

M/621.837

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



**Domaine : Sciences et Technologie**  
**Filière : Génie Electrique**  
**Spécialité : Protection et Contrôle**

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

---

**COMPATIBILITE ELECTROMAGNETIQUE :  
Modélisation des phénomènes induits générés par les champs  
électromagnétiques**

---

Présenté par : **LOUDINI SAMIHA**  
**HAMDI RIMA**

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

Mai 2014

14/3084

## Remerciement

*Nous remercions dieu de nous avoirs donnés la force et le courage ainsi que la  
volonté d'effectuer notre projet de fin cycle.*

*Nous tenons à exprimer toute nous reconnaissances à monsieur **DR-BABOURI  
ABDSSELLAME** qui a dirigé ce travail avec intérêt et compétences, et qui  
nous conseille tous le long de cette période.*

*Nous remercions particulièrement monsieur **B.ALI RACHEDI** pour nous avoir  
guidés, pour ses encouragements et son soutien et ses multiples coups de main.*

*Nous adressons nos remerciement tous ceux qui ont participé de près ou de loin à  
l'accomplissement de ce mémoire.*

*Nous exprimons nos gratitudes et nous remercions notre parents et a toute notre  
famille pour leur encouragement.*



# *Dédicaces*

*À la lumière de ma vie mes chers parents,*

*À mes chers frères et sœurs, sans oublier le mari de ma  
sœur qui m'a beaucoup encouragé, et particulièrement mes  
neveux.*

*À mon mari qui me donne la force de continuer jusqu'au  
bout ;*

*À ma belle mère et mon beau père,*

*À mon beau frère, mes belles sœurs.*

*À tous ceux qui m'ont encouragée de prêt ou de loin ;*

*Je dédie ce mémoire.*

*Samika*



# *Dédicaces*

*À la lumière de ma vie mes chers parents,  
À mes chers frères et sœurs, sans oublier le mari de  
ma sœur qui m'a beaucoup encouragé, et particulièrement  
mon grand père et ma grande mère, et mes nièces.*

*À mon mari qui me donne la force de continuer  
jusqu'au bout ;*

*À ma belle mère et mon beau père,  
À mon beau frère, mes belles sœurs.*

*À tous ceux qui m'ont encouragée de prêt ou de loin ;  
Je dédie ce mémoire.*

*Rima*

# Sommaire



*SOMMAIRE*

Introduction générale.....01

**Chapitre I : compatibilité électromagnétique**

I-1 la compatibilité électromagnétique.....03

I-2 mécanisme d'action des perturbations électromagnétiques.....04

I-3 Nature des sources des perturbations.....04

I-3-1 Perturbations rayonnées.....05

I-3-2 Perturbations conduites.....06

I-4 Mécanisme de transmission des perturbations.....06

I-5 Couplage par conduction.....08

I-5-1 Les couplages par liaison directe.....08

I-5-2 Les couplages par impédance commune.....09

I-5-3 Couplage par rayonnement.....09

I-5-3-a Le couplage en champ lointain.....09

I-5-3-b Le couplage en champ proche.....10

I-6 Méthodes numériques en électromagnétisme.....12

I-6-1 Différences finies (DF).....12

I-6-2 La méthode FDTD.....13

I-6-3 La méthode des impédances.....	15
I-6-4 Éléments finis (FEM).....	16

## **Chapitre II : ligne haute tension**

Introduction.....	21
II-1 Définition des lignes HT.....	21
II-2 Le rôle des lignes.....	21
II-3 Les Différentes configurations Des lignes HT.....	22
II-4 Gamme des tensions utilisées par le groupe sonelgaz.....	24
II-5 Les Effet de Rayonnement électromagnétique.....	24
II-5-1 Les Effet directs.....	24
II-5-2 Les effets indirect.....	26
II-5-3 Les effets particuliers.....	27
II-5-4 Limitation de l'exposition en considération des effets directs.....	27
II-6 Champ électrique d'un axe chargé.....	28
II-6-1 champ électrique d'une ligne au voisinage du sol (méthode des images)..	30
II-6-2 Champ électrique de deux axes parallèles dans l'air.....	30
II-7 Méthode de calcul analytique du champ électromagnétique.....	33
II-7-1 Calcul du champ électrique.....	33
II-7-2 Calcul du champ magnétique.....	35

## **Chapitre III : application**

Introduction.....	37
III-1 caractéristique du modèle étudié.....	37

<b>III-1-1 Calcul Champ Magnétique.....</b>	<b>38</b>
<b>III-1-2 Calcul Champ électrique.....</b>	<b>39</b>
<b>III-2 Résultat de calcul.....</b>	<b>41</b>
<b>III-2-1 Profile du champ électrique.....</b>	<b>41</b>
<b>III-2-2 Profile du champ magnétique.....</b>	<b>44</b>
<b>Conclusion générale.....</b>	<b>48</b>



# **Introduction générale**

## *INTRODUCTION GENERALE*

Le développement technologique ainsi que la qualité de l'électricité concerne tous les acteurs en présence, qu'ils soient gestionnaire de réseaux, utilisateur 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, intervenant (fournisseurs d'électricité ou de service, organismes de régulation...). Le champ électromagnétique a plusieurs aspects, l'aspect positive qui consiste a l'utilisation de champ électromagnétique en médecine pour les diagnostics (imagerie par résonance magnétique) en outre, le champ électromagnétique intervient aussi pour l'utilisation en thérapie (hyperthermie électrostimulation... etc.). Malgré l'avantage que rapporte le champ électromagnétique pour les besoins dans certain domaine essentiel en médecine mais il a aussi d'autre conséquence sur les humains a long terme, ou a court terme.

Dans ce mémoire le travail est divisé en trois chapitres :

Le premier chapitre permet de situer le contexte et la problématique générale de l'étude par une présentation des différentes sources électromagnétiques suite par une description relative à une étude CEM (Source, Victime et milieu de couplage).

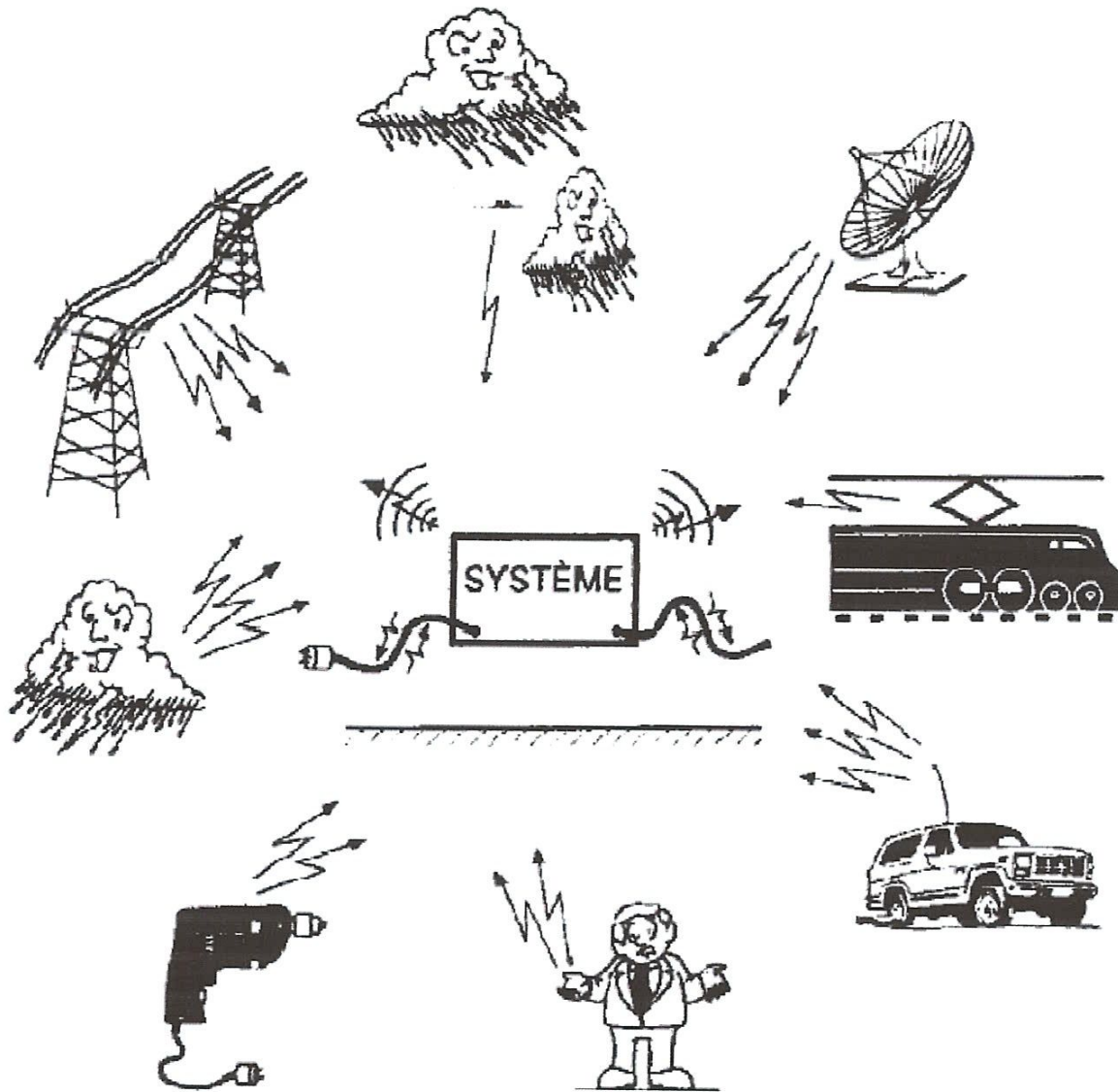
Le deuxième chapitre présente une étude des différents types et configurations des lignes Haute Tension ainsi que les lois de base des calculs de champ électrique et magnétique.

Enfin, le troisième chapitre présente modélisation analytique de l'environnement électromagnétique généré par une ligne Haute Tension.

# CHAPITRE I

## *Compatibilité électromagnétique CEM*

# Compatibilité Electromagnétique



## I-1 la compatibilité électromagnétique :

### I-1-1 Définition :

La Compatibilité Electromagnétique ou 'CEM' est une science relativement récente en tant que tel. 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 :

- a) **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.
- b) **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:

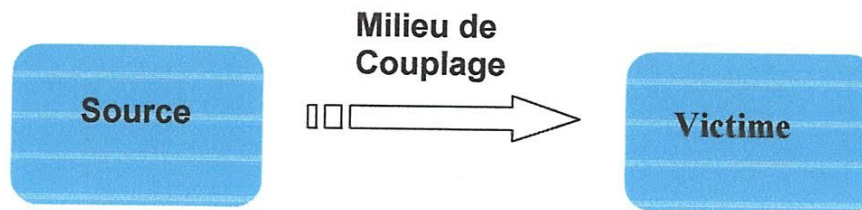
1. la caractérisation de l'environnement électromagnétique (sources de perturbations ou d'émissions électromagnétiques).
2. l'étude des mécanismes de couplage.
3. l'étude de l'immunité des équipements aux perturbations.

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-2 mécanisme d'action des perturbations électromagnétiques :

Le principe d'action des perturbations électromagnétiques est schématisé par le diagramme de la figure I-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 1 : Production d'un phénomène de perturbation Electromagnétique*

### I-3 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, des 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**.

- 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-3-1 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 (Figure.2).
- Le champ magnétique s'exprime en A/m. Son émission est engendré par un circuit basse impédance parcouru par un courant (Figure.3)

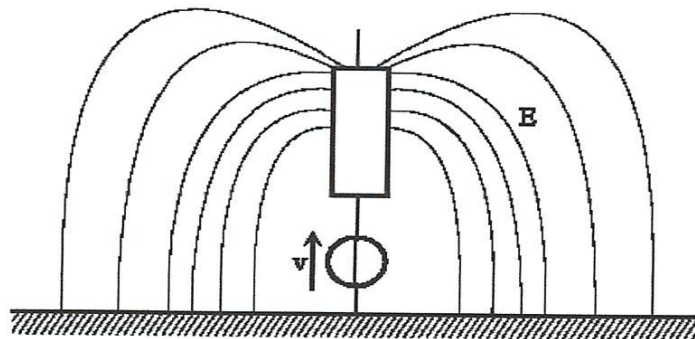


Figure 2 : Champ Electrique

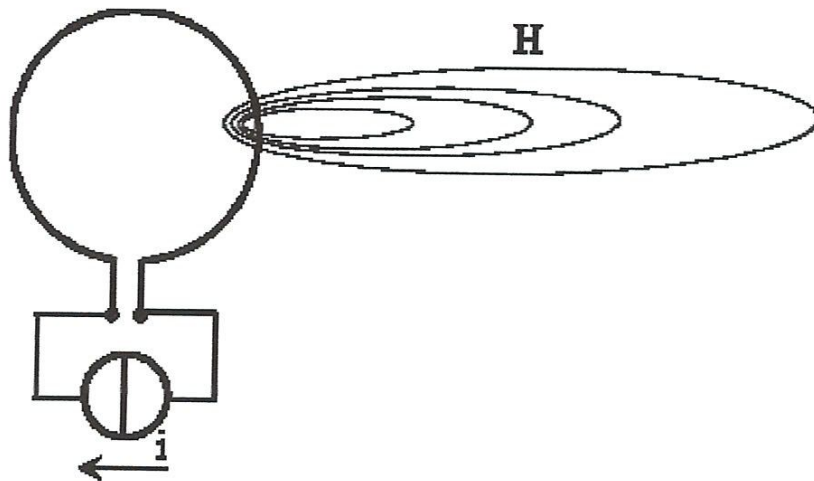


Figure 3 : Champ magnétique

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 aux caractéristiques d'une onde plane.**

