

17/621.729

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 Technologie**
Filière : **Génie électrique**
Spécialité : **protection et contrôle des réseaux électriques**

**CALCULS ET ANALYSE DU CHAMP
ELECTROMAGNETIQUE APROXIMATE D'UNE LIGNE
ELECTRIQUE HAUTE TENSION**

Présenté par :
BRAHMIA ADILA
HARID AICHA



Sous la direction de Mr : LADJIMI ABDELAZIZ

JUIN 2012



REMERCIEMENTS



*A travers ce modeste travail, nous tenons à remercier vivement
notre promoteur <<Mr Ladjimi Abd El Aziz pour
l'intéressante documentation qu'il a mise a notre disposition,
pour ses conseils précieux et pour toutes les commodités et
aisances qu'il nous a apportées durant notre étude et
réalisation de ce projet.*

*Nos remerciements les plus vifs s'adressent aussi aux
messieurs le président et les membres de jury d'avoir accepté
d'examiner et d'évaluer notre travail.*

*Nous exprimons également notre gratitude a tous les
professeurs et enseignants qui ont collaboré a notre formation
depuis notre premier cycle d'étude jusqu'à la fin de notre cycle
universitaire.*

*Sans omettre bien sur de remercier profondément a tous ceux
qui ont contribué de près ou de loin a la réalisation du présent
travail*

SOMMAIRE

Introduction Générale	1
➤ Chapitre I : Généralité	
1 Introduction.....	3
1.1 Généralités.....	3
1.2 Les lignes électriques	4
1.2.1 Définition.....	4
1.2.2 Types de lignes.....	4
1.3 Les postes aériens	5
1.3.1 Définition.....	5
1.3.2 Différents types de postes aériens	5
1.3.2.1 postes à fonction d'interconnexion	6
1.3.2.2 les postes de transformation	6
1.3.2.3 les postes mixtes	7
1.4 La pollution électromagnétique	7
1.4.1 Objet de la compatibilité électromagnétique	7
1.4.2 Sources de perturbation électromagnétique	7
1.4.2.1 Classification.....	7
1.4.3 Pollution électromagnétique et réseaux de transport d'énergie.....	9
➤ Chapitre II	
2. Introduction	10
2.1 Rappels	10
2.1.a Schéma équivalent d'une ligne	10

2.2 Les réseaux symétriques	11
2.3 Etude des caractéristiques longitudinales	11
2.3.a Induction magnétique créée par un conducteur seul	12
2.3. b Géométrie du système à n conducteurs	12
2.3.c Flux embrassé par deux conducteurs dans un système à n conducteurs	14
2.3.d Tension induite entre deux conducteurs	15
2.4.a Caractéristiques transversales	18
2.4.b Champ électrique de deux axes parallèles dans l'air	18
2.4.d Matrice des coefficients de potentiel	21
Conclusion	24
➤ Chapitre III	
3. INTRODUCTION	25
3-1 Notions générales d'électromagnétisme.....	25
3.1.1 Définition	25
3.1.1.1 Champ électrique.....	25
3.1.1.2 Champ d'induction magnétique	26
3.1.2 Les équations de Maxwell	26
3.2 Calcul du champ électromagnétique.....	27
3.2.1 Champ électrique en basse fréquence	28
3.2.2 Champ magnétique	32
3.2.2.1 Calcul du champ magnétique	32
3.2.2.1.1 Calcul des courants dans un réseau	32

3.3 Calcul du champ électrique d'une ligne haute tension par la méthode des éléments finis..... 37

3.3.1 : Modèle électrostatique de Maxwell..... 37

3.3.1.1: La formulation éléments finis du problème éléments finis..... 38

3.3.1.2 Organigramme de traitement du problème magnéto-statiques.....39

➤ Chapitre VI

4. Applications 47

4.1 Champ électrique47

4.1.1 Intensité du champ d'induction magnétique 51

Conclusion..... 53

Introduction générale

Les influences du champ électromagnétique des lignes électriques aériennes sur l'environnement sont bien connues et analysées dans plusieurs travaux de spécialité, [1, 2]. Les méthodes comportent, en principal, de calcul analytique et expérimental, ainsi que de calcul numérique [3]. Un intérêt particulier présente les effets négatifs du champ électromagnétique engendré par les réseaux électriques à haute tension sur la santé humaine. Pour diminuer les effets négatives on minimise les valeurs du champ magnétique et électrique au voisinage des lignes par l'optimisation de leur structure [8, 9, 10]. A la recommandation du CIGRE [2] et du Conseil de l'Union Européenne, les valeurs de l'induction magnétique sont limitées à $100\mu\text{T}$ - pour l'exposition publique et de $500\mu\text{T}$ - pour l'exposition professionnelle. Dans ce travail on présente deux méthodes de calcul du champ électromagnétique d'une ligne haute tension : Le calcul analytique et la méthode des éléments finis. Les procédés s'appliquent aussi à des configurations complexes des lignes électriques voisines qui présentent un intérêt particulier.

Les valeurs déterminées par la méthode des éléments finis sont comparées, pour la même ligne, avec les valeurs déterminées par la méthode analytique (la connaissance de la répartition des charges superficielle pour le champ électrique et la loi de Biot et savart pour l'induction magnétique).

Le premier chapitre est consacré à la présentation des lignes et des postes aériens à une perf aperçu sur les méthodes de couplages électromagnétiques.

Introduction générale

Dans le deuxième chapitre nous détaillons les expressions analytiques permettant le calcul des matrices impédances $[z]$ et admittances $[Y]$ pour un système multifilaire.

Le troisième chapitre est consacré aux concepts théoriques qui sévront de base pour le calcul du champ électrique et magnétique à la fréquence industrielle au voisinage d'une ligne de transport d'énergie. Nous détaillons les deux expressions analytiques pour le calcul du champ électrique et magnétique. Ainsi nous développons les deux formulations électrique et magnétique (en potentiel scalaires v et le potentiel vecteur magnétique), en suite, nous présentons des algorithmes de calcul du champ électrique et magnétique d'une ligne haute tension, pour les modèles (analytique et numérique).

Dans le but d'étudier le champ électromagnétique en voisinage d'une ligne haute tension, nous déterminons le chapitre 4 l'évolution du champ électrique/magnétique en fonction de la configuration de la ligne, la distance entre phase, hauteur de la ligne, puissance de la ligne...

chapitre I

Généralité

1. Introduction

Ce chapitre intitulé généralités va nous permettre d'introduire et de présenter les différents éléments qui interviennent dans cette étude.

Nous commençons par décrire les lignes de transport d'énergie et les postes aériens ; nous présentons les différents types de postes.

Dans ce chapitre, nous citons brièvement les différentes sources de pollution, nous familiarisons le lecteur avec les notions de compatibilité électromagnétique (CEM) et les différents modes de couplage entre une onde électromagnétique et une antenne, qui peut représenter un équipement électrique de contrôle, de comptage, etc...

1.1 Généralités :

Les sources de production d'énergie électrique, particulièrement les centrales nucléaire ou hydraulique sont généralement éloignés des centres de consommation, c'est-à-dire des centres industriels et des villes. L'énergie est acheminée à distance par des liaisons électriques à grand flux qui remplissent une fonction de transport d'énergie.

Les utilisateurs, extrêmement nombreux, est bien évidemment répartis sur l'ensemble du territoire.

Pour réaliser la liaison des une avec les autres, il est nécessaire d'établir des connexions en lignes aériennes ou en canalisation souterraines. Ces liaisons sont raccordées entre elle à des nœuds appelés postes.

D'une manière générale, les réseaux sont ainsi constitués de ranches formés par des lignes de transport d'énergie et de nœud formés par les postes.

Les branches peuvent forme, suivant les cas, des antennes ou des mailles.il apparait alors qu'il n'est pas techniquement possible de confier à un type unique de

réseaux l'ensemble des fonctions complexes qui sont à assurer. Il convient de distinguer trois types de réseaux :

- ✓ Le réseau du grand transport et d'interconnexion.
- ✓ Les réseaux à caractère régional.
- ✓ Les réseaux de distribution.

1.2 Les lignes électriques :

Le transport de l'énergie électrique du producteur au consommateur se fait à l'aide de lignes électrique, qui constituent les artères d'un système d'énergie électrique.

1.2.1 Définition :

Une ligne électrique est un ensemble du conducteur, d'isolants et d'éléments accessoires destinés au transport de l'énergie électrique. Les conducteurs sont en général en aluminium, en cuivre, en aldreyl... etc. les isolants ont une partie solide (porcelaine, verre, papier, etc.) combinée avec un gaz (air, SF6) ou un liquide (huile).

1.2.2 Types de lignes :

Les lignes peuvent être classées suivant plusieurs critères :

- ✓ Situation dans l'espace : lignes aériennes, lignes souterraines (câbles).
- ✓ Classe de tension.
- ✓ Nature de la tension : continue, alternative monophasé ou triphasée.

Les lignes de transport d'énergie se répartissent en deux niveaux principaux de tension :

- ✓ La THT entre 220 à 800 Kv, ces lignes constituent le national dit grand transport et d'interconnexion (la THT est essentiellement de deux niveaux 220 et 400 Kv).

- ✓ La HT entre 45 et 160 K_v, ces lignes servent à la répartition d'énergie au niveau régional à partir des grandes postes THT (la HT est essentiellement de deux niveaux 63 et 90 K_v).

1.3 Les postes aériens :

1.3.1 Définition:

A la sortie des centrales de production, l'énergie électrique est à très haute tension afin de limiter les pertes par effet joule d'une part, et de satisfaire les demandes plus en plus importantes des quantités d'énergie d'autre part.

