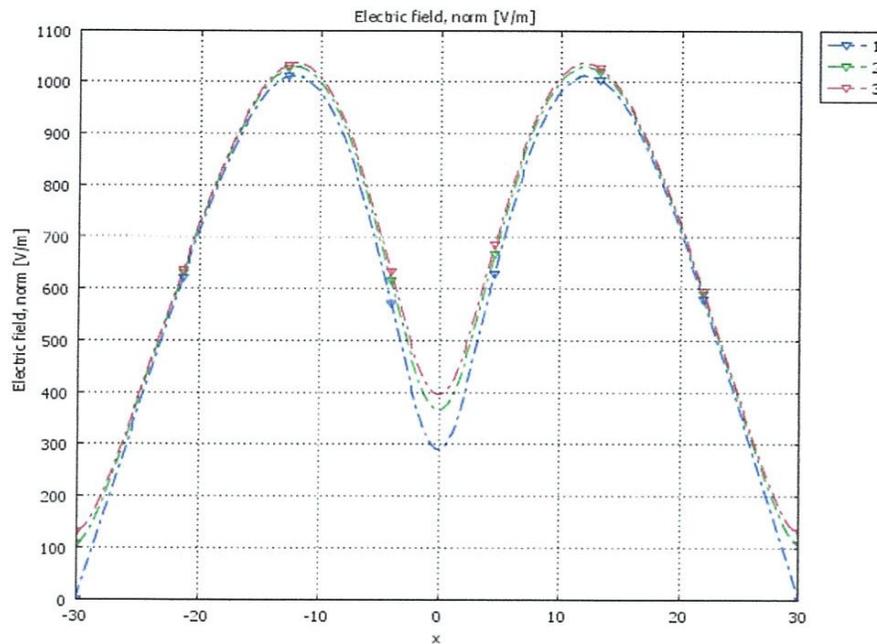


Figure VI : 11. Profil de champ Electric pour (0,1.5 et 1.8m)

### VI.6 comparaison et discussion :

Les résultats de simulation numérique et analytiques montrent que le champ magnétique et électrique ayant le même profil avec quelque différence aux niveaux de l'amplitude des champs électriques et magnétiques.

Ces résultats nous a permis de caractériser les lignes Haute tension comme une source de perturbation et par la suite d'étudier le risque généré les champs électromagnétiques générés par ces lignes.

## **Conclusion :**

Le modèle de ligne haute tension étudié a été analysé de vue distribution des quantités de charge électrique et magnétique et on peut conclure :

Que les intensités du champ électrique et magnétique relevées pour les configurations horizontale, verticale et triangle sont bien inférieures aux limites établies par les normes internationales.

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.

La modification des paramètres géométriques de la ligne est une option très attractive pour la minimisation des intensités des champs électromagnétiques et la réduction de leurs effets sur la santé humaine.les

Les perturbations résultantes de l'interférence des champs générés par les lignes aériennes hautes tension sont facilement maîtrisables par un bon choix du critère de dimensionnement des lignes dans l'étape de fondation du réseau électrique.

## REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES:

AUTEUR//S. Tupie, A. Isaramongkolrak, and P. Palo-la-or "Analysis of Electromagnetic Field Effects Using FEM for Transmission Liens Transposition" Proceedings Of the World Academy Of Science, Engineering And Technoloyg Volume 41 May 2009 ISSN: 2070-3740

[4] Debye popular molecules, New York, The chemical catalog; 1929

[5] Col k .S. COL. R.H ; Dispersion and Absorption in dielectrics-..1943

[6] Fricke H..... ;The theorem polarization, phil.Mag.PP3310-318.19332.

[7] Rigaud .B, Morucci J.P.; Chauveau ...(1996)

[1] J-P Perez, Electromagnétisme : Vide et Milieux Matériels, Ed. Masson, Paris, 1991

[2] J. L. Coulomb, J. C. Sabondiere, "Calcul du Champ Electromagnétique", Techniques d'Ingénieur, Volume Génie Electrique 2000.

[3] Y. Marechal, " Modélisation des Phénomènes magnétiques avec termes de transport. Application aux Ralentisseurs Electromagnétiques, " Thèse de doctorat, INPG, 1991.

[4] Le transport de L'Energie électrique et l'environnement. Groupe de travail (CIGRE) 1991.

[5] A. Lotfi, "Modélisation Tridimensionnelle par la Méthode des Volumes Finis des Phénomènes Electromagnétiques et Thermiques Couplés dans les Dispositifs de Chauffage par Induction," Mémoire de Magister, Université de Biskra – Algérie, 2003

[6] Extraits du règlemente technique et de securité sur les ouvrages de distribution de l'énergies électrique. Octobre 1995.

[1] J-P Perez, Electromagnétisme : Vide et Milieux Matériels, Ed. Masson, Paris, 1991

[7] J. L. Coulomb, J. C. Sablonnière, "Calcul du Champ Electromagnétique", Techniques d'Ingénieur, Volume Génie Electrique 2000.

[8] Y. Marechal, " Modélisation des Phénomènes magnétiques avec termes de transport. Application aux Ralentisseurs Electromagnétiques, " Thèse de doctorat, INPG, 1991.

[9] Le transport de L'Energie électrique et l'environnement. Groupe de travail (CIGRE) 1991.

A. Lotfi, "Modélisation Tridimensionnelle par la Méthode des Volumes Finis des Phénomènes Electromagnétiques et Thermiques Couplés dans les Dispositifs de Chauffage par Induction," Mémoire de Magister, Université de Biskra – Algérie, 2003

[10] Extraits du règlement technique et de sécurité sur les ouvrages de distribution de l'énergie électrique. Octobre 1995.