### I-3-2 Perturbations conduites :

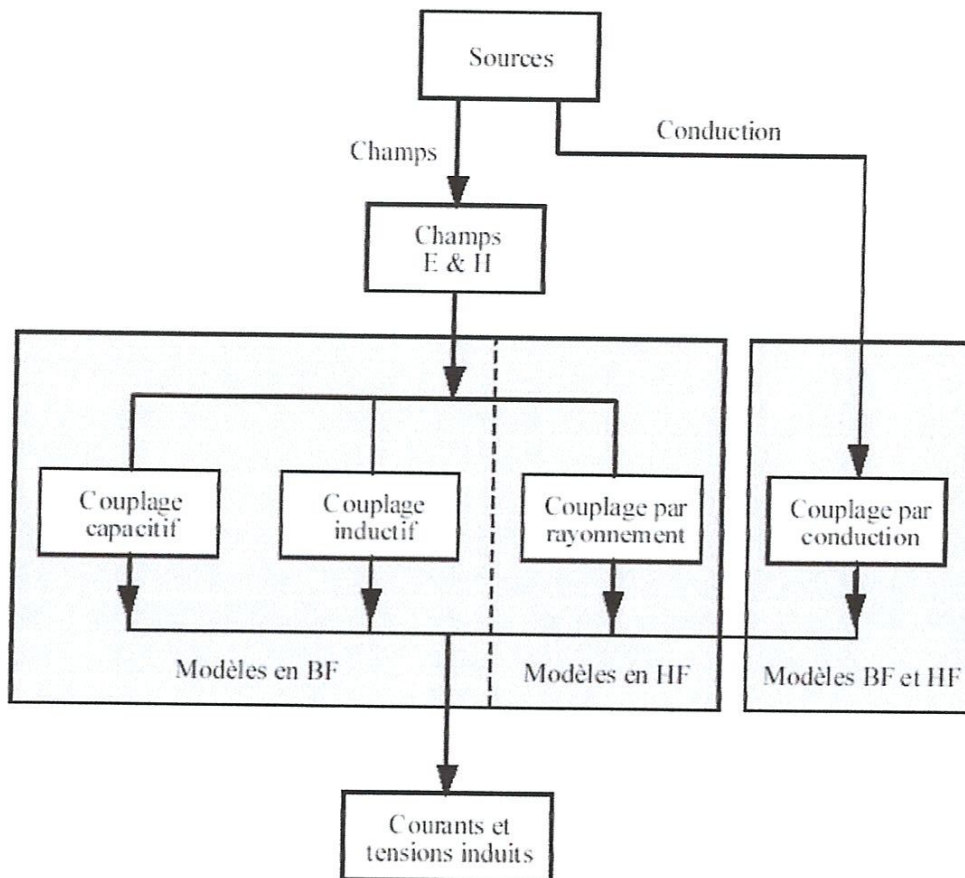
Les perturbations électromagnétiques peuvent également être transmises en utilisant comme vecteur les connexions électriques entre différents équipements. Ces perturbations sont alors nommées perturbations conduites.

Bien évidemment ces courants et tensions parasites circulant dans les câbles ou fils interconnectant des équipements entre eux vont eux-mêmes rayonner.

### I-4 Mécanisme de transmission des perturbations :

Les modes d'action des perturbations électromagnétiques sur les électroniques s'appellent couplages. La figure ci-dessous présente ces différents modes de couplage.





*Figure 4 : les Différents modes de 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 :

- **Couplage par conduction** : propagation d'une tension ou d'un courant sur des conducteurs.
- **Couplage par rayonnement** : propagation d'un champ électromagnétique dans un milieu non-conducteur (air, autre type de matériau isolant) ou conducteur (blindage métallique).

**I-5 Couplage par conduction :**

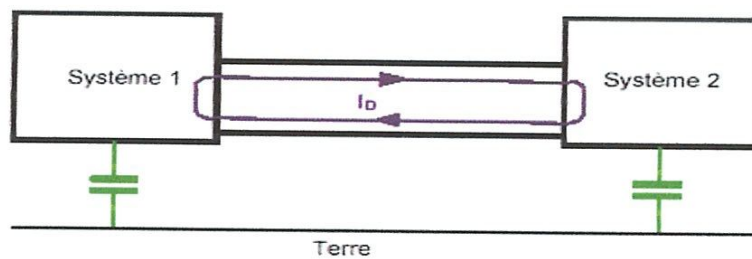
Ce mode de couplage se fait soit par **liaison direct** soit par **impédance commune**.

**I-5-1 Les couplages par liaison directe:**

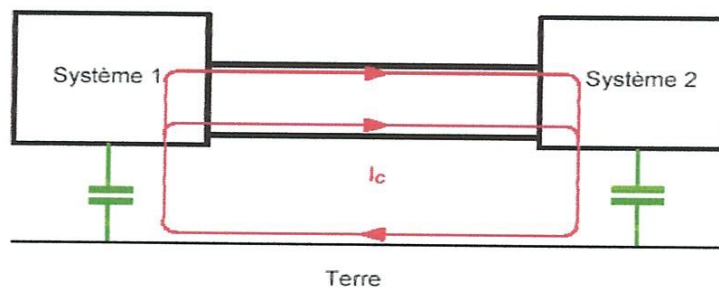
Les couplages par liaison directe permettent la propagation de la source à la victime par l'intermédiaire d'un canal de transmission d'information ou d'énergie.

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

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



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



### I-5-2 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.

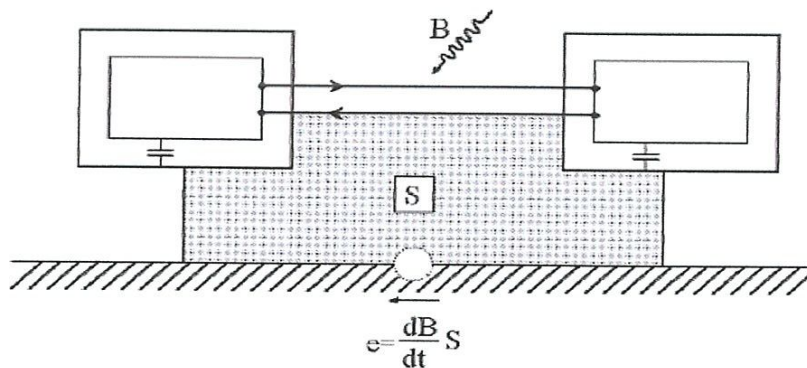
### I-5-3 Couplage par rayonnement :

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-5-3-a 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) (Figure.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 5 : Couplage champ magnétique à câble en mode commun*

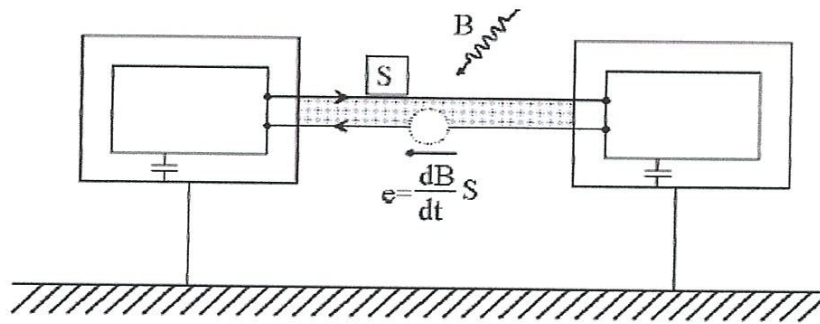


Figure 6: Couplage champ magnétique à câble en mode différentiel

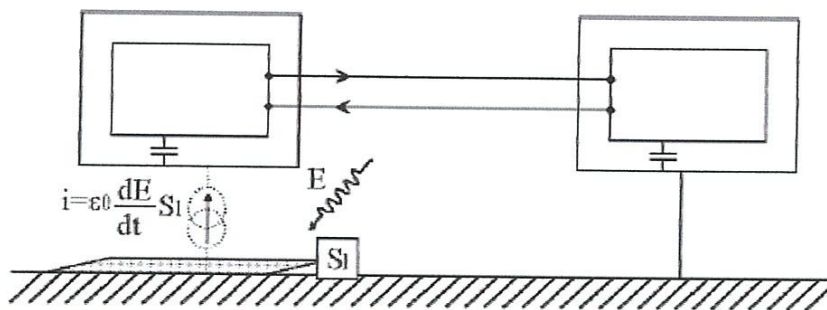


Figure 7: Couplage champ électrique à câble en mode commun

### I-5-3-b 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).

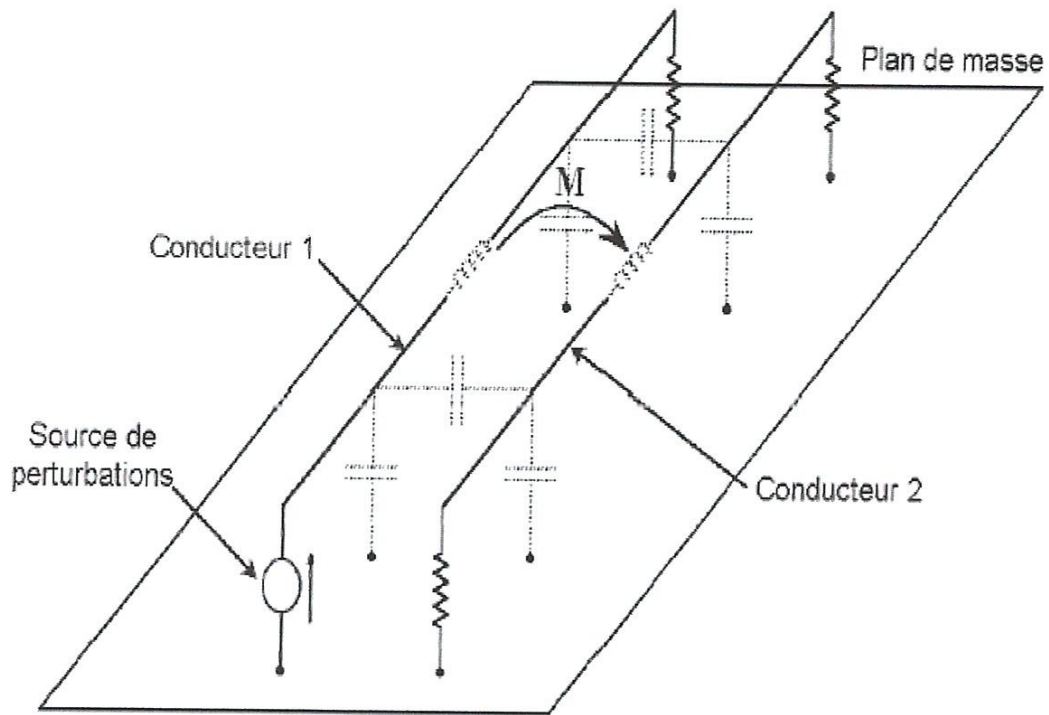


Figure 8: Couplage en champ proche

**I-6 Méthodes numériques en électromagnétisme :**

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

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

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

Suivant les caractéristiques électriques du système de mesure la méthode la plus adaptée pour la modélisation du dispositif sous test est la méthode des éléments finis. En plus, cette méthode est employée par le logiciel de simulation COMSOL MULTIPHYSICS.

**I-6-1 Différences finies (DF) :**

La méthode de différences finies [8] est l'une des premières méthodes numériques à avoir été appliquée en génie électrique. Le principe de base de cette méthode consiste à discrétiser le domaine de résolution avec une grille, et d'approcher l'équation sous forme différentielle sur chaque nœud de la grille. Par exemple (Figure I-1), en 2D l'équation de Laplace :

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

Devient :

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

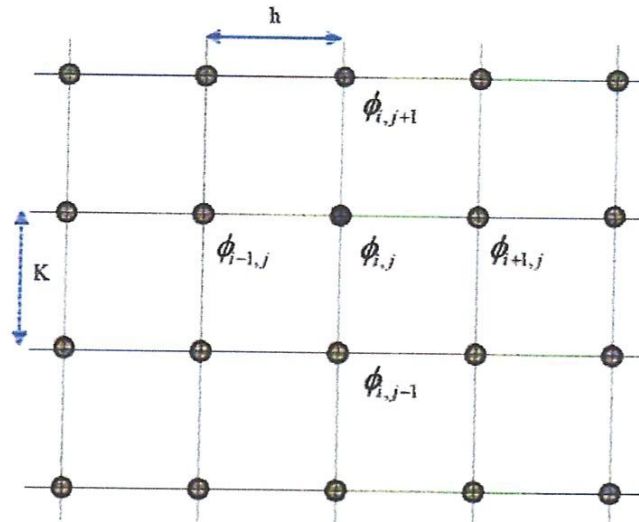


Figure 9 : application de la méthode DF en 2D et 3D

L'équation aux dérivées partielles est ainsi transformée en un système algébrique linéaire creux. Si cette méthode est en principe relativement simple à mettre en œuvre, des problèmes peuvent se poser [9] lorsque on doit gérer des géométries compliquées (discrétisation de la frontière, condition d'interface).