Pour transporter économiquement l'électricité, il est donc nécessaire d'élever sa tension puis de l'abaisser par plusieurs transformations successives, les transformateurs, qui constituent les organes de liaison entre réseaux et des tensions différentes, sont installés dans les postes qui comportent donc au moins deux jeux de barres à deux tensions différentes.

La partie centrale de poste est constituée par un ou plusieurs jeux de barres triphasés. Exploités à une tension déterminée et auxquels chaque branche est raccordée par l'intermédiaire d'un appareil de coupure qui permet de le séparer du réseau.

Le plus souvent ; un poste comporte un ou deux jeux de barres, un second jeu de barres se justifie non seulement parce qu'il permet une meilleure exploitation du réseau, mais aussi parce qu'il est pratiquement indispensable à sa de fonctionnement.

1.3.2 Différents types de postes aériens :

Les considérations suscitées conduisent à distinguer types de postes suivant les fonctions qu'ils assurent :

A chaque type de postes correspondent un schéma électrique et des dispositions constructives particulières.

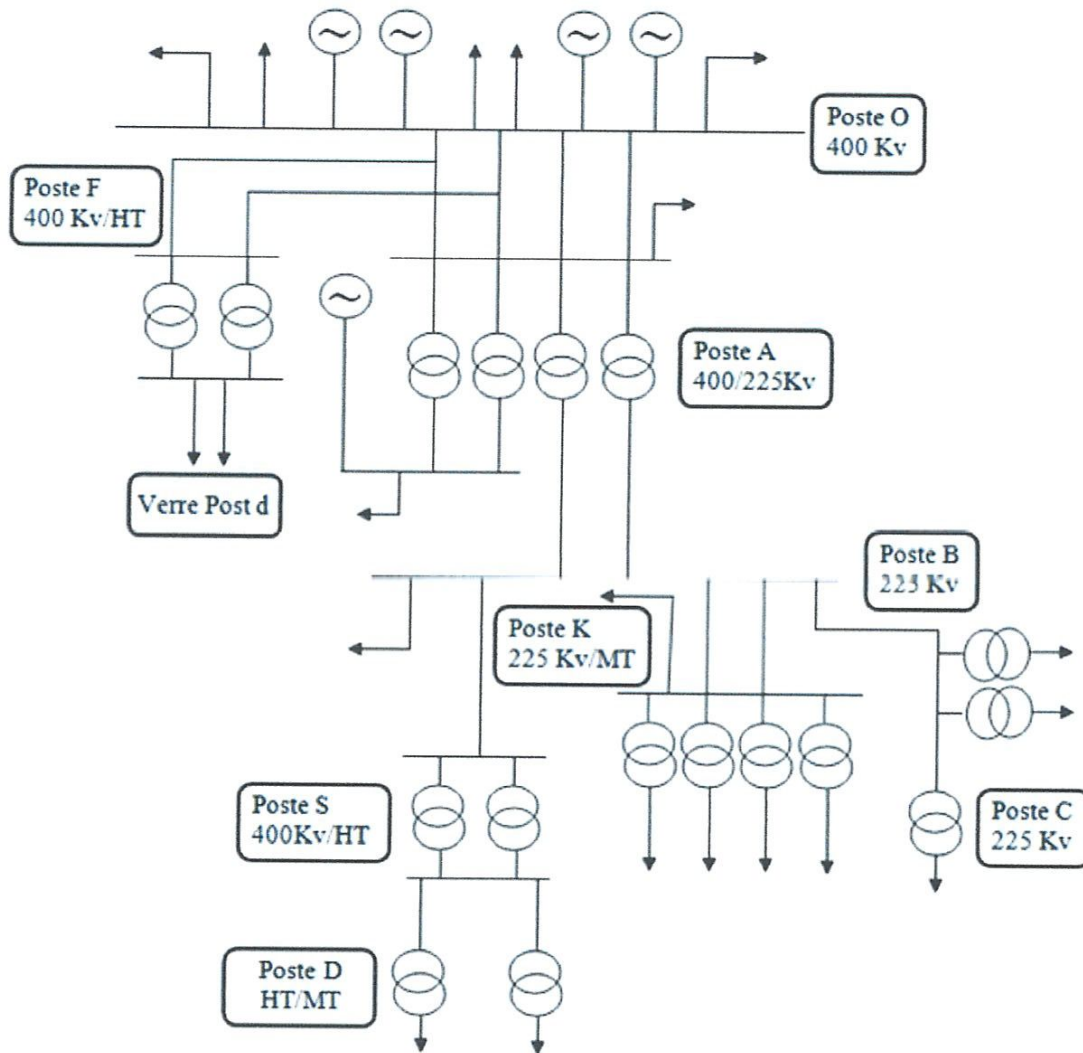


Figure I.1 : différents types des postes électrique

1.3.2.1 postes à fonction d'interconnexion :

Constituent les nœuds des réseaux nationaux (poste 0 dans la figure I.1), ces postes sont normalement composées de plusieurs jeux de barres la même tension (400 Kv, 220Kv), c'est généralement sur ces postes que sont raccordés les générateurs de grande puissances.

1.3.2.2 les postes de transformation :

Assurant, entre autre, l'alimentation des réseaux régionaux à 90Kv, 220Kv. Ces postes sont normalement comportent au moins deux jeux de barres à des tensions

différents liés par un ou plusieurs transformateurs de puissances (poste A dans la figure I.1).

1.3.2.3 les postes mixtes :

Assurant à la fois la fonction d'interconnexion et la fonction de transformation, ces postes très fréquents. (Poste B dans la figure I.1).

1.4 La pollution électromagnétique :

La compatibilité électromagnétique CEM est définie par le vocabulaire électrotechnique international comme l'aptitude 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.

Le réseau de transport d'énergie étant parmi les équipements susceptibles d'être perturbateur (émission à différentes fréquences) et perturbé (présence en sein de l'appareillage de contrôle et de commande du réseau).

1.4.1 Objet de la compatibilité électromagnétique :

A de rares exceptions près, les systèmes électriques ne travaillent pas de manière isolée de l'énergie électromagnétique.

L'énergie électromagnétique qui est captée non intentionnellement par un système électrique peut entraîner une perturbation dans le fonctionnement de celui-ci.

On dira qu'un système électrique et/ou électromagnétique compatible si, dans un environnement électromagnétique spécifié, il est apte à fonctionner de manière conforme à l'usage pour lequel il a été conçu et si pour les autres

systèmes électriques, il ne constitue pas une source de perturbation électromagnétique supérieure à la limite autorisée.

1.4.2 Sources de perturbation électromagnétique :

1.4.2.1 Classification :

On peut classer les sources de perturbation électromagnétique selon différents critères :

1- L'origine :

On peut distinguer deux grandes catégories de sources de perturbation Électromagnétique :

- ✓ les sources de perturbation d'origine naturelle
- ✓ les sources de perturbation qui proviennent de l'activité humaine.

Parmi les sources de perturbation d'origine naturelle, on peut citer : la foudre qui correspond à une décharge électrostatique (DES) entre nuages et entre nuages et terre.

Parmi les sources de perturbation qui découlent de l'activité humaine, on peut distinguer trois catégories :

- ✓ la première est constituée par des sources de rayonnement électromagnétique volontairement créées par l'homme (émetteurs radio...).
- ✓ la deuxième regroupe des sources de perturbation involontaires qui proviennent de l'utilisation de l'électricité (ligne de transport d'énergie,...).
- ✓ la troisième catégorie comprend les décharges électrostatiques (DES) qui impliquent des matériaux que l'homme a mis en mouvement.

2- Le contenu fréquentiel :

- ✓ les perturbations basses fréquences (BF).
- ✓ les perturbations moyennes fréquences (MF).
- ✓ les perturbations hautes fréquences (HF).

3- Le support de propagation :

- ✓ Les perturbations conduites par les conducteurs, qui sont caractérisées par leur courant et différences de potentiel.
- ✓ Les perturbations rayonnées dans l'air, qui sont caractérisées par leurs champs électrique et magnétique.

4- La nature temporelle :

- ✓ Les perturbations permanentes ou entretenues, qui brulent essentiellement les circuits analogiques.
- ✓ Les perturbations transitoires qui « plantent » les circuits numériques.

1.4.3 Pollution électromagnétique et réseaux de transport d'énergie :

L'environnement direct du réseau de transport d'énergie d'un poste est le siège de multiples sources d'interférences électromagnétiques. Ces sources peuvent être classées selon leur fréquence d'émission en trois groupes (BF, MF, HF).

1. Sources BF :

De nombreuses mesures ont montré l'existence de champs électromagnétique dans la bande basse fréquence. Ces champs principalement dus au rayonnement des lignes et des jeux de barres :

- ✓ rayonnement à proximité des lignes électrique (50Hz).
- ✓ rayonnement à proximité des jeux de barres, surtout en cas de déséquilibre de la charge (50Hz, et harmonique).
- ✓ rayonnement du au plan de masse, en cas défaut à la terre (composante homo polaire), (50Hz-KHz).

2. Sources MF :

Les champs rayonnés dans cette gamme de fréquence ont principales origines :

- ✓ Les commutations dans les ensembles électroniques de puissance présents dans le poste (centaines de KHz).
- ✓ Les signaux moyenne fréquences transmis, e, permanence ou occasionnellement, pour des besoins particulier (contrôle...) parmi ces signaux : les courants porteurs.
- ✓ L'effet couronne dans les sections conductrices du poste (ligne, jeux de barres...).