### I-6-2 La méthode FDTD :

La méthode de différences finies dans le domaine temporel a été développée par Kane S. YEE [10], le principe de base est d'approximer la dérivée d'une fonction  $f(x)$  à partir de ses points adjacents. Cette méthode consiste en une double discrétisation dans le temps et dans l'espace (2D ou 3D). L'application de cette méthode a été proposée la première fois pour résoudre les équations de Maxwell. Le maillage (Figure I-10) dans cette méthode consiste à diviser le domaine en cubes élémentaires sur lesquels sont disposées les six composantes du champ électromagnétique qui sont dérivées à partir des équations de Maxwell.

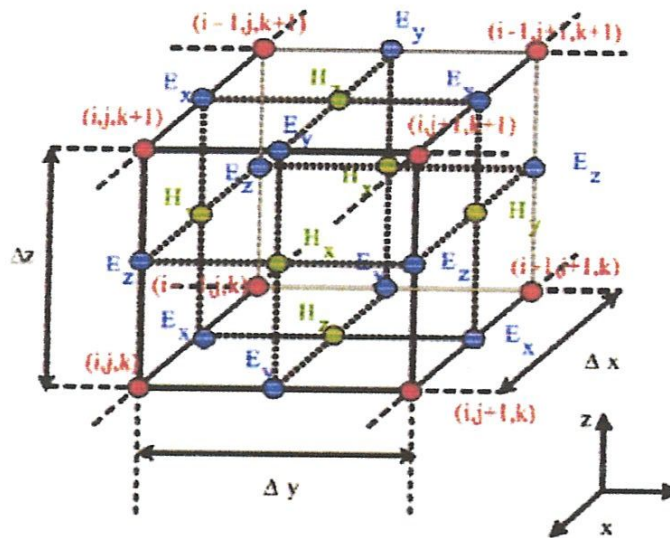


Figure 10 : application de la méthode FDTD maillage de Yee

Les six équations dérivées sont :

$$\begin{aligned}
 \frac{\partial B_x}{\partial t} &= \frac{\partial E_z}{\partial y} - \frac{\partial E_y}{\partial z} & \frac{\partial D_x}{\partial t} &= \frac{\partial H_z}{\partial y} - \frac{\partial H_y}{\partial z} - J_x \\
 \frac{\partial B_y}{\partial t} &= \frac{\partial E_x}{\partial z} - \frac{\partial E_z}{\partial x} & \frac{\partial D_y}{\partial t} &= \frac{\partial H_x}{\partial z} - \frac{\partial H_z}{\partial x} - J_y \\
 \frac{\partial B_z}{\partial t} &= \frac{\partial E_x}{\partial y} - \frac{\partial E_y}{\partial x} & \frac{\partial D_z}{\partial t} &= \frac{\partial H_y}{\partial x} - \frac{\partial H_x}{\partial y} - J_z
 \end{aligned}
 \quad \text{et}$$

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

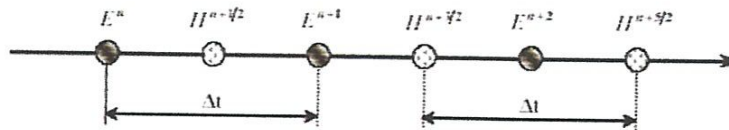
$$F\left(i\Delta x + K_x\left(\frac{\Delta x}{2}\right), j\Delta y + K_y\left(\frac{\Delta y}{2}\right), k\Delta z + K_z\left(\frac{\Delta z}{2}\right)\right)$$

De la même manière, le temps peut être discrétisé en intervalles  $\Delta t$ , ce qui implique que tout instant  $t$  peut être échantillonné par  $n \Delta t$ , avec  $n$  entier positif.



Pour que les dérivées temporelles soient centrées, le champ électrique  $E$  est calculé à l'instant  $n \Delta t$  et le champ magnétique  $H$  à :

$$(n + \frac{1}{2})\Delta t :$$



### ➤ Critère de stabilité

Les équations du champ électromagnétique répondent à un schéma explicite, c'est-à-dire qu'il n'y a pas besoin de système matriciel pour résoudre les équations. Si le système est simple à résoudre, l'utilisateur est cependant limité dans le choix du pas temporel. La relation fixant ce critère de stabilité de la méthode FDTD est donnée ci-dessous :

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

Avec  $c$  la célérité de l'onde dans le milieu de propagation. Ce critère de stabilité du schéma de Yee a été donné par Taflouze [11].

Le problème essentiel posé par cette méthode vient des dimensions forcément limitées du volume étudié. Si au niveau de la source les conditions sont parfaitement claires, il n'en est pas de même au niveau des autres limites du domaine. On introduit alors des frontières absorbantes qui simulent un milieu infini au-delà de la frontière et donc une absorption sans réflexion, de l'onde vers l'extérieur du volume d'étude. Les premières conditions d'absorption ont été proposées par Mur [12], Engquist et Majda [13] mais ne donnent des résultats satisfaisants que dans le cas d'une incidence normale à la surface. D'autres frontières absorbantes ont été proposées plus récemment par Berengère et semblent donner des résultats très intéressants [14].

### I-6-3 La méthode des impédances :

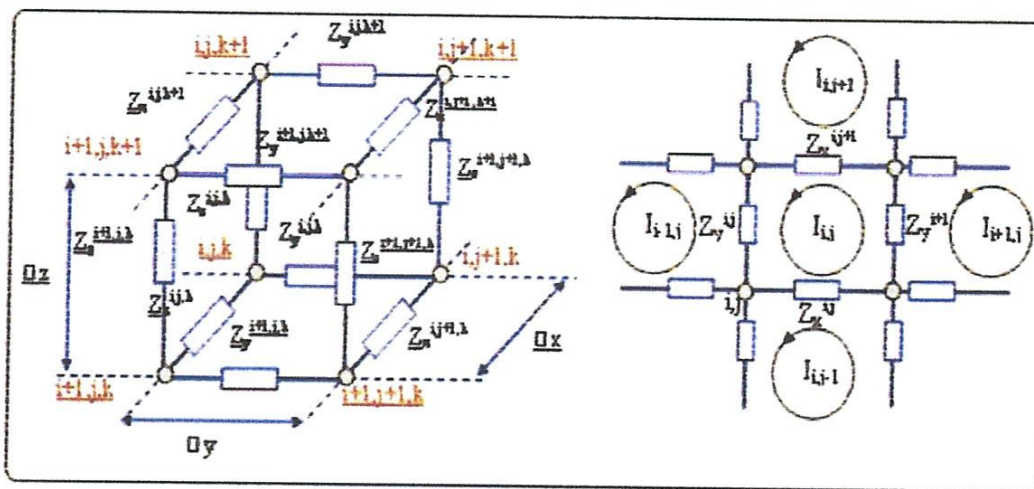
La méthode des impédances [15] consiste à construire un réseau électrique représentatif du milieu et à appliquer les équations de Kirchhoff.

Pour cela, le milieu étudié est décomposé en cellules rectangulaires dans le cas d'une représentation 2D ou cubiques dans le cas 3D. Chaque sommet des cellules est représenté par un nœud et chaque arrête des cellules porte une Impédance :

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

Où : m représente la direction considérée (x, y ou z). AL et AS représentent respectivement la longueur de l'arrête correspondante et la section de la cellule,  $\epsilon$ ,  $\sigma$  représentent les caractéristiques électriques du milieu.

Les inconnues du problème sont les courants I dans chaque maille formée par les arrêtes de chaque cellule. L'équation imposée pour chaque cellule est la loi de Kirchhoff, où une force électromotrice  $FEM = -j(\dot{u}_4)$  est imposée conformément à la loi d'induction de Faraday.



*Figure 11 : Représentation 3D et 2D d'un réseau électrique représentatif d'une matière vivante (Application des lois de Kirchhoff)*

#### I-6-4 Éléments finis (FEM) :

La méthode des éléments finis [16] est un outil de résolution numérique des systèmes physiques. Elle nécessite l'utilisation intensive de l'ordinateur. C'est une méthode à multi-usages, elle peut résoudre la majorité des problèmes rencontrés dans la modélisation des systèmes quelconques : linéaires ou non linéaires, stationnaires ou non stationnaires et elle peut résoudre les problèmes en une dimension, deux dimensions ou trois dimensions. En plus

la méthode des éléments finis est l'une des méthodes pouvant résoudre les problèmes compliqués comme par exemple les simulations sur les milieux hétérogènes, l'application du maillage dépend de la taille de chaque élément constituant le système. La figure III-4 résume une résolution numérique d'un système physique par la méthode EF.

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

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

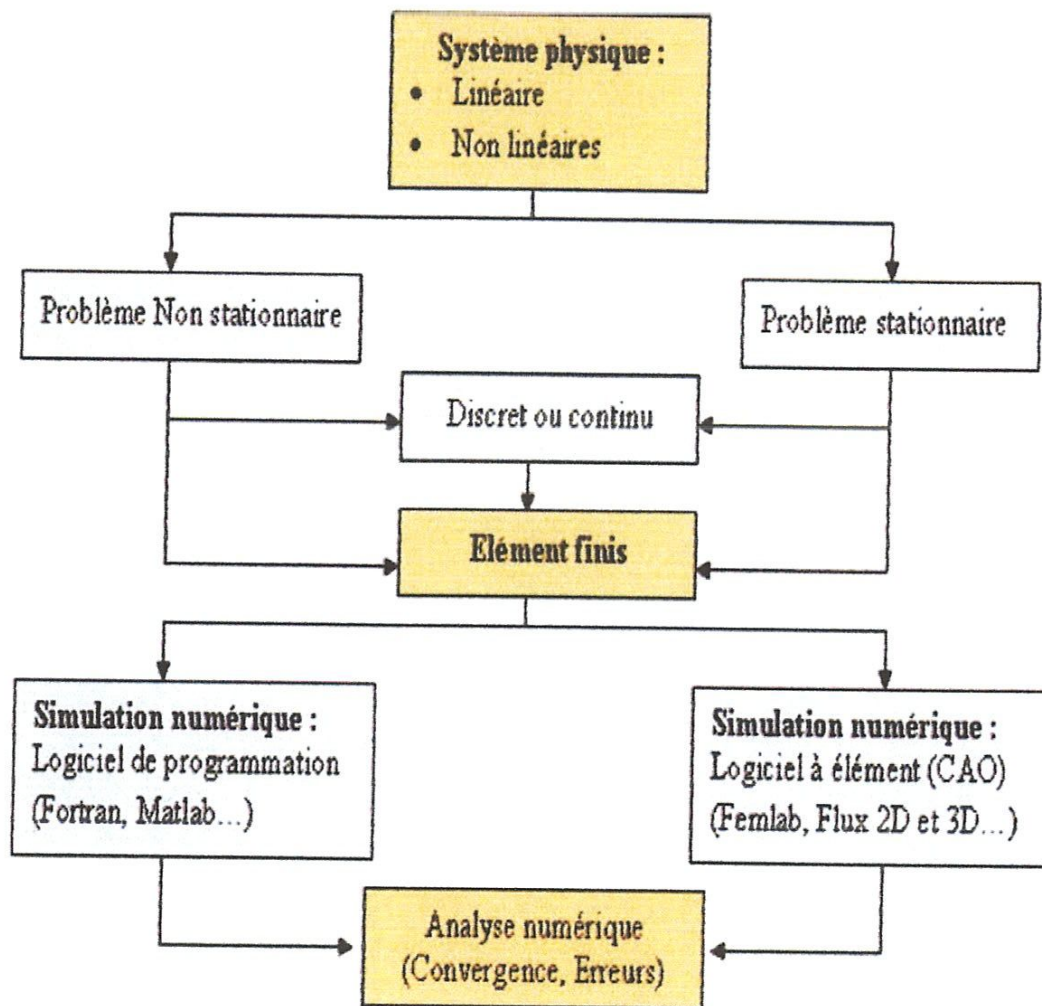


Figure 12: Description de la méthode- résolution d'un système physique par EF. 2.5.

**Le maillage :**

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

- **Les mailles linéiques :** Elles servent à mailler une courbe qui peut représenter le domaine linéique  $Q$  ou une section méridienne d'un domaine surfacique  $Q$  axisymétrique.
- **Les mailles surfaciques :** Elles servent à mailler une surface qui peut représenter le domaine surfacique  $Q$  ou une section méridienne d'un domaine volumique  $Q$  axisymétrique.
- **Les mailles volumiques :** Dans ce cas les mailles sont des volumes. La Figure I-13 ci-dessous présente les différents cas du maillage

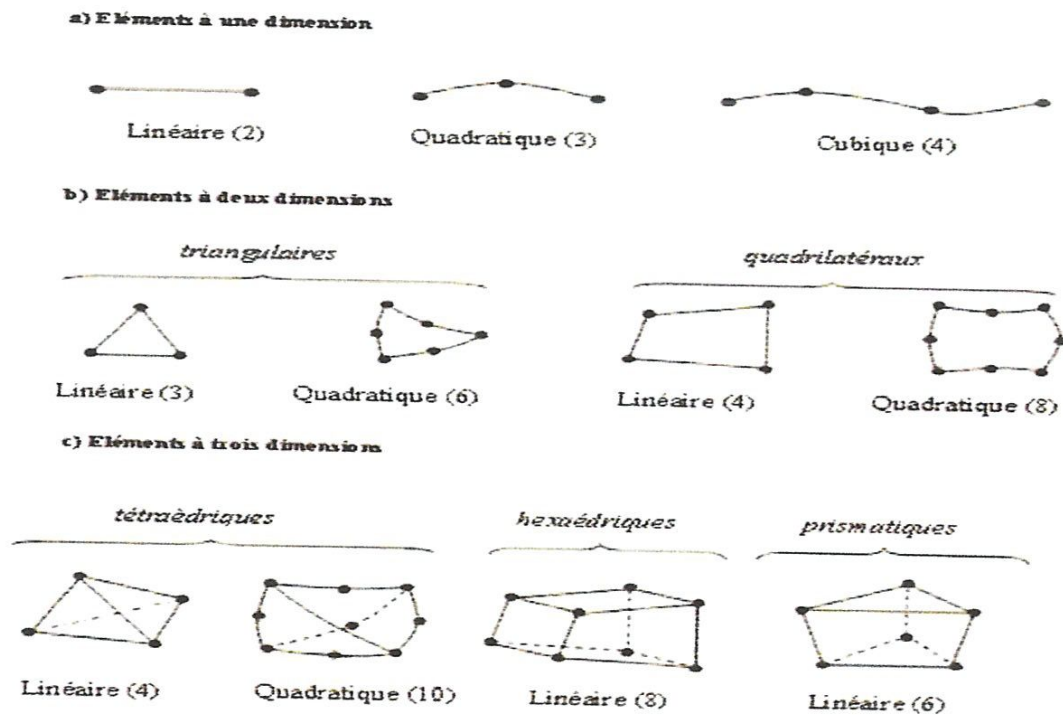


Figure 13: les différents cas du maillage.

Modèle. Il est possible aussi de choisir la dimension de la maille pour chaque sous-domaine. Une caractéristique unique de COMSOL Multiphasiques c'est que Les équations de l'électromagnétique sont automatiquement disponibles dans tous les modes d'application (Figure 13).



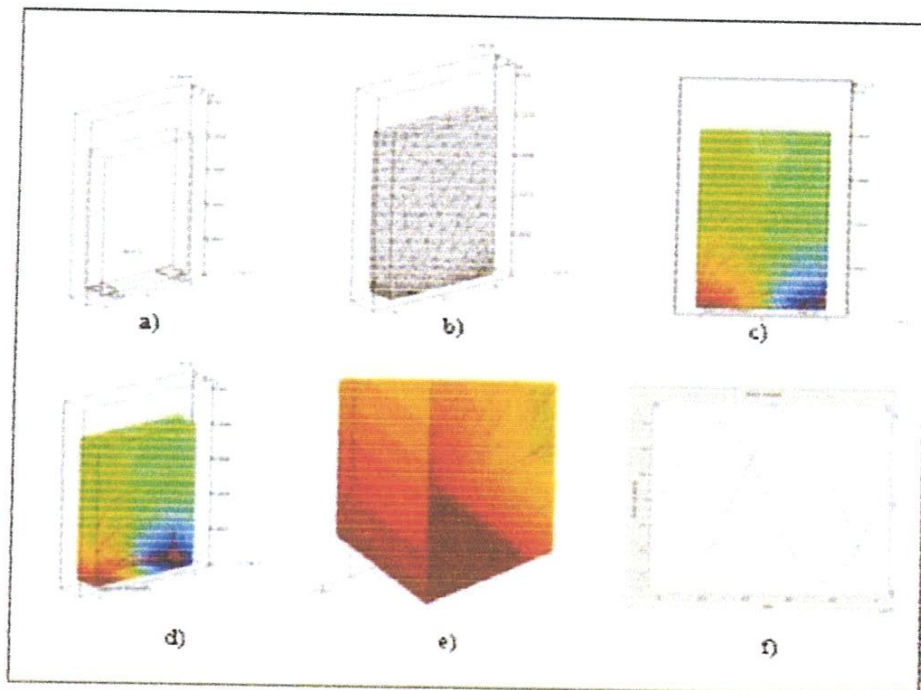
*Figure I: logiciel d'éléments finis.*

➤ **Interface graphique et visualisation :**

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

COMSOL permet de représenter graphiquement de plusieurs manières (par des vecteurs proportionnels, contour, répartition surfacique en 2D et 3D, courbes ...etc.). Il est également possible de faire des animations qui permettent de visualiser les phénomènes des différentes variables : champ électrique, champ magnétique, la densité de courant...etc. Nous présentons

Dans la figure I-14 ci-dessous quelques illustrations d'une simulation par le logiciel COMSOL [17].



**Figure I :** Présentation du logiciel : a) Géométrie du modèle, b) Application du Maillage, c) simulation en 2D, d) simulation en 3D, e) Application Zoom, f) Résultat sous forme de Courbe

# CHAPITRE II

## *Ligne haute tension*

**Introduction :**

Les réseaux électriques sont constitués par des éléments distincts de caractéristiques, de propriétés et de fonctions différentes. Ces éléments sont essentiellement, les lignes, les sous stations et les différents postes de transformation, d'interconnexion, d'alimentation et de distribution.

Pour analyser les régimes d'un réseau électrique, il est nécessaire de le représenter d'abord sous forme d'un schéma équivalent réduit, dans lequel tous les éléments qui le constituent doivent être insérés par leur modèle (schéma) équivalent mais réduits à un même niveau donné de tension. En d'autres termes, sachant que les réseaux électriques sont, en règle générale, hiérarchisés en plusieurs niveaux de tension, les paramètres des éléments du réseau (lignes, transformateurs, réactances, charges...), en passant d'un niveau de tension à un autre, doivent être réévalués relativement au niveau de réduction choisi. Ainsi, la détermination du modèle d'un réseau électrique et l'analyse de ses régimes passent nécessairement par celle des modèles équivalents de ses éléments.

**II-1 Définition des lignes HT :**

La notion de ligne, comme prédéfini, renferme en soit un ensemble d'aspects relatifs aux éléments constitutifs, aux grandeurs descriptives et aux effets interactifs impliqués. En effet, on distingue les aspects:

- Mécanique, relatif à la construction de la ligne.
- Electrodynamique, relatif aux interactions entre parties conductrices de la ligne.
- électrique (électromagnétique), relatif aux processus de transmission de l'énergie. pour lequel le conducteur (phase) est l'élément essentiel.
- D'échange mutuel, relatif aux interactions avec l'environnement.

Pour analyser le processus de transfert de l'énergie électrique la ligne est considérée dans son aspect électromagnétique et peut être représentée par le schéma unifilaire électrique puisque, par construction, les phases sont considérées symétriques et équilibrées.

**II-2 Le rôle des lignes :**

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



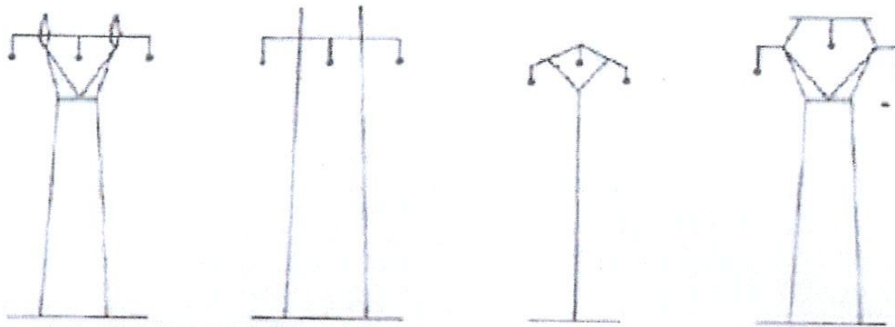
Constituent les artères d'un système d'énergie électrique.

### II -3 Les différentes configurations Des lignes HT :

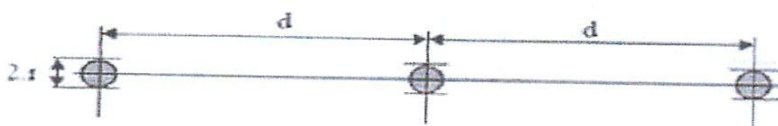
On distingue plusieurs configurations des lignes existantes, parmi ces configurations :

#### a) Configuration en nappe :

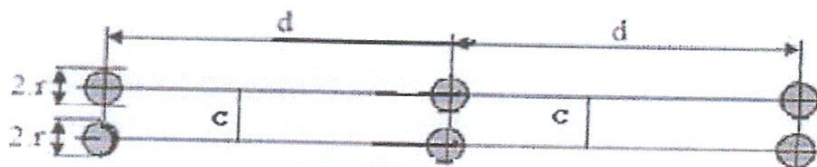
Il existe plusieurs configurations en nappes selon les conducteurs constituant chaque câble :



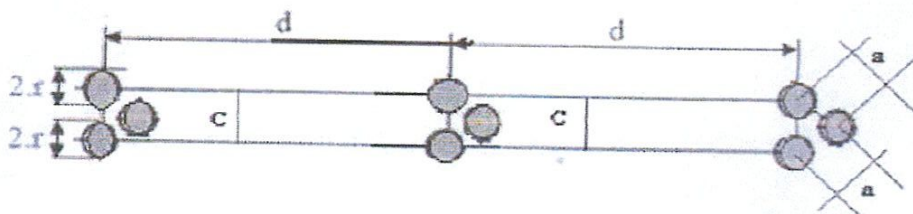
Un conducteur dans chaque câble



Deux conducteurs dans chaque câble



Trois conducteurs dans chaque câble

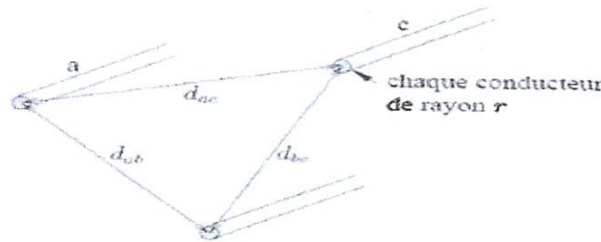


Le câble de garde de section plus petite que les câbles conducteurs, ils sont directement raccordés à la partie supérieure du pylône ils ont une double utilité. Ils protègent les conducteurs d'éventuels coups de foudre directs et permettent, en cas d'incident l'écoulement de la terre des courants de foudre et de court-circuit, via les supports l'un d'entre eux et ils sont utilisé comme voie de télécommunication, les liaisons de télécommunication incorporée à la (fibre optique) permettent transporter les informations nécessaires au fonctionnement du réseau de transport d'électricité, d'un poste électrique à l'autre.

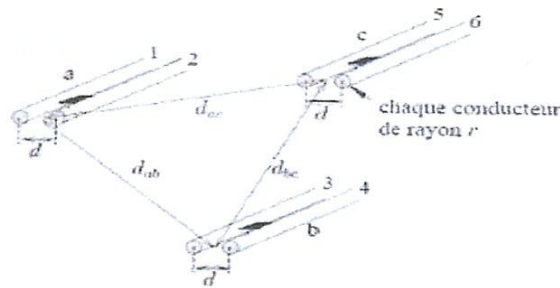
**h) Configuration en triangle :**

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

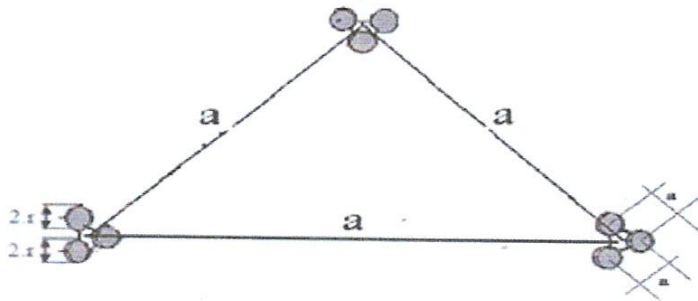
un conducteur dans chaque câble



deux conducteurs dans chaque câble



- trois conducteurs dans chaque câble



#### II-4 Gamme des tensions utilisées par le groupe SONELGAZ:

La nouvelle norme en vigueur en Algérie (SONELGAZ) définit les niveaux de tension alternative comme suit :

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

*Tableau 1 : classification des domaines de tension*

#### II-5 Les Effet de Rayonnement électromagnétique :

##### II-5-1 Les Effet directs :

###### ➤ Champs statiques :

- Réaction cutanée (champ électrique statique) :

Les champs électriques statiques induisent au niveau de la peau des personnes exposées une modification de la répartition des charges électriques. Cette Modification est perceptible surtout au niveau des poils et des cheveux (seuil De perception : 10 KV/m-seuil de sensations désagréables : 25 KV/m)

- Modification de l'électrocardiogramme (ECG) (champ magnétique statique) :

Des modifications de l'ECG ont pu être mises en évidence à partir de 0,1 T en expérimentation chez l'animal. Jusqu'à 2 T, ces modifications sont réversibles et n'entraînent pas de conséquence sanitaire.

- **Malaise (champ magnétique statique) :**

Cas d'exposition à un champ magnétique statique de très grande intensité (> 4 T), des malaises peuvent survenir : nausée, vertiges, gout métalliques, Perception de taches lumineuses.

➤ **Champs électromagnétiques basse fréquence (< 100 KHZ) :**

- **Effet dus aux courants induits :**

<b>Effet dus aux courants induits en fonction de leur densité</b>	
<b>Valeur efficace de la densité de courant induit (mA/m<sup>2</sup>)</b>	<b>Effets</b>
>1000	Fibrillation
100-1000	Stimulation des tissus excitables
10-100	Effets visuels et nerveux, soudure des os
<10	Pas d'effet connu sur la santé

- **Cancérogénicité:**

Sur la base de plusieurs études épidémiologique portant sur des groupes des enfants exposés à proximité d'une ligne haut tension et en évidence à un risque accru de leucémie chez l'enfant, le CIRC (centre international de Recherché sur le cancer, émanation de L'OMS) a classé les champs Électromagnétiques basse fréquence comme possiblement cancérogènes pour l'homme (catégories 2B), Cependant, il n'a pas été possible à ce jour d'établir un lien de causalité entre les expositions incriminée et l'apparition de Leucémies. Les études sont insuffisantes pour conclure définitivement sur le caractère Cancérogène ou nom des champs électromagnétiques basses fréquences.