3. Sources HF

Les champs rayonnés dans cette gamme de fréquence sont dus aux transitoires dans le réseau de transport d'énergie, les principales sources en sont :

- ✓ Les ondes transitoires générées par les manœuvres (ouverture et fermeture des interrupteurs) internes.
- ✓ Les transitoires qui apparaissent lors de l'injection d'une onde de foudre

chapitre II

Calcul des paramètres linéiques
d'une
ligne de transport d'énergie

2. Introduction :

Comme nous verrons dans la troisième partie le calcul du champ électrique en basse fréquence nécessite la connaissance de la répartition des charges électriques, et le calcul du champ magnétique nécessite la connaissance de la répartition des courants, pour cet objectif le calcul des paramètres linéiques longitudinaux et transversaux est indispensable.

Dans ce travail nous allons étudier les caractéristiques longitudinales (les résistances des conducteurs et les inductances entre les conducteurs) et les caractéristiques transversales (la capacité des conducteurs) d'une ligne aérienne.

2.1 Rappels :

2.1.a Schéma équivalent d'une ligne :

Une ligne aérienne (de longueur inférieure à 100 km) peut se mettre sous la forme du schéma équivalent suivant :

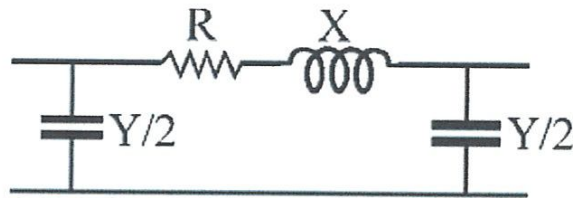


Figure 2.1 : schéma équivalent d'une ligne aérienne

❖ Le schéma est composé par :

- L'impédance effective longitudinale (composée de la résistance linéique R et de la réactance linéique $X = j.\omega.L$) :

$$Z_{\text{longitudinale}} = R + j.X \quad [\Omega/\text{m}] \dots \dots \dots (1)$$

- L'impédance effective transversale composée de la susceptance linéique :

$$Y = j.\omega.C \quad [\text{S}/\text{m}] \dots \dots \dots (2)$$

2.2 Les réseaux symétriques :

Tous les réseaux électriques peuvent être représentés par une matrice d'impédance Z telle que:

$$[U] = [Z][I] \quad [V] \dots \dots \dots (11)$$

Où \bar{U} est le vecteur de tension phase-neutre et \bar{I} le vecteur courant de phase.

Tous les réseaux équilibrés peuvent être découplés.

Si de plus la matrice d'impédance Z est de symétrie au moins circulante telle que:

$$\begin{pmatrix} U_1 \\ U_2 \\ U_3 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} Z_A & Z_B & Z_C \\ Z_C & Z_A & Z_B \\ Z_B & Z_C & Z_A \end{pmatrix} \begin{pmatrix} i_1 \\ i_2 \\ i_3 \end{pmatrix} \quad [V] \dots \dots \dots (12)$$

Où la matrice Z est de symétrie circulante.

Ce système peut se réduire à trois relations similaires mais déphasées de 120° . L'analyse du système total se réduit à l'étude d'une phase unique (gain de temps).

Si de plus la matrice d'impédance Z est de symétrie complète ($Z_B = Z_C$), le système se réduit à trois relations identiques et nous pouvons de nouveau analyser uniquement une phase.

2.3. Etude des caractéristiques longitudinales :

Pour rendre compte des effets produits par la résistivité des métaux qui constituent les conducteurs d'une ligne électrique, et par la résistivité du sol considéré comme n^{ème}-conducteur, on va introduire les notions de résistances linéiques R_1, R_2, \dots, R_n [Ω/m].

Pour rendre compte des effets des flux d'induction magnétique circulant autour et entre les conducteurs, voire à l'intérieur même de ceux-ci, on introduit les notions d'inductances linéiques propres et mutuelles (M_{ii}, M_{ij}) [H/m].

2.3.a Induction magnétique créée par un conducteur seul :

Le passage d'un courant électrique i , dans un conducteur cylindrique de longueur supposée infinie, crée un champ d'induction magnétique circulaire dont la composante tangentielle à l'extérieur du conducteur est donnée par le théorème d'Ampère :

$$B = \frac{\mu_0 \cdot i}{2 \cdot \pi \cdot r} \quad [T] \dots \dots (13)$$

La figure 1.3 représente $B = f(r)$ pour un conducteur plein, pour un courant continu $i = I$

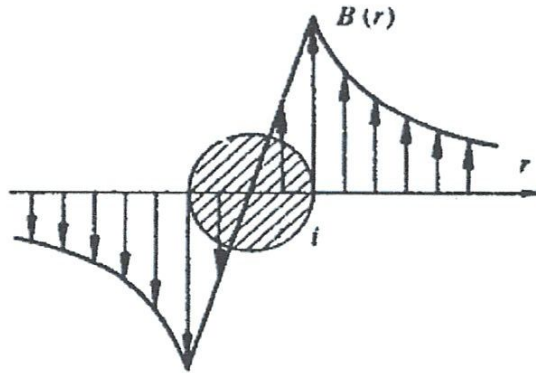


Fig 2.2 : composante tangentielle de B conducteur plein.

2.3. b Géométrie du système à n conducteurs :

Lorsqu'il y a plusieurs conducteurs, l'induction résultante est la somme des vecteurs d'inductions produits par chaque conducteur, pour autant qu'il n'y ait aucun corps saturable dans le voisinage.

²Soit un ensemble de n conducteurs cylindriques et creux parcourus par les courants i_1, i_2, \dots, i_n . Le sol est assimilé à un conducteur de propriété différente (l'indice n sera attribué à ce conducteur).

Remarque : on calculera en première approximation toutes les inductances propres et mutuelles linéiques comme si tous les conducteurs étaient creux, puis on ajoutera le supplément de l'inductance propre et le cas échéant, de l'inductance mutuelle correspondant aux conducteurs pleins. Dans ce cas, On a l'expression de ceux-ci corrigés

$$M_{ij,cor} = \dot{M}_{ij} + \frac{\mu_0 \cdot \mu_{rn} \cdot K_n}{8 \cdot \pi} \quad [H] \dots \dots (14)$$

Avec $\mu_0 = 4 \cdot \pi \cdot 10^{-7} \quad [H/m]$

$$\dot{M}_{ij,cor} = \dot{M}_{ij} + \frac{\mu_0 \cdot \mu_{ri} \cdot K_n}{8 \cdot \pi} + \frac{\mu_0 \cdot \mu_{rn} \cdot K_n}{8 \cdot \pi} \quad [H] \dots \dots (15)$$

Avec $\mu_{rn} = \mu_{ri} = 1 \quad [H/m]$, où μ_{ri} et μ_{rn} sont les perméabilités relatives du conducteur commun n et du conducteur i. Les facteurs k_n et k_i sont nuls si les conducteurs correspondants sont creux, ils prennent la valeur 1 s'ils sont pleins ou encore une valeur comprise entre 0 et 1 si le tube conducteur est non négligeable, ou lorsqu'on veut tenir compte de l'effet pelliculaire.

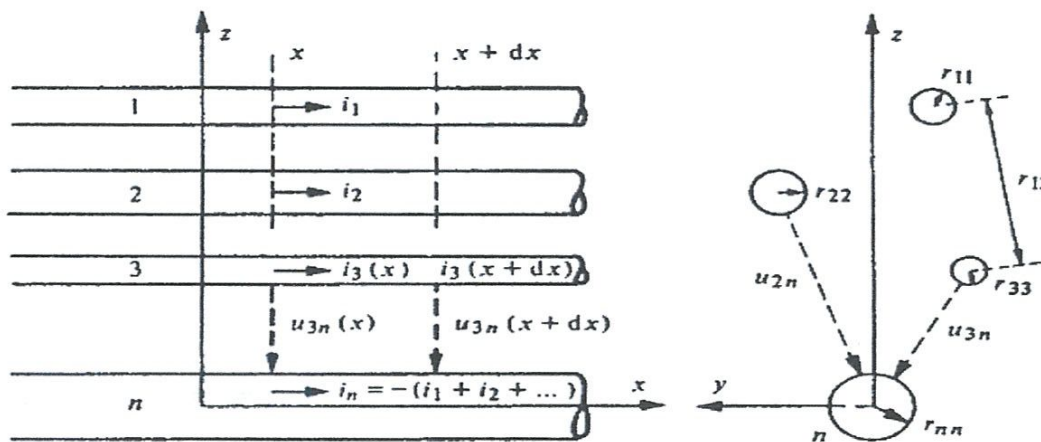


Figure 2.3 : Géométrie de n conducteur.

Nous définissons les grandeurs suivantes qui se rapportent à la figure 2.3. :

- $r_{ij} = r_{ji}$ la distance entre axes de conducteurs i et j.
- r_{ii} le rayon du conducteur i.

- ρ_i la résistivité du conducteur i .
- i_i le courant dans le conducteur i , compté positivement dans le sens des x croissant.
- u_{ij} la tension transverse entre le conducteur i et le conducteur j .

$$U_{ij} = \frac{\partial U_{ij}}{\partial x} L, \text{ accroissement linéique de la tension } U_{ij}$$

2.3.c Flux embrassé par deux conducteurs dans un système à n conducteurs.

Comme la somme des courants doit être nulle, on peut choisir l'un des conducteurs comme conducteur de retour (c'est le cas pour le sol qui sera considéré comme le conducteur n).

$$I_n = - (i_1 + i_2 + \dots + i_{n-1}) \quad [A] \dots \dots \dots (16)$$

On obtient de cette manière un ensemble de $(n-1)$ dispositions similaires formées par des paires de conducteurs 1 et n , et 2 et n , etc., $(n-1)$ et n . On peut donc se limiter à l'étude d'une seule paire formée par un conducteur d'allier et le conducteur de retour n , les phénomènes étant similaires pour les autres paires.