- **Taches lumineuses :**

Il a été constaté chez des sujets soumis à un champ magnétique variable (autour d'une fréquence de 20 HZ et au-dessus d'un seuil d'insensé de 10 mT), un effet physiologique caractérisé par la perception visuelle de Taches lumineuses ; ce sont les magnétos phosphènes.

**II-5-2 Les effets indirects:**

Les champs électromagnétiques peuvent être à l'origine indirects susceptible de provoquer des dommages sur l'homme, d'être à l'origine d'un incident ou d'un accident, ou d'aggraver une situation de travail dangereuse. Les effets indirects pour toutes les gammes de fréquence sont les suivants:

- ❑ Déclenchement d'une explosion ou d'un incendie du fait d'un arc électrique.
- ❑ Dysfonctionnement de système comprenant de l'électronique.

Les effets indirects spécifiques aux basses fréquences sont dus aux courants de contact. Lorsqu'une personne et des objets métalliques se trouvant dans le champ rentrent en contact, les effets apparaissent à partir de certain seuil dépendant de leur fréquence.

<b>Seuils physiologiques correspondants aux effets des courants de contact</b>				
<b>Effet</b>	<b>Courant seuil (mA) à la fréquence</b>			
	50/60HZ	1 KHz	100KHz	1 MHz
Sensation tactile	0,2-0,4	0,4-0,8	25-40	25-40
Sensation douloureuse au contact avec le doigt	0,9-1,8	1,6-3,3	33-55	28-50
Choc douloureux/seuil de relaxation musculaire	8-16	12-24	112-224	Non determine
Choc sévère /difficulté à respirer	12-23	21-41	160-320	Non determine

Les effets indirects spécifiques aux champs magnétiques statiques sont dus au risqué de Projection d'objets ferromagnétiques : le phénomène de translation de matériaux dont le Comportement magnétique est similaire à celui de fer (cobalt, nickel, alliages contenant ces Métaux, etc.) fait que tout objet contenant de telles substances est mis en mouvement par les

Champs magnétiques statiques et peut être déplacé sur des distances importantes en fonction de l'intensité du champ.

### II-5-3 Les effets particuliers:

#### ➤ Effets sur les implants médicaux:

Il existe deux types d'implants : passives ou actifs :

#### a) Implants passifs :

- Inertes en plastique : pas d'interférences.
- Métalliques : broches, clous, plaques peuvent être aimantés ou déplacés.

Les implants passifs réalisés dans des matériaux ferromagnétiques sont sensibles aux champs magnétiques. Les conséquences de l'exposition peuvent être l'aimantation de l'implant, ou la sensation d'échauffement désagréable (par induction). Sous l'effet de champs magnétiques intenses, on pourrait constater son déplacement par attraction.

#### b) Implants actifs :

Stimulateur cardiaque, défibrillateur, stimulateurs neurologiques, Valves neurologiques, prothèses auditives, pompes à insuline, pour lesquels, outre les effets décrits ci-dessus, des dysfonctionnements électriques et/ ou électroniques sont possibles (déprogrammation, reprogrammation, arrêt, stimulation ou inhibition inapproprié). Ces situations posent le problème de l'interaction entre les champs mis en œuvre au poste de travail et les implants. Si un salarié portant un implant travaille à proximité d'une source importante, il convient d'y apporter une attention toute particulière.

#### ➤ Effets sur la grossesse :

A ce jour, aucun effet sanitaire lors de la grossesse n'a pu être mis en évidence chez la Femme exposée aux champs électromagnétiques. Cependant, les quelques études menées sur l'exposition du fœtus ne sont pas concluantes et doivent être poursuivies.

**II-5 -4 Limitation de l'exposition en considération des effets directs:****➤ Valeurs limites d'exposition (VLE) :**

Les valeurs limites sont basées sur les effets avérés. En basses fréquences (de 0 Hz à 10 MHz), afin d'éviter toute stimulation électrique du système nerveux central, la directive fixe une limite à la densité de courant induit dans l'organisme. Ces effets sont considérés comme instantanés : ils ne dépendent pas de la durée d'exposition. La limitation de la densité de courant induit donnée dans le tableau ci-dessous porte sur des valeurs instantanées.

<b>Prévention des effets sur le système nerveux central selon la fréquence</b>	
Domaine de fréquence	VLE: Valeur efficace de la densité de courant induit (dans la tête et le tronc) (Ma/m <sup>2</sup> )
< 1 Hz	40
1-4 Hz	40/f
4-1 000 Hz	10
1-100 KHz	f/100
100 KHz-10 MHz	f/100
10 MHz- 10 GHz	-

F: fréquence en Hz

**II-6 Champ électrique d'un axe chargé :**

Soit un cylindre de longueur infinie (conducteur métallique fin et très long) dont la charge linéique est  $q'$ , la permittivité du milieu environnant étant  $\varepsilon = \varepsilon_0 * \varepsilon_r$ . L'espace entourant conducteur est limité par un second cylindre coaxial de rayon infini et portant la charge  $-q'$ .

Pour trouver l'intensité du champ électrique en un point situé à la distance  $r$  de l'axe (figure 15), on fait passer par ce point une surface cylindrique de longueur  $\Delta x$  dont l'axe coïncide avec l'axe chargé.

On applique le théorème de Gauss qui exprime que le flux du vecteur  $D$  (vecteur

déplacement électrique) à travers une surface fermée qui renferme un volume  $V$  est égal à la somme des charges qui se trouvent à l'intérieur de ce volume. La surface fermée, dans la figure 15, est constituée par la surface du cylindre et par deux bases. La somme des charges situées à l'intérieur du cylindre est  $q' \Delta x$ .

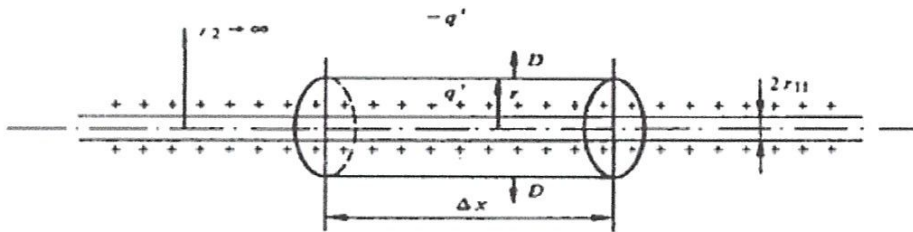


Figure 15: surface cylindrique entourant un axe chargé

Le flux du vecteur  $D$  ne traverse que la surface latérale car le champ électrique d'un axe chargé est radial ( $\vec{D} = \epsilon_0 \cdot \epsilon_r \cdot \vec{E}$ ), on obtient alors :

$$\oint D \cdot ds = q' \cdot \Delta x \quad (\text{II.1})$$

Or, l'intégral vaut  $2 \cdot \pi \cdot r \cdot \Delta x \cdot D(r)$  donc :

$$D(r) = \frac{q'}{2 \cdot \pi \cdot r} \quad (\text{II.2})$$

Ou encore :

$$E(r) = \frac{q'}{2 \pi \cdot \epsilon_0 \cdot \epsilon_r \cdot r} \quad (\text{II.3})$$

Pour connaître le potentiel scalaire par rapport au conducteur en un point quelconque situé à la distance  $r$  de l'axe, il faut intégrer de  $r_{11}$  à  $r$ , on trouve :

$$V(r) = - \int_{r_{11}}^r E \cdot dr = \frac{-q}{2 \pi \epsilon} \text{Ln} \frac{r}{r_{11}} \quad (\text{II.4})$$



### II-6-1 champ électrique d'une ligne au voisinage du sol (méthode des images) :

Soit un système de (n-1) conducteurs très longs soumis à des tensions électrique continues on à basse fréquence, on peut considérer que les n conducteurs sont chargés chacun par une charge linéique  $q_i$  (l'indice de la charge correspond au numéro du conducteur). Les (n-1) conducteurs Métalliques sont tendus parallèlement à la surface du sol.

Le n-ième conducteur est le sol, il est considéré comme un conducteur parfait et on peut le remplacer par les images  $-q_i$  des (n-1) conducteur (figure 16), sans modifier le champ au-dessus du sol.

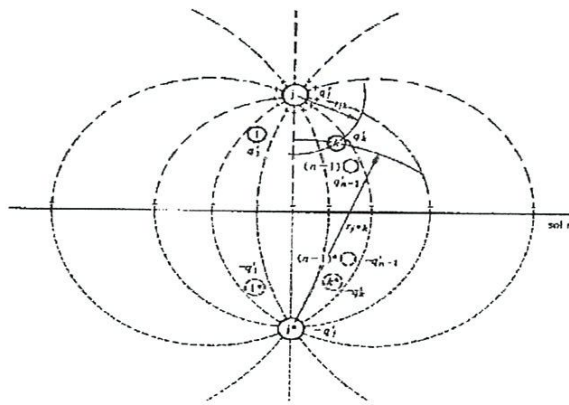


Figure16: coupe d'une ligne à n conducteur

### II-6-2 Champ électrique de deux axes parallèles dans l'air :

Soit une paire d'axes parallèles i et j de longueur infini (figure 17) et soit  $+q$  et  $-q$ , les charges linéiques de l'un et de l'autre, en un point p, la résultante de l'intensité du champ  $E_i$  est égale à la somme vectorielle des champs dus à chacune avec :

$$E^* = \frac{-q_j}{2 \varepsilon_0 \pi r_{jp}} \quad (\text{II.5})$$

Avec  $r_{pj}$  et  $r_{pj^*}$  sont les distances respectives du point P au conducteur j et au conducteur  $j^*$

Le potentiel (par rapport à une référence) est lié au champ électrique par la relation :

$$\vec{E} = -\text{grad } dv \quad (\text{II.6})$$

Dans le cas bidimensionnel, cette relation devient :

$$E = -\frac{\partial V}{\partial t} \tag{II.7}$$

Et le potentiel est déterminé par intégration :

$$V = -\int_{r_0}^{r_1} E dr \tag{II.8}$$

Où  $r_0$  localise la référence et  $r_1$  la localisation de la valeur du potentiel par rapport à la référence. Nous sommions les contributions de chaque charge.

Donc le potentiel du point P dû à la paire de charges  $+q_j$  Et  $-q_j$  Par rapport au plan médian Sera, en séparant les influences de  $+q_j$  Et  $-q_j$  :

$$V_p = -\int_{r_{jp}}^{r_j} \frac{q'_j}{\epsilon_0 2\pi r} dr - \int_{h_j}^{r_{j^*p}} \frac{-q'_j}{\epsilon_0 2\pi r^*} dr^* = \frac{q'_j}{2\pi\epsilon_0} Ln \frac{h_j}{r_{jp}} + \frac{q'_j}{2\pi\epsilon_0} Ln \frac{r_{j^*p}}{h_j} = \frac{q'_j}{2\pi\epsilon_0} Ln \frac{r_{j^*p}}{r_{jp}} \tag{II.9}$$

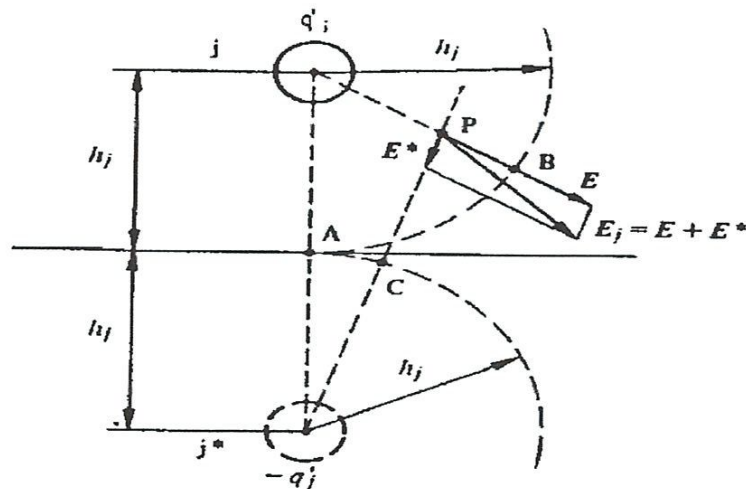


Figure 17 : champ électrique E, Dû à deux axes parallèles avec charges opposés.

Pour un ensemble de n-1 conducteurs, l'expression de la tension vaut :

$$U_{pn} = \frac{1}{2\pi\epsilon_0} \sum_{j=1}^{n-1} q'_j \operatorname{Ln} \frac{r_{j^*p}}{r_{jp}} \quad (\text{II.10})$$

Si le point P est placé sur le conducteur k, la formule (II.10) permet de calculer la tension entre le conducteur k et la terre :

$$U_{kn} = \frac{1}{2\pi\epsilon_0} \sum_{j=1}^{n-1} q'_j \operatorname{Ln} \frac{r_{j^*k}}{r_{jk}} \quad (\text{II.11})$$

Où  $r_{jk}$  et  $r_{j^*k}$  sont les distances entre l'axe géométrique du conducteur k, respectivement les axes du conducteur j et de son image  $j^*$ . Pour le terme  $j=k$ ,  $r_{k^*k}=2h_k$  représente la distance du conducteur par rapport au sol, tandis que  $r_{kk}$  est le rayon du conducteur k.