Par exemple pour la paire 3 et n (figure 1.5), le flux élémentaire $\Delta\phi_{3n}$ (provenant de chaque conducteur) embrassé par ces conducteurs sur la longueur Δx est :

$$\Delta\phi_{3n} = \Delta\phi_{3n,1} + \Delta\phi_{3n,2} + \Delta\phi_{3n,3} + \Delta\phi_{3n,n} \quad [wb] \dots \dots \dots (17)$$

Où $\Delta\phi_{3n}$ est le flux d'induction embrassé par un rectangle ABCDA dont les côtés AB et CD sont situés respectivement dans les conducteurs 3 et n à des endroits quelconques à l'intérieur de ces derniers.

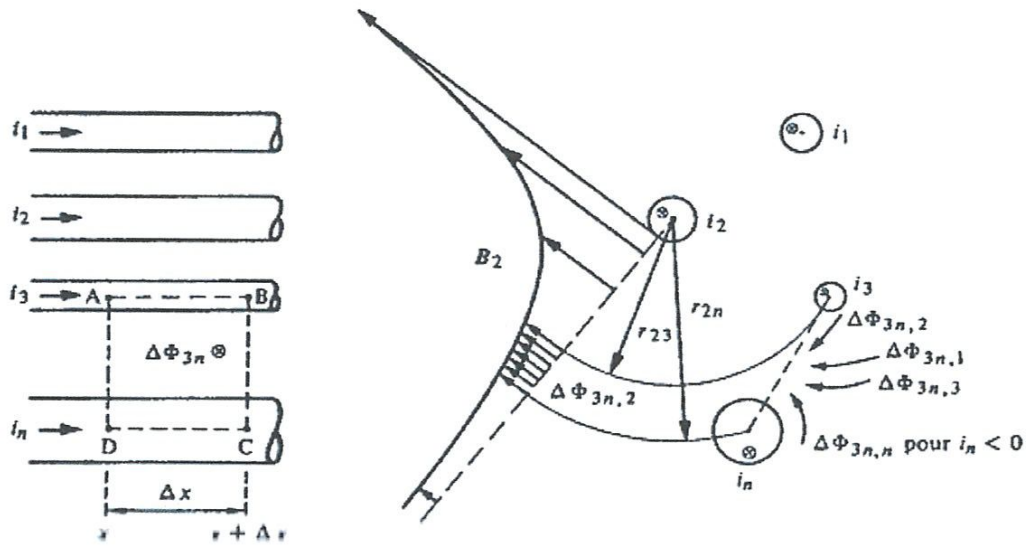


Figure 2.4 . flux élémentaire $\Delta\Phi_{3n}$ embrassé par les conducteurs 3 et n sur la longueur Δx .

La liaison entre le flux embrassé et l'induction est donnée par le théorème de Gauss :

$$\Phi = \int_S \vec{B} \cdot \vec{n} \cdot ds \quad [\text{wb}] \dots \dots \dots (18)$$

En précisant les limites d'intégration dans les expressions des $\Delta\Phi_{3nk}$, et en tenant compte de l'équation (1.16), nous trouvons :

$$\Delta\Phi_{3n,1} = \Delta x \int_{r_{13}}^{r_{1n}} \mu_0 \frac{i_1}{2\pi r} dr = \Delta x \frac{\mu_0}{2\pi} \ln \left(\frac{r_{1n}}{r_{13}} \right) \cdot i_1 \quad [\text{wb}] \dots \dots \dots (19)$$

$$\Delta\Phi_{3n,3} = \Delta x \int_{r_{33}}^{r_{3n}} \mu_0 \frac{i_3}{2\pi r} dr = \Delta x \frac{\mu_0}{2\pi} \ln \left(\frac{r_{3n}}{r_{33}} \right) \cdot i_3 \quad [\text{wb}] \dots \dots (20)$$

1.3.d Tension induite entre deux conducteurs :

Choisissons un contour ABCD qui passe à l'intérieur des conducteurs 3 et n et aux abscisses x et x+ Δx (figure 1.5). La tension induite par la variation du flux d'induction dans le contour ABCDA est égale à la dérivée du flux embrassé dû à tous les courants voisins, y compris le courant propre (loi de Lenz) :

$$\oint E \, dl = - \frac{d\Delta\phi_{3n}}{dt} \dots \dots \dots (21)$$

On peut exprimer ces deux grandeurs en remontant aux définitions de la figure 2.4.

Extension a un système triphasé équilibré :

Dans l'hypothèse d'un réseau triphasé parfaitement équilibré ($i_{kk} = \sum = 130, n=0$), nous avons :

Donc trois phases variant sinusoïdalement. La relation matricielle (1.23) devient:

$$\begin{bmatrix} -U'_{1n} \\ -U'_{1n} \\ -U'_{1n} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} (R'_1 + sM'_{11}) & sM'_{12} & sM'_{13} \\ sM'_{21} & (R'_2 + sM'_{22}) & sM'_{23} \\ sM'_{31} & sM'_{23} & (R'_3 + sM'_{33}) \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} I_1 \\ I_2 \\ I_3 \end{bmatrix} \dots \dots \dots (22)$$

Où $s = j\omega$, en tenant compte de l'hypothèse d'un réseau équilibré ($i_1 + i_2 + i_3 = 0$).

Nous avons donc :

$$\frac{\mu_0}{2\pi} \cdot \ln \frac{1}{r_{nn}} \cdot (i_1 + i_2 + i_3) = 0 \dots \dots \dots (23)$$

Ce qui nous amène aux nouvelles expressions des inductances linéiques :

$$\bar{M}_{ij} = \bar{M}_{ij} = \frac{\mu_0}{2\pi} \ln \frac{r_{jn} r_{in}}{r_{ij}} \dots \dots \dots (24)$$

$$\bar{M}_{ij} = \frac{\mu_0}{2\pi} \ln \frac{r_{in}^2}{r_{ji}} \dots \dots \dots (25)$$

Elles sont maintenant indépendantes du rayon du conducteur de retour r_{nn} .

Les relations (1.39) nous permettent de découpler la matrice (1.37) en trois sous systèmes :

$$-U' = (R'_1 + s(M_{11} + aM_{12} + a^2M_{13}))I \dots \dots \dots (26)$$

De même pour les autres phases mais déphasées de 120° .

Dans le cas particulier d'une matrice d'impédance à symétrie complète telle que

$M_{12} = M_{13} = M_{23} = M$, $M_{11} = M_{22} = M_{33} = L$, $R'_1 = R'_2 = R'_3 = R'$, nous obtenons :

$$\begin{bmatrix} -U' \\ -U' \\ -U' \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R' + s(L - M) & 0 & 0 \\ 0 & R' + s(L - M) & 0 \\ 0 & 0 & R' + s(L - M) \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} I \\ I \\ I \end{bmatrix} \dots \dots \dots (27)$$

Dans le cas d'une disposition non symétrique, nous pouvons effectuer une transposition telle que :

$$\text{L'inductance mutuelle équivalente } M = \sum_{\substack{j=1, j \neq 1 \\ j=1}}^3 \frac{M'_{ij}}{3} \dots \dots \dots (28)$$

$$\text{L'inductance propre équivalente } L = \sum_{j=1}^3 \frac{M'_{ii}}{3} \dots \dots \dots (29)$$

$$\text{La résistance équivalente } R = \sum_{j=1}^3 \frac{R'_j}{3} \dots \dots \dots (30)$$

De ces transformations, nous obtenons trois relations identiques. Au lieu d'analyser tout le système, nous pouvons étudier uniquement le comportement d'une phase

$$-U' = Z \cdot I = (R + j \cdot X) \cdot I \dots \dots \dots (31)$$

Où Z est l'impédance effective [Ω/m]

$X = \omega \cdot (L - M)$ la réactance effective [Ω/m]

R est la résistance linéique du conducteur [Ω/m]

L est la self inductance linéique [H/m]

M est l'inductance mutuelle linéique [H/m]

Ordres de grandeur

$$R = 3 \cdot 10^{-2} \quad [\Omega/\text{km}] \dots\dots (32)$$

$$X=0.3$$

2.4.4 Caractéristiques transversales :

Dans l'établissement des caractéristiques longitudinales, on s'est occupé des phénomènes liés aux courants dans les conducteurs et aux champs magnétiques que ces courants créent, ce qui a permis de définir les caractéristiques longitudinales linéiques R , L , M . Lorsqu'il n'y a pas de courant dans le sol (c'est le cas d'un réseau équilibré), on peut complètement ignorer la présence du sol, ce que l'on n'a pas le droit de faire pour l'étude des caractéristiques transversales.

Les caractéristiques transversales rendent compte des effets des charges superficielles des conducteurs de phase et du sol. Ces charges superficielles provoquent un champ électrique perpendiculaire à la surface des conducteurs qui engendre des courants capacitifs lorsqu'ils varient.

Les phénomènes capacitifs liant les charges superficielles du champ électrique transversal, donc aux tensions, sont représentés par des capacités linéiques C' .

Pour le calcul des capacités linéiques transversales, le fait qu'un conducteur soit creux ou plein ne joue plus aucun rôle puisque la charge se concentre à la périphérie (loi de Faraday).