Si l'on pose :

$$U_{kj} = \frac{1}{2\pi\epsilon_0} \operatorname{Ln} \frac{r_{j^*p}}{r_{jk}} \quad (\text{II.12})$$

La tension  $U_{kn}$  s'écrit :

$$U_{kn} = \sum_{j=1}^{n-1} k_{kj} q_j \quad (\text{II.13})$$

Puisque :  $r_{j^*k} = r_{kj^*}$  et  $r_{jk} = r_{kj}$  on a  $k_{jk} = k_{kj}$

Les coefficients  $K_{jk}$  sont appelés coefficients de potentiel ou coefficients d'influence.

### II-7 Méthode de calcul analytique du champ électromagnétique :

Le champ électrique présent sous une ligne à haute tension est un sujet qui a long temps inquiété les foules. Bien qu'aucune enquête épidémiologique à long terme n'ait encore prouvé les méfaits des champs électriques, le législateur a déjà pris des mesures pour les limiter.

Actuellement, il n'existe pas encore de standard international reconnu concernant les limitations de l'émission de champ électrique, chaque pays ayant son propre règlement. Il est dépendent évident que dorénavant le champ électrique sera un critère de dimensionnement des lignes aériennes, et qu'il va prendre de plus en plus d'influence.

#### II-7-1 Calcul du champ électrique:

Le calcul du profil du champ électrique au niveau du sol est relativement aisé vu les développements que nous avons énoncés dans le chapitre précédent. Nous allons donc reprendre les deux équations suivantes :

$$[C]=[A]^{-1} \quad (\text{II.14})$$

Et

$$[Q]=[C][V] \quad (\text{II.15})$$

Connaissant les charges (linéiques) portées par les conducteurs, il est très aisé d'obtenir l'intensité du champ électrique en un point via le théorème de Gauss :

$$E_i = \frac{1}{n} \cdot \frac{Q_i}{2\pi\epsilon_0\rho} \quad \text{ou } i=1,2,3 \quad (\text{II.16})$$

Où:

$n$  = nombre de sous-conducteurs du faisceau ;

$r$  = rayon moyen du conducteur élémentaire du faisceau ;

$Q_i$  = la charge du conducteur  $i$  ;

$\epsilon_0 = 8,854 \cdot 10^{-12}$  F/m ;

$\rho$  = distance du point où se calcule le champ par rapport au conducteur ou à son image ET qui Porte la charge linéique  $Q$ .

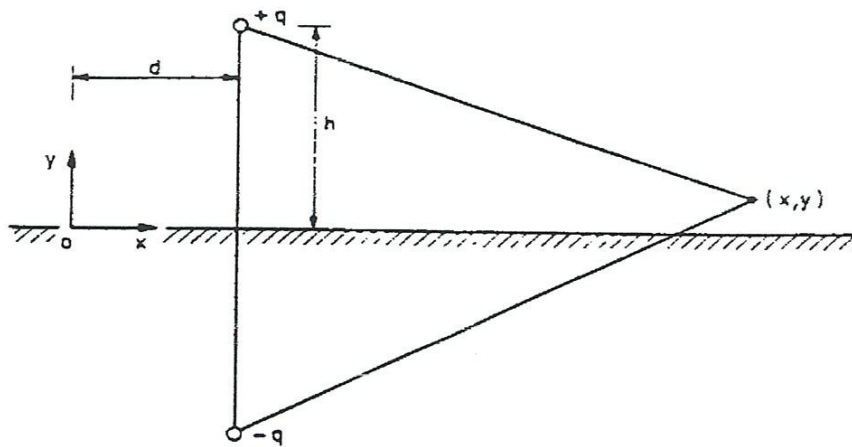


Figure 21: schéma utilisé pour le calcul du champ électrique

Développer les résultats dans le cas d'un conducteur (ou d'un faisceau) et de son image et considérons un plan perpendiculaire à la ligne (figure II.21) :

Les coordonnées du conducteur sont  $(d, h)$ , les coordonnées de son image sont  $(d, -h)$ .

Les composantes  $E_x$  et  $E_y$  de l'intensité du champ électrique en  $(x, y)$  s'expriment par

Dans l'hypothèse de calcul de l'intensité du champ électrique au niveau du sol ( $y=0$ ),

$E_x=0$ , et on a :

$$E_x = \frac{Q}{2\pi\epsilon_0} \cdot \left\{ \frac{x-d}{(x-d)^2 - (y-h)^2} - \frac{x-d}{(x-d)^2 + (y+h)^2} \right\} \quad (\text{II.17})$$

$$E_y = \frac{Q}{2\pi\epsilon_0} \cdot \left\{ \frac{y-d}{(x-d)^2 - (y-h)^2} - \frac{y+d}{(x-d)^2 + (y+h)^2} \right\} \quad (\text{II.18})$$

Dans l'hypothèse de calcul de l'intensité du champ électrique au niveau du sol ( $y=0$ ),  $E_x=0$  et On a :

$$E_y = \frac{Q}{2\pi\epsilon_0} \cdot \frac{h}{(x-d)^2 + h^2} \quad (\text{II.19})$$

Nous pouvons appliquer le théorème de superposition et obtenir le champ électrique total issu des trois champs électriques partiels générés par les conducteurs

$$E_{y\text{total}} = E_{y,1} + E_{y,2} + E_{y,3} \tag{II.20}$$

La Figure II.22 donne un exemple de profil de champ électrique sous une ligne

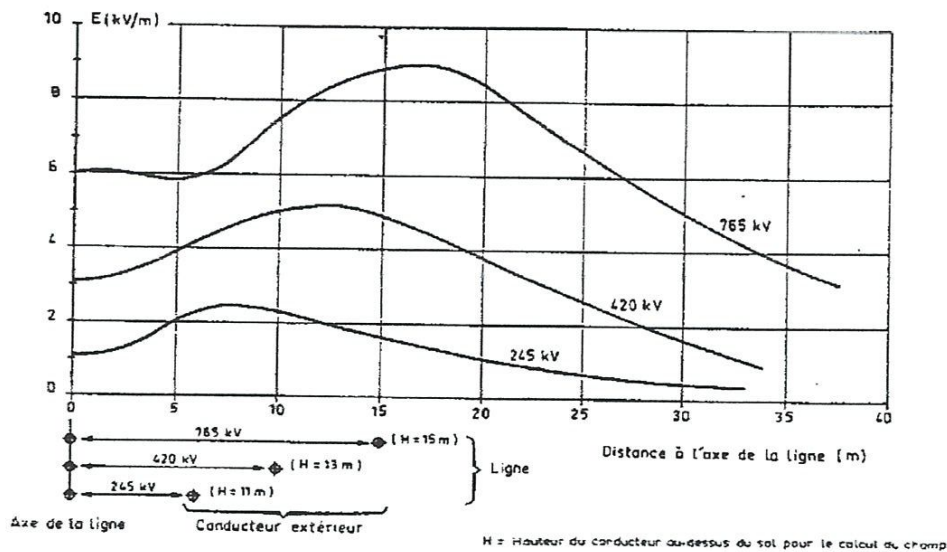


Figure 22: profil du champ électrique sous une ligne haute tension

### II-7-2 Calcul du champ magnétique :

Avant toute chose, nous devons faire l'hypothèse de quasi-staticité des champs électriques et Magnétiques, ce qui permet l'analyse indépendante, sans interaction, des champs magnétiques et électriques. La première loi fondamentale de la magnétostatique est la loi d'ampère :

$$\oint \vec{H} \cdot d\vec{l} = i \tag{II.21}$$

Nous allons l'appliquer dans le cas du fil long et rectiligne parcouru par un courant donné. Considérons un cercle, dans un plan perpendiculaire à l'axe du conducteur, centré sur celui-ci. Pour des raisons de symétrie, le champ magnétique  $H$  est constant tout au long du cercle. Si le rayon de celui-ci est  $r$ , le champ magnétique sera donné par :

$$H = \frac{i}{2 \cdot \pi \cdot r} \quad [\text{A/m}] \quad (\text{II.22})$$

Et la densité de flux magnétique (ou champ d'induction magnétique) par :

$$B = \frac{\mu \cdot i}{2 \cdot \pi \cdot r} \quad [\text{T}] \quad (\text{II.23})$$

Et  $B$  est dirigé tangentiellement aux cercles centrés sur le conducteur et est contenu dans le Plan perpendiculaire à celui-ci.

La question de l'image des conducteurs doit être considérée ici différemment que lors du calcul du champ électrique. Les images sont situées à une profondeur, dans le sol, bien plus grande que la hauteur des conducteurs de phase. En première approximation, la profondeur  $P$  vaut :

$$P = 660 \cdot \sqrt{\frac{\rho}{f}} \quad [\text{m}] \quad (\text{II.24})$$

Où :  $\rho$  et la résistivité du sol [ $\Omega \cdot m$ ] et  $f$  la fréquence [Hz].

# CHAPITRE III

## *Application*

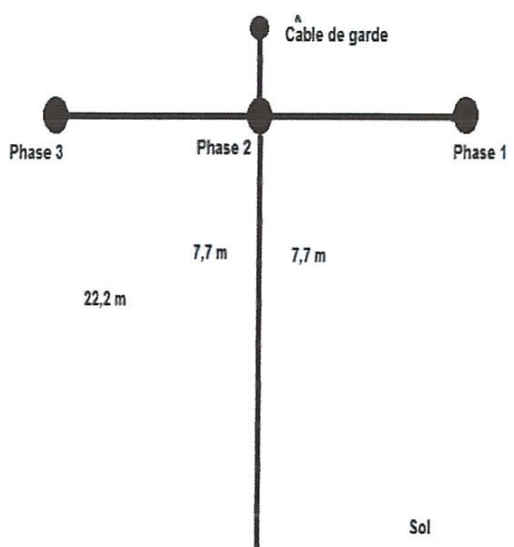


**Introduction :**

Dans ce chapitre nous présentons une modélisation avec la méthode analytique des champs électrique et magnétique produit par les électrique aériennes à haute tension. Notre application nécessite d'étudier analytiquement le comportement du champ électromagnétique au voisinage d'une ligne haute tension situé à Annaba (*LIGNE- POST EL HADJAR /ARCELOR MÉTAL*)

**III-1 caractéristique du modèle étudié :**

Le modèle étudié est une ligne haute tension de 220 KV (sans câbles de garde) en nappe :



*Figure 23 : Géométrie du modèle étudié*

Le tableau suivant présente les caractéristiques du modèle étudié.

LIGNE 220 KV: (L , S)=(2.40 km , 1x411 mm <sup>2</sup> )			
Numéro de support	Type de support	Distance entre phase (m)	Hauteur de phase /Sol(m)
N° :1	C+0	7.70	20.20
N° :2	C+0	7.70	20.20
N°:3	C+0	7.70	20.20

*TABLEAU I : les caractéristiques du modèle étudié*

**III-1-1 Calcul du champ magnétique :**

Le champ magnétique d'une ligne est engendré uniquement par le courant traversant les conducteurs de cette ligne. L'intensité du champ magnétique autour des conducteurs s'obtient donc, par l'application directe de la loi d'Ampère, puis par superposition des résultats partiels.

On peut utiliser la théorie des images des conducteurs en tenant compte de la profondeur de pénétration ; en effet les images sont situées à une profondeur, dans le sol, bien plus grande :

$$P = 660 \sqrt{\frac{\rho}{f}} \quad (\text{III.25})$$

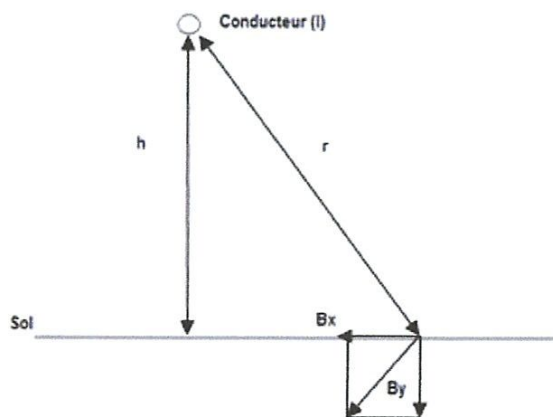
Où  $\rho$  : résistivité du sol en ohm /mètre.

$f$ : Fréquence en Hz.

Pour un conducteur seul Figure, sans son image, on peut appliquer directement la formule.

$$Br = \frac{\mu_0}{2\pi r} I \quad (\text{III.26})$$

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



Les composantes horizontales ( $B_x$ ) et verticales ( $B_y$ ) du champ magnétique ( $B$ ) sont données par:

$$B_x = \frac{\mu_0}{2\pi r} I \cos \theta \quad (\text{III.27})$$

$$B_y = -\frac{\mu_0 I}{2\pi r} \sin \theta \quad (\text{III.28})$$

Dans le calcul, on néglige les images des conducteurs au sol. Les composantes  $B_x$  et  $B_y$  du champ d'induction  $B$  engendré en milieu de portée d'une ligne, exprimées sous forme complexe :

$$B_x = a \cos(\omega t) + b \sin(\omega t) \quad (\text{III.29})$$

$$B_y = c \cos(\omega t) + d \sin(\omega t) \quad (\text{III.30})$$

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

$$B^2 = B_y^2 + B_x^2 = (a^2 + c^2)\cos^2\omega t + (b^2 + d^2)\sin^2\omega t + 2(ab + cd)\cos\omega t \sin\omega t$$

### III-1-2 Calcul du champ électrique :

Le calcul du champ électrique rayonné par une structure filaire aux basses fréquences est effectué en utilisant le concept des charges superficielles. La structure en utilisant le concept des charges électriques dues à sa tension par rapport au sol.