2.4.4.1 Champ électrique de deux axes parallèles dans l'air :

Soit une paire d'axes parallèles j et j^* de longueur infinie (figure 1.8) et soit $+q_j$ et $-q_j$ les charges linéiques de l'un et de l'autre. En un point P , la

résultante de l'intensité du champ E_j est égale à la somme vectorielle des champs dus à chacune des charges avec :

$$E = \frac{q'_j}{2\varepsilon_0 \pi r_{jp}} \dots \dots \dots (33)$$

$$E^* = \frac{-q'_j}{2\varepsilon_0 \pi r_{j^*p}} \dots \dots \dots (34)$$

Avec r_{jp} et $r_{j^*p}^*$ 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 :

$$\vec{E} = -\text{grad}V \dots \dots (35)$$

Dans le cas bidimensionnel, cette relation devient :

$$V = -\frac{\partial v}{\partial r} \dots \dots \dots (36)$$

Et le potentiel est déterminé par intégration :

$$V = -\int_{r_0}^{r_1} E dr \dots \dots (37)$$

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 $-q'_j$:

$$V_p = \int_{r_{jp}}^{h_j} \frac{q'_j}{\varepsilon_0 2\pi r} dr - \int_{h_j}^{r_{j^*p}} \frac{-q'_j}{\varepsilon_0 2\pi r^*} dr^* = \frac{q'_j}{\varepsilon_0 2\pi} \ln \frac{h_j}{r_{jp}} + \frac{q'_j}{\varepsilon_0 2\pi} \ln \frac{r_{j^*p}}{h_j} = \frac{q'_j}{\varepsilon_0 2\pi} \ln \frac{r_{j^*p}}{r_{jp}}. \quad (38)$$

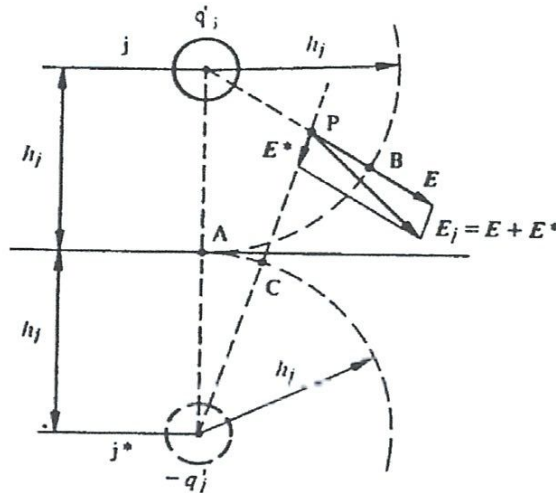


Figure 2.5 : champ électrique E, dû à deux axes parallèles avec charge opposée.

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

$$U_{pn} = \frac{1}{2\pi\varepsilon_0} \sum_{j=1}^{n-1} q'_j \ln \frac{r_{j^*p}}{r_{jp}} \dots \dots (39)$$

Si le point P est placé sur le conducteur k, la formule (1.57) permet de calculer la tension entre le conducteur k et la terre :

$$U_{kn} = \frac{1}{2\pi\varepsilon_0} \sum_{j=1}^{n-1} q'_j \ln \frac{r_{j^*k}}{r_{jk}} \dots \dots (40)$$

Où r_{jk} et r_{j^*k} sont les distances entre l'axe géométrique du conducteur k et 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.

La tension U_{kn} s'écrit

$$U_{kn} = \sum_{j=1}^{n-1} K_{kj} q'_j \dots \dots (41)$$

2.4.d Matrice des coefficients de potentiel :

À partir de (1.59), on peut obtenir un système d'équations qui permet de calculer les tensions $u_{1n} \dots u_{kn} \dots u_{(n-1)n}$ par rapport à la terre lorsqu'on connaît les charges linéiques $q'_1 \dots q'_j \dots q'_{n-1}$ des (n-1) conducteurs

On a donc :

$$\begin{bmatrix} u_{1n} \\ u_{2n} \\ \vdots \\ \vdots \\ u_{(n-1)n} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} K_{11} & K_{12} & \dots & \dots & K_{1(n-1)} \\ K_{21} & K_{22} & \dots & \dots & K_{2(n-1)} \\ \vdots & \vdots & \dots & \dots & \vdots \\ \vdots & \vdots & \dots & \dots & \vdots \\ K_{(n-1)1} & K_{(n-1)2} & \dots & \dots & K_{(n-1)(n-1)} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} q'_1 \\ q'_2 \\ \vdots \\ \vdots \\ q'_{n-1} \end{bmatrix} \quad (1.60)$$

Cette matrice K est symétrique.

En général on connaît plutôt les tensions que les charges linéiques, il est utile de résoudre le système d'équations (1.60) par rapport aux charges.

On peut alors écrire :

$$[q'] = [K]^{-1} \cdot [U] \dots \dots (43)$$

En posant $[C'] = [K]^{-1}$ on obtient en notation matricielle :

$$\begin{bmatrix} q'_1 \\ q'_2 \\ \vdots \\ \vdots \\ q'_{n-1} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} C'_{11} & C'_{12} & \dots & \dots & C'_{1(n-1)} \\ C'_{21} & C'_{22} & \dots & \dots & C'_{2(n-1)} \\ \vdots & \vdots & \dots & \dots & \vdots \\ \vdots & \vdots & \dots & \dots & \vdots \\ C'_{(n-1)1} & C'_{(n-1)2} & \dots & \dots & C'_{(n-1)(n-1)} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} u_{1n} \\ u_{2n} \\ \vdots \\ \vdots \\ u_{(n-1)n} \end{bmatrix} \quad (1.62)$$

La matrice C est une matrice symétrique appelée matrice des capacités linéiques nodales. Les coefficients C'_{ij} ont la dimension d'une capacité par unité de longueur [F/m].

$$C = (K)^{-1} = \frac{1}{\det(K)} A^T \quad [F/m] \dots \dots (45)$$

Où $\det(K)$ est le déterminant de la matrice K et $(A)^T$ la matrice transposée des cofacteurs (mineur avec signe) de la matrice K .

Extension aux systèmes triphasés équilibrés :

Dans l'hypothèse d'un réseau triphasé parfaitement équilibré, nous avons trois phases variant sinusoïdalement.

Puisque $u_{gn} = 0$, nous pouvons réduire cette matrice aux trois premiers accès telle que :

$$\begin{bmatrix} U_{1n} \\ U_{2n} \\ U_{3n} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} K'_{11} & K'_{12} & K'_{31} \\ K'_{12} & K'_{22} & K'_{32} \\ K'_{13} & K'_{23} & K'_{33} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} U_{1n} \\ U_{2n} \\ U_{3n} \end{bmatrix} \quad [V] \dots \dots (46)$$

Avec K'_{ij} sont les coefficients de la matrice K réduite aux trois accès.

Transformons cette matrice pour obtenir la matrice des capacités linéiques nodales :

$$C = K^{-1}$$

$$\begin{bmatrix} q'_1 \\ q'_2 \\ q'_3 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} C'_{11} & C'_{12} & C'_{13} \\ C'_{21} & C'_{22} & C'_{23} \\ C'_{31} & C'_{32} & C'_{33} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} U_{1n} \\ U_{2n} \\ U_{3n} \end{bmatrix} \quad [C/m] \dots \dots (47)$$

Le schéma équivalent de ce système se met sous la forme :

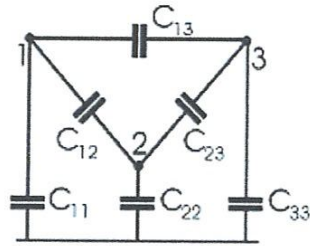


Figure 2.6: Schéma équivalent du système

Ce schéma triangulaire peut se ramener à une forme étoilée par la transformation triangle-étoile.

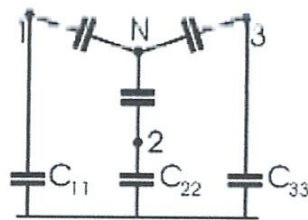


Figure 2.7 : schéma équivalent en étoile.

Le point N est au même potentiel que la terre.

Les valeurs de C_{N1} , C_{N2} et C_{N3} sont données par:

$$C_{N1} = C_{12} + C_{13} + C_{12} C_{13} / C_{23}$$

$$C_{N2} = C_{12} + C_{23} + C_{12} C_{23} / C_{13} \quad [F/m] \dots \dots \dots (48)$$

$$C_{N3} = C_{13} + C_{23} + C_{13} C_{23} / C_{21}$$

Nous arrivons au schéma équivalent final suivant :

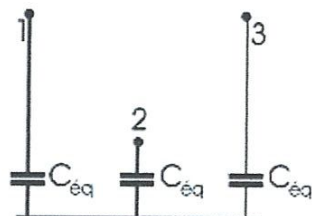


Figure 2.8 : schéma équivalent final.

Dans le cas particulier d'un système à symétrie complète, nous avons :

$$C_{11} = C_{22} = C_{33} = C_{eq} \text{ et } C_{12} = C_{13} = C_{32} = C_d$$

Nous obtenons alors :

$$C_{N1} = C_{N2} = C_{N3} = 3 \cdot C_d = C_N$$

Dans le cas d'un système non symétrique, nous devons transposer les termes de la matrice [K] tels que :

$$K_{\text{diagonal}} = \frac{1}{4} \sum_{i=1}^h K_{ii} \dots \dots \dots (49)$$

$$K_{\text{transfert}} = \frac{1}{6} = (K_{12} + K_{13} + K_{23} + K_{1g} + K_{2g} + K_{3g}) \dots \dots \dots (50)$$

De ces transformations, nous obtenons une matrice de symétrie.

De ces deux cas, le système se réduit à l'étude d'une seule phase. L'équation du système devient :

$$q' = (C_p + C_d) \cdot U = C \cdot U \quad [C/m] \dots \dots \dots (51)$$

Où C est la capacité linéique transversale [F/m]

$Y = j\omega C$ est l'impédance transversale [$\mu S/m$].

Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons exposé les différentes expressions permettant de calculer analytiquement les paramètres linéiques pour une ligne de transport d'énergie. Nous avons aussi introduit brièvement le schéma simplifié d'une ligne de transport que nous utilisons dans le programme de calcul de la répartition des puissances.

chapitre III

Calcul du champ électrique et magnétique en basse fréquence

3. INTRODUCTION :

Le champ électromagnétique présent sous une ligne à haute tension est un sujet qui longtemps inquiété les foules, bien qu'aucune enquête épidémiologique à long terme n'ait encore prouvé les méfaits des champs électromagnétiques, 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 cependant évident que dorénavant le champ électrique sera un critère de dimensionnement des lignes aérienne, et qu'il va prendre de plus en plus d'influence.

3-1 Notions générales d'électromagnétisme :

L'électromagnétisme considère les phénomènes électriques et magnétiques à un niveau macroscopique. Les forces électriques et magnétiques produits sur les particules chargées sont liées à l'existence de grandeurs vectorielles appelées respectivement champ électrique et champ d'induction magnétique.

3.1.1 Définition :

3.1.1.1 Champ électrique :

La notion de champ électrique a deux sens :

-au sens qualificatif. C'est la région de l'espace ou il existe un état électrique susceptible de se traduire par des forces.

-au sens quantitatif. C'est le vecteur ; dont la grandeur est égale au quotient de la force s'exerçant sur une quantité d'électricité par cette quantité et dont la direction est celle de la force.

$$E(r) = F(r)/q \quad (3.1)$$

3.1.1.2 Champ d'induction magnétique :

Le passage d'un courant électrique I , dans un conducteur cylindrique de longueur supposée infini, crée un champ d'induction magnétique dont la composante tangentielle à l'extérieure du conducteur est donner par :

$$B = \frac{\mu_0 I}{2\pi r} \quad (3.2)$$

Avec :

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

Les variations (dans le temps et dans l'espace) de ces deux grandeurs (E et, B) sont liées entre elles par les équations de Maxwell.

3.1.2 Les équations de Maxwell :

Tous les phénomènes de l'électromagnétisme sont décrits par les quatre équations de Maxwell locales. Ces équations aux dérivées partielles peuvent être séparées en équations de couplage électromagnétique (3.3) et (3.5) et de conservation (3.4) et (3.6). Ce sont :

○ Loi de Faraday $\text{Rot } \mathbf{E} = -\frac{\partial \mathbf{B}}{\partial t} \quad (3.3)$

○ Conservation du flux magnétique : $\text{div } \mathbf{B} = 0 \quad (3.4)$

○ Loi d'Ampère : $\text{Rot } \mathbf{H} = \mathbf{J} + \frac{\partial \mathbf{D}}{\partial t} \quad (3.5)$

○ Loi de Gauss électrique : $\text{div } \mathbf{D} = \rho \quad (3.6)$

\mathbf{E} est le champ électrique, \mathbf{H} le champ magnétique, \mathbf{B} l'induction magnétique, \mathbf{D} l'induction électrique et ρ la densité volumique des charges électriques libres.

Les champs vectoriels précédents ne sont pas indépendants les uns des autres, leur liaison est fonction du milieu où ils régent. Ainsi pour définir complètement le phénomène électromagnétique à l'intérieur d'un milieu isotrope et homogène, caractérisé au point de vue électromagnétique par une conductivité électrique σ , une permittivité électrique ε , on rajoute aux équations précédents les lois de comportement de ce milieu.

Loi d'ohm généralisé :
$$\mathbf{J} = \sigma(\mathbf{E} + \mathbf{v}_d \wedge \mathbf{B}) + \mathbf{J}_s \quad (3.7)$$

Où σ , conductivité électrique, v_d la vitesse de déplacement des charges, et J_s la densité de courant source.

Relation magnétique linéaire
$$B = \mu_0 M \quad (3.8)$$

Relation diélectrique linéaire :
$$D = \varepsilon_0 E \quad (3.9)$$

3.2 Calcul du champ électromagnétique :

En raison de la nature du site, et des divers couplages qui coexistent dans un même espace la prédiction des champs électromagnétique au voisinage ou à l'intérieur du réseau de transport d'énergie.

De ce fait seul une approche méthodique peut permettre de quantifier avec précision le champ au voisinage du réseau de transport d'énergie, l'approche que nous avons adoptée consiste à découper le réseau sous-ensemble de même nature parmi les sous-ensembles rayonnants :

- Les lignes électriques
- Les jeux de barres.

Cependant d'une façon générale, ce sont les lignes et les jeux de barres qui rayonnent le plus dans le réseau de transport d'énergie.

3.2.1 Champ électrique en basse fréquence :

a) Méthode analytique :

Le calcul du champ électrique rayonné par une structure filaire aux basses fréquences est effectué en utilisant deux méthodes :

a) le concept des charges superficielles.

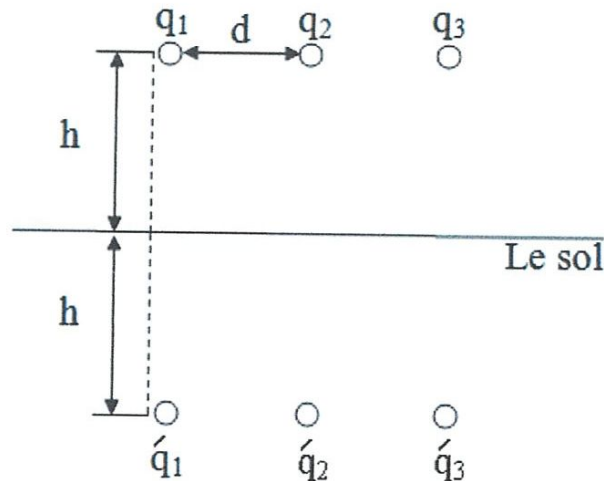
La structure en utilisant le concept des charges électriques dues à sa tension par rapport au sol.

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

a.1 Calcul des charges superficielles :

Les charges superficielles sont déterminées en fonction de la tension et de la topologie de la structure, nous commençons par le calcul des coefficients de potentiel qui sont déterminés par la relation (3.10).

$$K_{ij} = \frac{1}{2\pi\epsilon_0} \ln \frac{D^{*ij}}{d_{ij}} \dots \dots \dots (3.10)$$



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

$$[Q] = [K]^{-1}[V] \quad (3.11)$$

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

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

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

La nature du champ électrique émis, en base fréquence, par une ligne chargée est quasistatique. Le champ électrique créé par un conducteur cylindrique est donnée par :

$$E(r) = \frac{Q}{2\pi.r} \quad (3.12)$$

Ou :

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

On considère un conducteur à une hauteur h au dessus du sol et son image à une profondeur h au dessous du sol (fig 3.1). On utilise la méthode des images électrique pour calculer les composantes horizontale et verticale du champ électrique au point M de coordonnées (x,y) .

On obtient :

Composante horizontale :

$$E_x = \frac{q}{2\pi\epsilon_0} \left[\frac{(x-d)}{(x-d)^2+(h-y)^2} - \frac{(x-d)}{(x-d)^2+(h+y)^2} \right] \quad (3.13)$$

Composante verticale :

$$E_y = \frac{q}{2\pi\epsilon_0} \left[\frac{(h+y)}{(x-d)^2+(h-y)^2} - \frac{(y-h)}{(x-d)^2+(h+y)^2} \right] \quad (3.14)$$

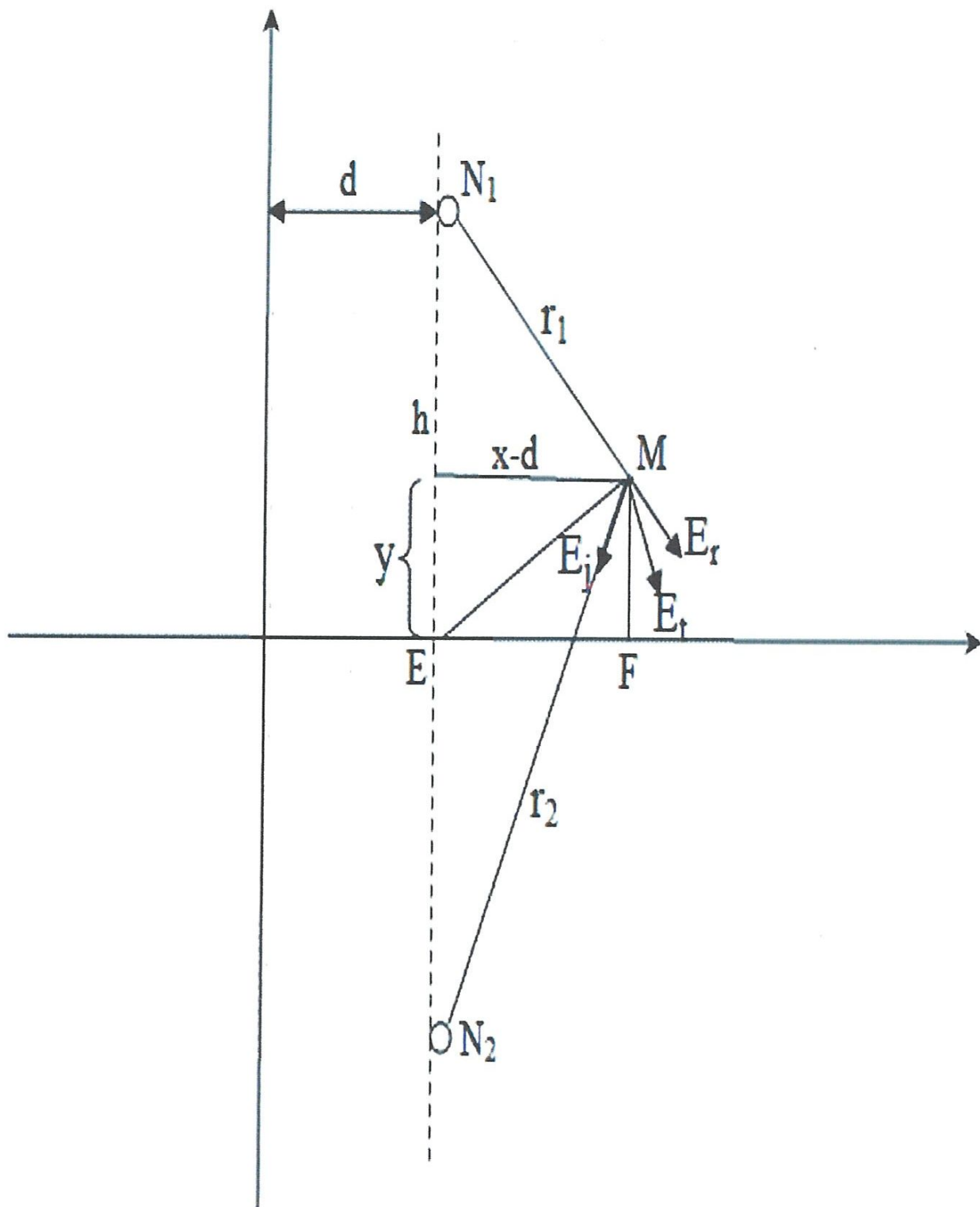


Figure 3. 1 : Schémas utilisés pour le calcul du champ électrique (méthode des images)