Ces charges vont rayonner un champ électrique  $E$  qui dépendra de leur quantité, de la topologie de la structure, et du point d'observation.

#### ➤ Calcul des charges superficielles :

Les charges superficielles sont déterminées en fonction de la tension et de la topologie de la structure, nous commençons par le calcul des coefficients de potentiel qui sont déterminés par la relation (38).

$$K_{ij} = \frac{1}{2\pi\epsilon_0} \ln \frac{D^{*ij}}{d_{ij}} \quad (\text{III.31})$$

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

$d_{ij}$ : Distance entre deux conducteurs réels.

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

$$[Q] = [K]^{-1}[V] \tag{III.32}$$

[K]: est les coefficients de potentiel propres et mutuelle de la structure.

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

[V]: vecteurs des tensions de chaque phase.

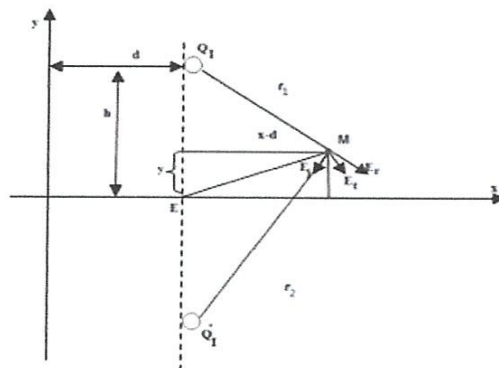
➤ **Modèle de calcul du champ électrique :**

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

$$E(r) = \frac{Q}{2\pi r} \tag{III.33}$$

Où E(r): le champ électrique, Q est la quantité de charge et r est la distance entre le segment et point d'observation. On considère un conducteur à une hauteur h au dessus de sol et son image à une profondeur h au dessous du sol Figure 24.

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



**Figure 24:** calcul du champ électrique (méthode des images)

On obtient:

➤ Composante horizontale:

$$E_x = \frac{q}{2\pi\epsilon_0} \left[ \frac{(x-d)}{(x-d)^2+(h-y)^2} - \frac{(x-d)}{(x-d)^2+(y+h)^2} \right] \tag{III.34}$$

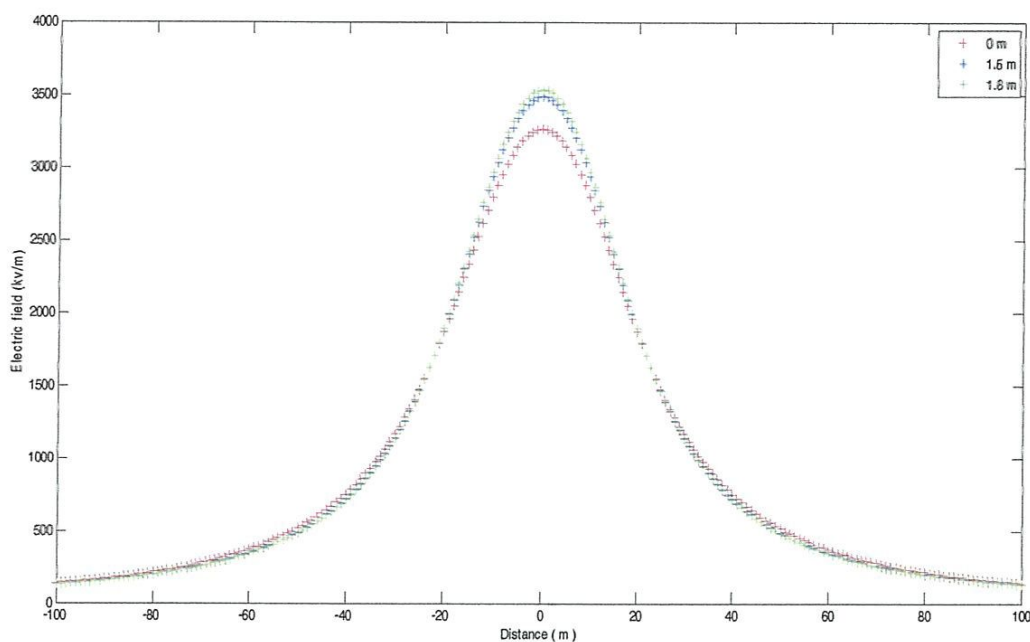
➤ Composante verticale:

$$E_y = \frac{q}{2\pi\epsilon_0} \left[ \frac{(h+y)}{(x-d)^2+(h-y)^2} - \frac{(y-h)}{(x-d)^2+(y+h)^2} \right] \tag{III.35}$$

### III-2 Résultat de calcul :

#### III-2-1 Profil du champ électrique :

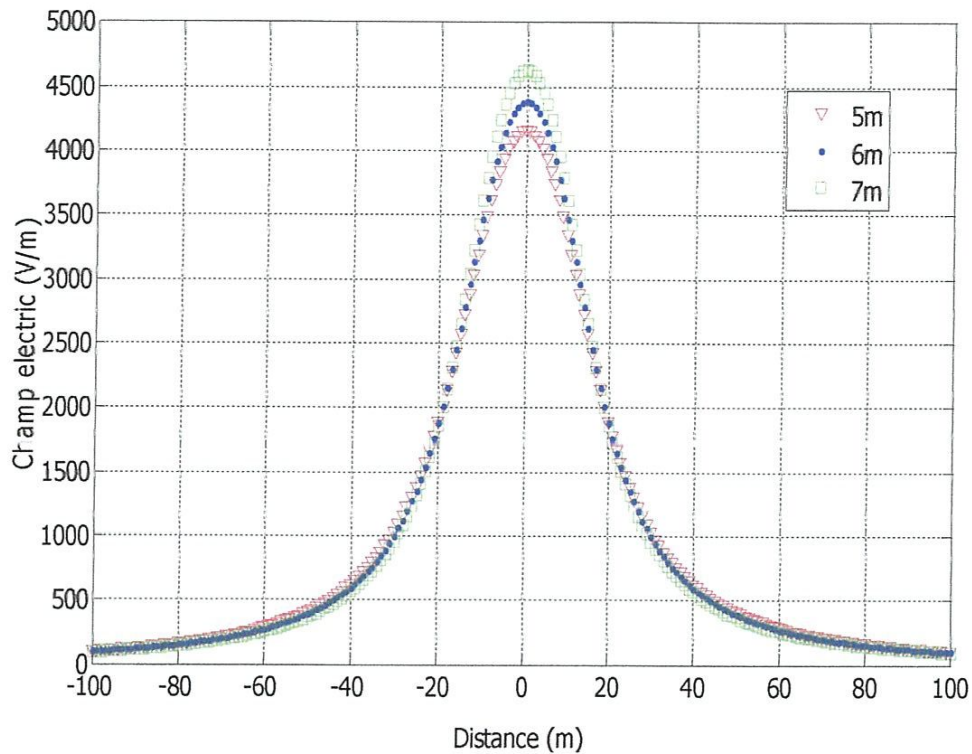
Les résultats de calcul du champ électrique sont représentés par les courbes des figures (25-28). La figure 25 représente le profil du champ électrique pour les hauteurs 0m, 1.5m et 1.8m du sol, qui représentent successivement l'exposition des points les plus sensibles du corps humain.



**Figure 25 :** Distribution du champ électrique pour les trois niveaux (0m, 1.5m, 1.8m).

D'après la Figure.25 on remarque que la valeur du champ électrique augmente au fur et à mesure qu'on s'approche du conducteur de la ligne et atteint sa valeur maximale (3500V/m) à 1.8 m sous la phase du milieu de la ligne en nappe. La distribution du champ diminue rapidement au fur et à mesure qu'on s'éloigne latéralement de la ligne.

Nous avons visé autre niveaux au dessus du sol, la figure 26 montre la distribution du champ électrique pour les niveaux entre 5 et 7 m.



*Figure 26 : profiles du champ électrique pour les niveaux entre (5m - 7m).*

Les valeurs du champ électrique augmentent de plus en plus et atteignent une valeur de 4700 V/m à 7m au niveau du sol.

Autre niveau au-dessus du sol ont été évalués.

La figure 27 et la figure 28 récapitulent les profils du champ électrique obtenus entre (10 et 12m) et entre (15 et 17 m) respectivement.

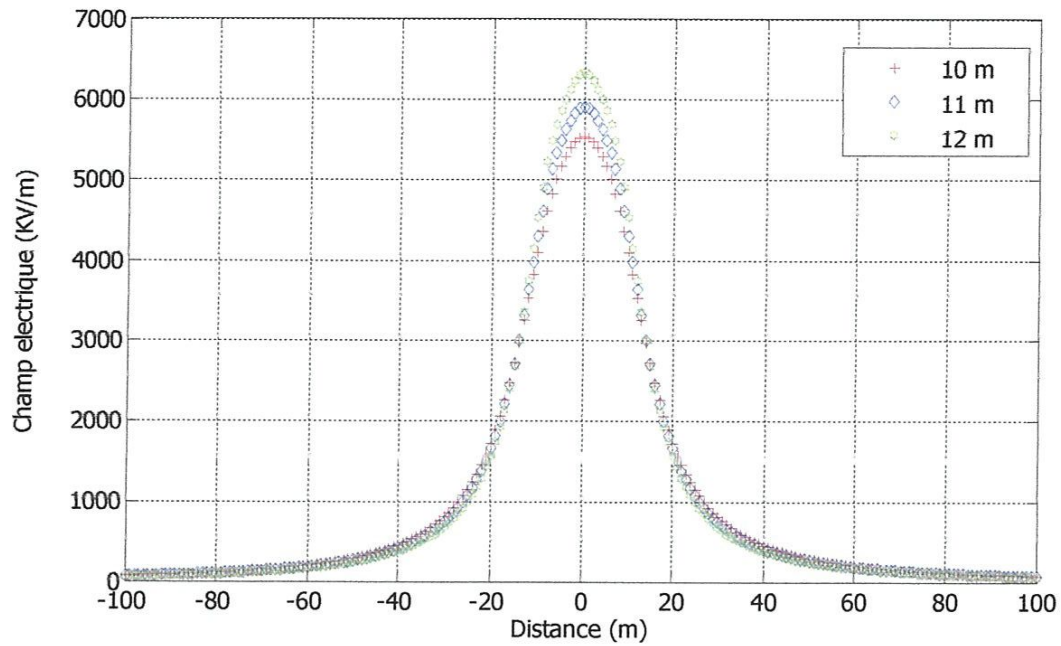


Figure 27 : Profiles du champ électrique pour niveaux entre (10m et 12m)

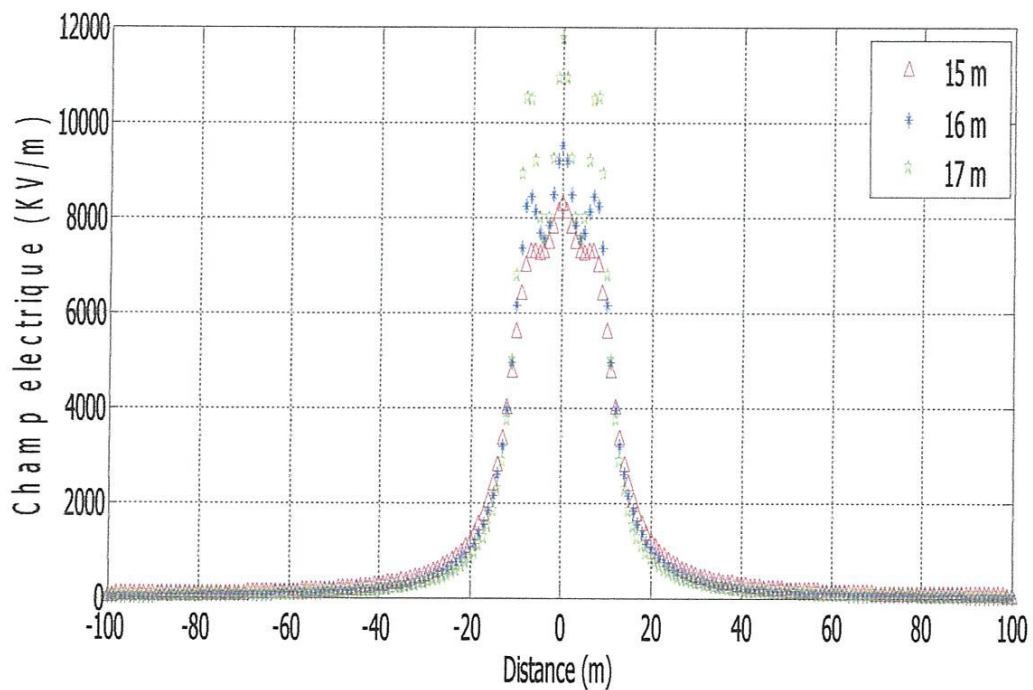


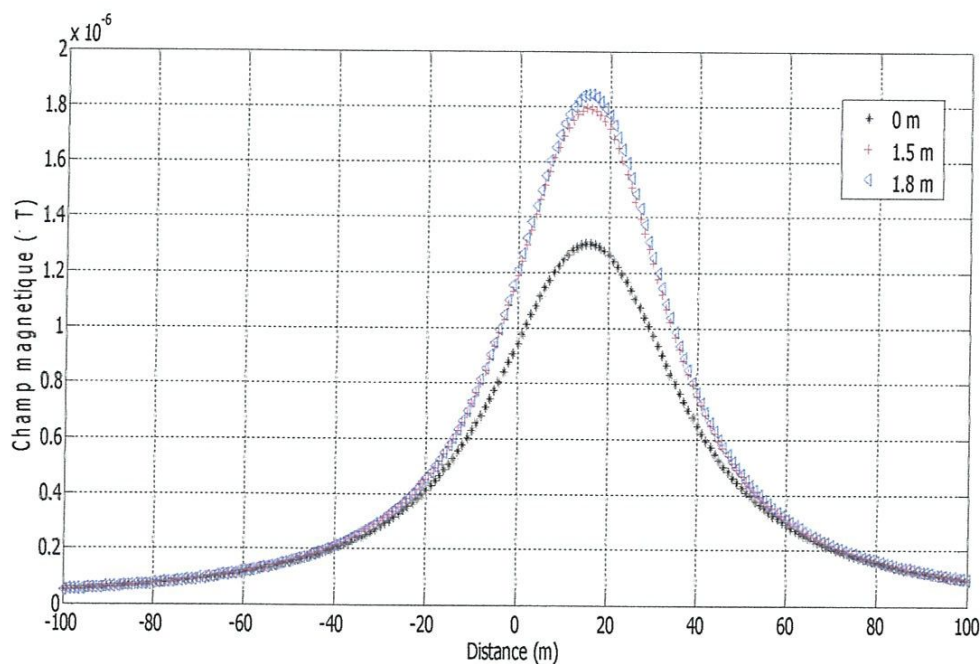
Figure 28 : Profiles du champ électrique pour niveaux entre (15m et 17m)

Les valeurs du champ électrique au voisinage du conducteur de la ligne sont très intense la valeur maximal (12000 V/m) a été enregistré a 17 m.