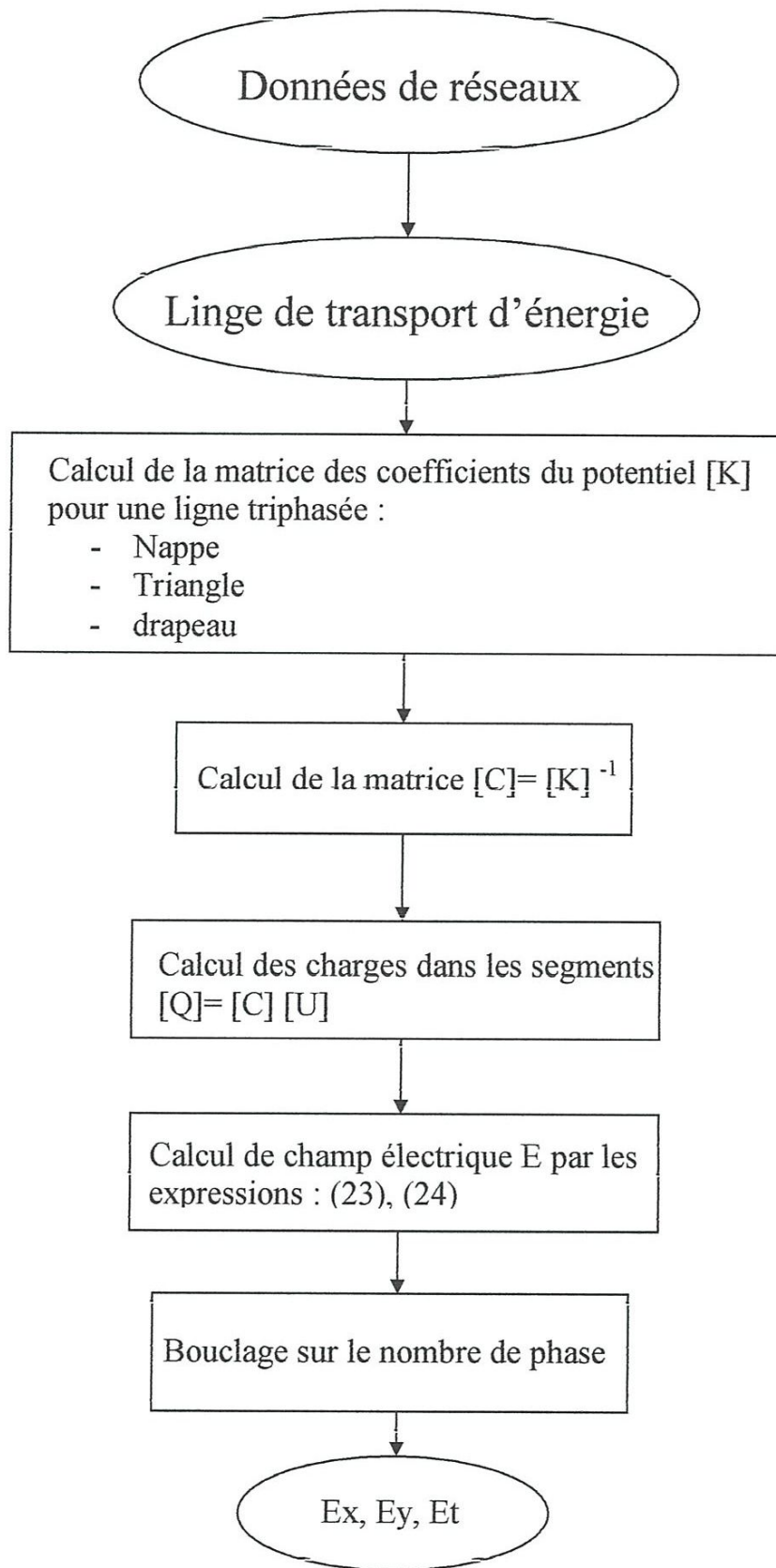


Fig : 3.2 : organigramme générale de calcul du champ électrique engendré par un réseau de transport d'énergie

3.2.2 Champ magnétique :

Compte tenu de la nature quasi statique du champ magnétique e, basse fréquence le champ magnétique est principalement du aux courants de la ligne.

3.2.2.1 Calcul du champ magnétique :

3.2.2.1.1 Calcul des courants dans un réseau :

Les courants dans les différents segments peuvent être calculés de trois façons différentes. Nous avons utilisée la théorie de la répartition de la puissance (load flow).

Les paramètres des structure filaires sont calculés en tenant compte de l'effet de peau dans les conducteurs et de différents couplage inductifs au capacitif entre les différents segments.

- **Méthode Analytique :**

En raison de la nature quasi-statique du comportement électromagnétique aux fréquences industrielles, le champ magnétique d'une ligne est engendré uniquement par le courant. 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 en compte de la profondeur de pénétration ; en effet les images sont situées à une profondeur, dans le sol, bien plus grand que la hauteur des conducteurs de phase. En première approximation, la profondeur P , vaut :

$$P = \sqrt{\frac{2}{\mu\omega\sigma_s}} \quad (3.15)$$

Pour un conducteur seul (Fig 3.13), sans son image, on peut appliquer directement la formule :

$$B(r) = \frac{\mu_0 I}{2\pi r} \quad (3.16)$$

Où I : est le conducteur qui traverse le conducteur

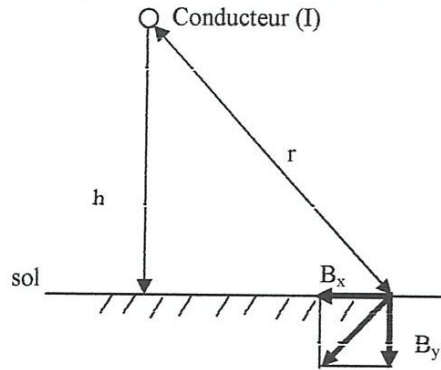


Fig 3. 3 . Schémas utilisés pour le calcul du champ magnétique

D'après la figure 3. 3, les composantes verticales (B_x) et horizontales (B_y) du champ d'induction B

$$B_x = \frac{\mu_0 I}{2\pi.r} \cos\theta \quad (3.17)$$

$$B_y = -\frac{\mu_0 I}{2\pi.r} \sin\theta \quad (3.18)$$

Contrairement au champ E ; l'induction B ne dégénère pas et est elliptique au niveau du sol. Dans le calcul, on néglige les images des conducteurs dans le sol. Soient B_x et B_y les composantes verticale et horizontale du champ d'induction B engendré en milieu de portée d'une ligne, exprimées sous forme complexe :

$$B_y = a \cos(\omega t) + b \sin(\omega t) \quad (3.17)$$

$$B_x = c \cos(\omega t) + d \sin(\omega t) \quad (3.18)$$

On peut voir immédiatement que si la condition $a.d = b.c$ est satisfaite , le vecteur-champ a une et une seule direction ,sinon il est elliptique ,nous allons donc déterminer le module et l'inclinaison du grand axe et du petit axe de l'ellipse(voir figure 3.4)

Le module du vecteur-champ s'exprime en fonction du temps a partir de (3.17 et

$$3.18) \text{ par : } M^2 = B_y^2 + B_x^2$$

$$= (a^2 + c^2) \cdot \cos^2 \omega t + (b^2 + d^2) \cdot \sin^2 \omega t + 2 \cdot (a \cdot b + c \cdot d) \cdot \cos \omega t \cdot \sin \omega t \quad (3.19)$$

Les extremums de M^2 seront obtenus en calculant :

$$\frac{dM^2}{d(\omega.t)}=0 \quad (3.20)$$

Soit :

$$2.[(b^2+d^2) - (a^2+c^2)].\sin\omega t. \cos\omega t + 2. (a. b + c. d). (\cos^2\omega t - \sin^2\omega t) = 0 \quad (3.21)$$

Divisant cette expression par $\cos^2(\omega t)$ et en posant $\text{tg}(\omega t)=\rho$ on obtient :

Avec :

$$\rho = \frac{k \pm \sqrt{k^2+4}}{2} \quad (3.22)$$

$$K = \frac{(b^2+d^2) - (a^2+c^2)}{(a.b+c.d)} \quad (3.23)$$

D'autre part :

$$\cos\omega t = \frac{1}{\sqrt{1+\rho^2}} \quad \sin\omega t = \frac{\rho}{\sqrt{1+\rho^2}} \quad (3.24)$$

les deux solution de ρ fournissent les deux inclinaisons α_1 et α_2 des deux axes, soit :

$$\text{tg } \alpha_1, \text{tg } \alpha_2 = \frac{a+b.\rho}{c+d.\rho} \quad (3.25)$$

avec :

$$\text{tg } \alpha_1 . \text{tg } \alpha_2 = -1 \quad (3.26)$$

ainsi que leurs modules :

$$B=M_1, M_2 = \sqrt{\frac{1}{1+\rho^2} [(a^2 + c^2).\rho^2 + (b^2+d^2) + 2.(a.b+c.d).\rho]} \quad (3.27)$$

C'est la valeur maximale de M_1 et M_2 qui nous intéresse et que nous garderons comme valeur de l'intensité du champ magnétique.