### III-2-2 Profile du champ magnétique:

La même stratégie de calcul a été utilisée pour évaluer le champ magnétique produit par cette ligne HT.

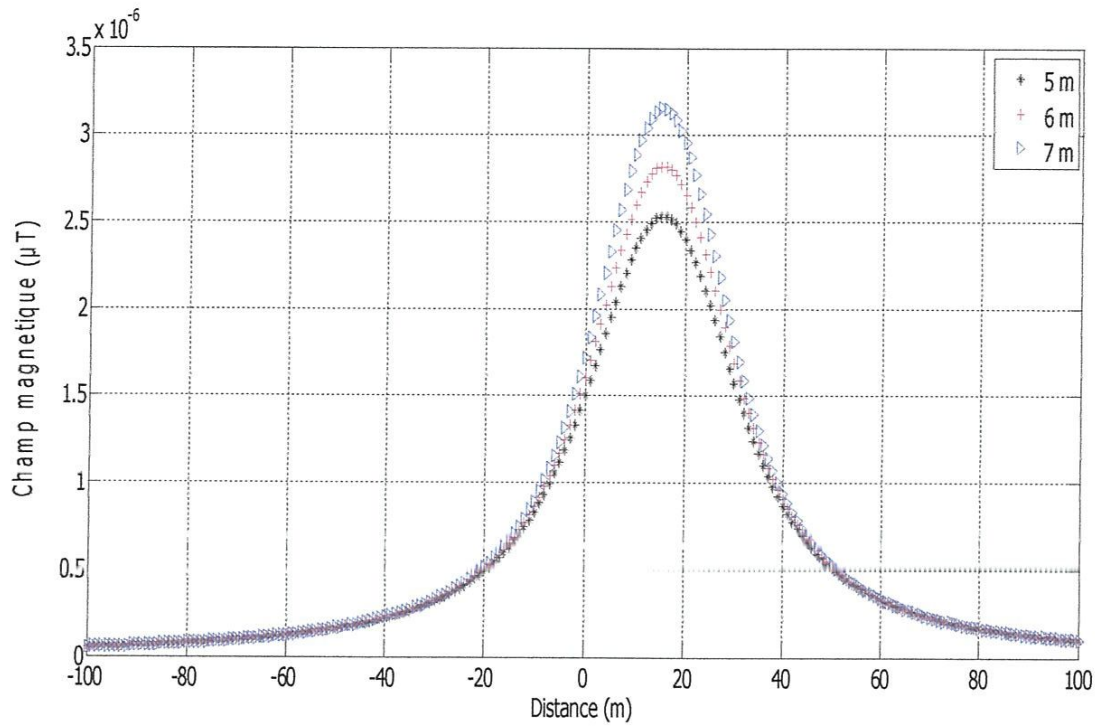
La figure 29 présente le profil du champ magnétique pour les trois niveaux (0m ,1.5m ,1.8 m)



*Figure 29 : Profils du champ magnétique pour les trois niveaux (0m, 1.5m, 1.8m)*

La valeur maximal du champ magnétique est 1.8  $\mu$ T obtenu a 1.8 m cette valeur est très petite par rapport aux limites établies par les organisations international (100  $\mu$ T pour l'exposition du publique).





**Figure 30** : Distribution du champ magnétique pour les trois niveaux (5m, 6m, 7m)

En voie que le champ magnétique augmente aussi dit qu'on s'approche du conducteur des lignes 2 valeur max à été obtenue à 7m (3,2  $\mu$ T).

Pour les autres niveaux nous avons obtenue les figures (31, 32 et 33) qui représente le profil du champ magnétique à proximité de la ligne pour les hauteurs de (10m -17m).

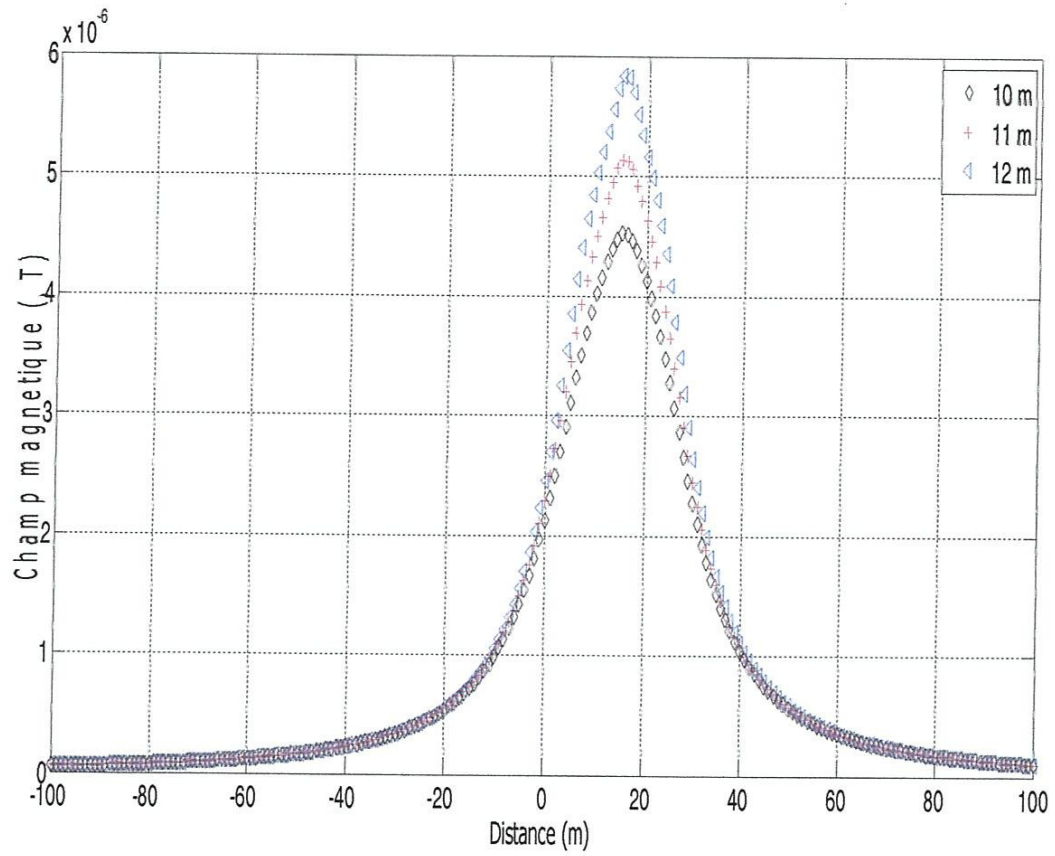
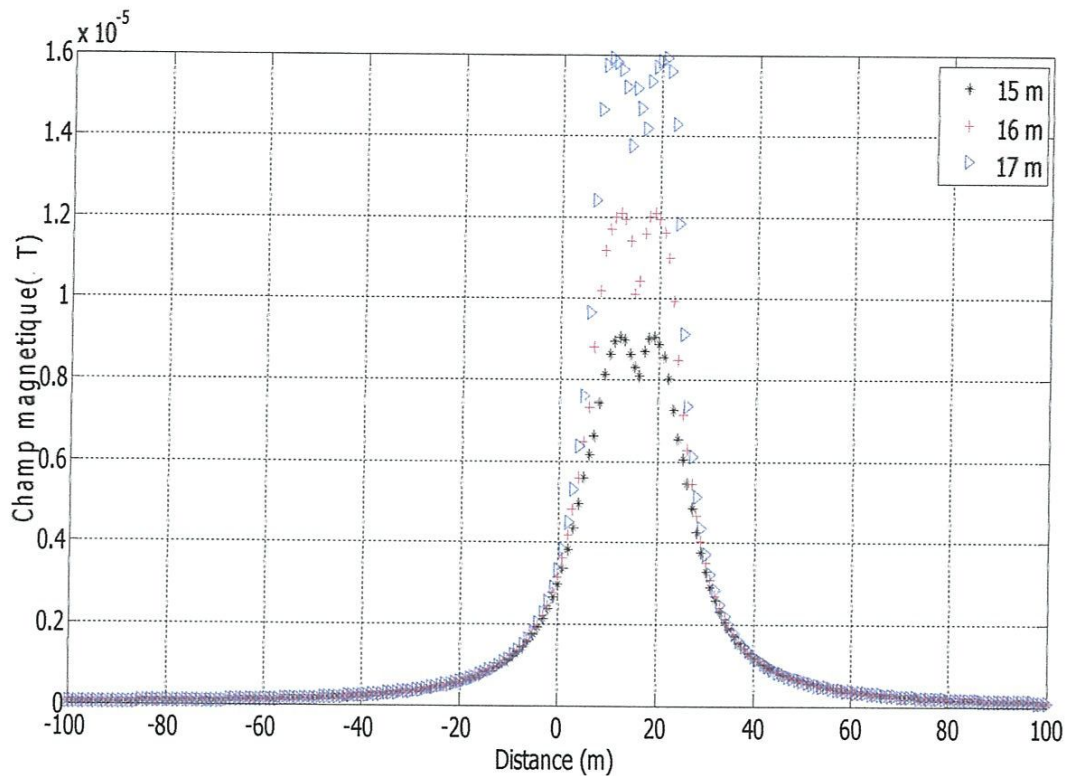


Figure 31 : Distribution du champ magnétique pour les trois niveaux (10m, 11m, 12m)



*Figure 32 : Distribution du champ magnétique pour les trois niveaux (15m, 16m, 17m)*

Dans ces figures on remarque que les champs magnétique même pour les hauts niveaux n'ont pas dépassé les limite admissibles dans notre cas la valeur du courant est 270A et automatiquement il sera modifier pour un autre régime de change se qui a pour effet de varier le champ magnétique, la valeur est (16  $\mu$ T) à 17m.

# **Conclusion générale**

## *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 plusieurs niveaux (0m, 1.5m, 1.8m) les plus sensibles du corps humains se sont bien inférieures aux limites établies par les normes internationales.

Le champ électrique généré par les lignes hautes 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 très attractive pour la minimisation des intensités des champs électromagnétiques et la réduction de leurs effets sur la santé humaine.

Les perturbations résultantes de l'interférence des champs générés par les lignes haute tension son facilement maitrisable par un bon choix du critère de dimensionnement des lignes dans l'étape de fondation du réseau électrique.

# Références



*REFERENCE*

[1] **BABOURI A** « Compatibilité électromagnétique des implants médicaux actifs

Contribution à la caractérisation de l'immunité des stimulateurs cardiaques aux perturbations électromagnétiques basses fréquences » Thèse de Master Université de Nancy : Nancy 1,2002

[2]**BABOURI A** « Compatibilité électromagnétique des implants médicaux actifs ; Evaluation théorique et expérimentale du comportement des stimulateurs cardiaques exposés à des perturbations électromagnétiques de basses fréquences » Thèse de doctorat, Université de Nancy : Nancy1, 2007.

[3]**A. Babouri, A. Hedjiedj, J.P Andretzko, L. Guendouz, M. Nadi.** "INFLUENCE OF LOW FREQUENCY ELECTROMAGNETIC FIELD ON PACEMAKER OPERATION "the 3<sup>rd</sup> European Conference on Biomedical Engineering, EMBEC05,November 20-25,IFMBE Proc. Vol.1 1(1), 2005,Prague, Czech Republic

[4] Memoire du fin d'étude:étude théorique expérimentale de l'environnement généré par les HT. juin 2012.

[5] Memoire du fin d'étude: Rayonnements électromagnétique.juin 2012.

[6] Chauvet F: compatibilité électromagnétique –technique de l'ingénierie,vol. E3, Fascicule D-1900.

[7] Travail de fin d'études: dimensionnement d'une junction triphasée.année académique 1997-1998.