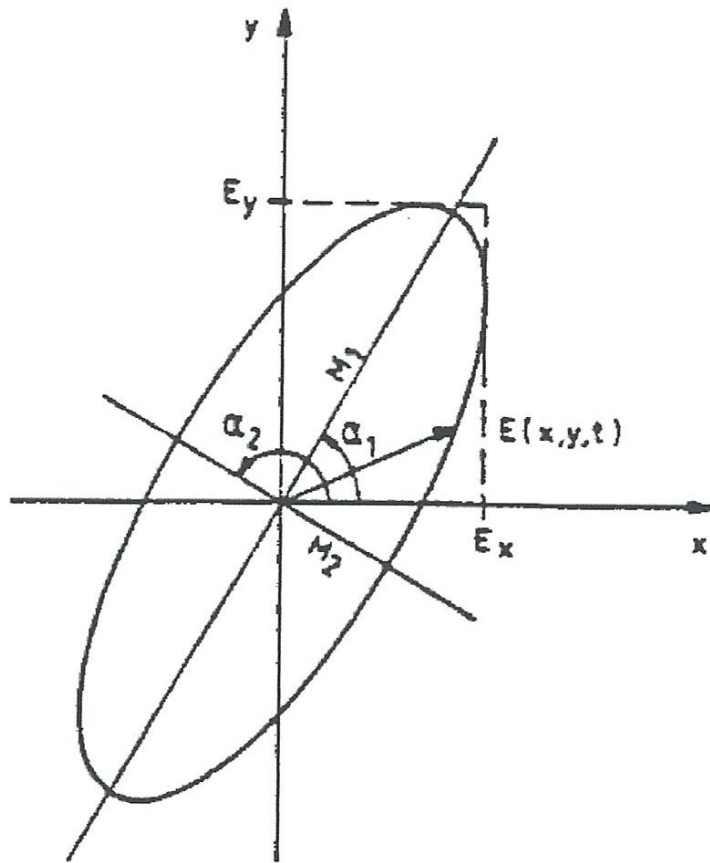


Figure 3.4 : représentation vectorielle d'un champ elliptique

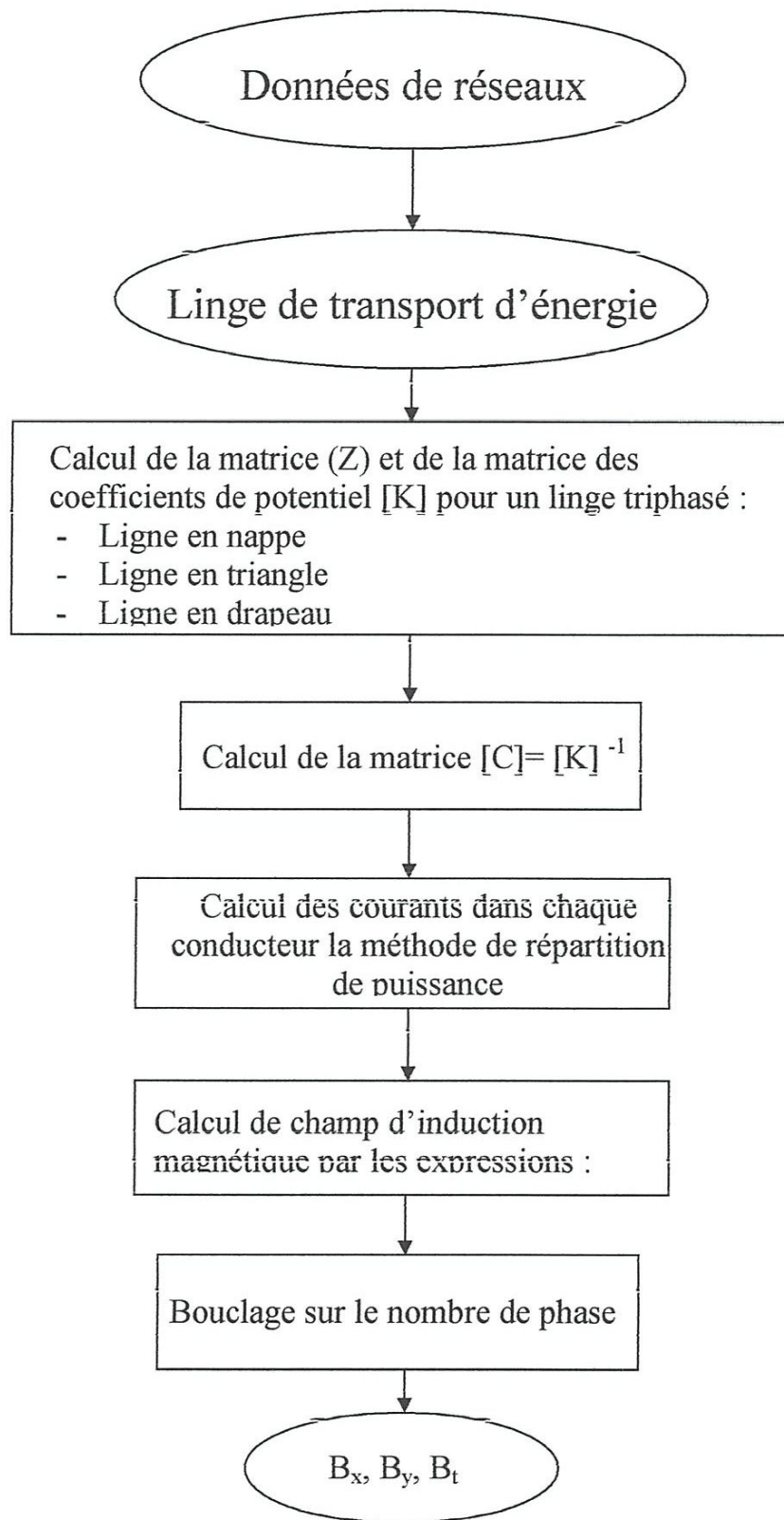


Fig 3.5: organigramme générale de calcul du champ d'induction magnétique créée par une ligne de transport d'énergie

3.3 Calcul du champ électrique d'une ligne haute tension par la méthode des éléments finis

3.3.1 : Modèle électrostatique de Maxwell

Il décrit tous les dispositifs dans lesquels le champ électrique est produit par des charges dont la répartition et la valeur ne varient pas en fonction du temps. La conception d'isolateurs et l'étude de la tenue des diélectriques sont les problèmes les plus caractéristiques. Les équations correspondantes s'écrivent :

$$\overline{rot} \vec{E} = 0 \text{ (car } -\frac{\partial B}{\partial t} = 0) \quad (3.19)$$

$$\text{div} \vec{D} = \rho \quad (3.20)$$

$$\vec{D} = \epsilon \vec{E} \quad (3.21)$$

La relation (3.19) permet de définir une fonction potentiel scalaire électrique V , ou tension électrique, telle que $\vec{E} = -\overline{grad} V$.

Le modèle se ramène alors à l'équation :

$$-\text{div} \left(\frac{1}{\epsilon} \overline{grad} V \right) = \rho \quad (3.22)$$

On peut dire que les techniques numériques actuelles apportent une solution à ce problème dans la plupart des cas. En effet, l'inconnue est le scalaire V , ce qui impose donc une seule valeur à calculer en chaque point.

De plus, on est assuré de l'existence et de l'unicité de la solution lorsque les conditions aux limites du problème à étudier s'expriment en fonction de V ou de sa dérivée normale $\partial V / \partial n$ aux limites du domaine étudié (ce qui est pratiquement toujours le cas). Généralement, le potentiel est supposé connu sur une limite (condition de Dirichlet) ou bien les lignes équipotentielles scalaires sont supposées orthogonales aux limites (ce qui est le cas sur des plans de symétrie ou au voisinage de matériaux totalement isolants) et la dérivée normale $\partial V / \partial n$ est nulle (condition de Neumann homogène). Enfin, il existe des études pour lesquelles on connaît la valeur du flux de l'induction électrique à travers une surface limite, sur laquelle on est alors en présence de la condition $\partial V / \partial n = K$ où K a une valeur connue (condition de Neumann non homogène). Si la permittivité ϵ peut être supposée constante, cela simplifie le problème. Mais il est tout à fait possible de traiter les cas où ϵ dépend du champ électrique lui-

même (l'équation devient *non linéaire* et la loi de variation de ε devra être fournie pour le matériau concerné). Le coût de la *résolution* est alors plus élevé, mais les problèmes techniques sont d'ores et déjà résolus [la méthode de Newton-Raphson, que nous expliciterons plus loin (§ 1.3.1), donne de très bons résultats dans ce cas]. Enfin, si un matériau est anisotrope, ε s'exprime sous la forme d'un tenseur et, là encore, on peut en tenir compte sans compliquer beaucoup les méthodes de résolutions mises en oeuvre. Seule, donc, une très grande complexité géométrique de la pièce à étudier peut mettre en défaut les méthodes classiques utilisées, mais cela n'intervient généralement que dans des pièces particulières aux formes tridimensionnelles compliquées ou dans lesquelles *l'effet de pointe* est très important.

3.3.1.1 : La formulation éléments finis du problème éléments finis

Les dispositifs étudiés s'adaptent à une modélisation en deux dimensions dans un système de coordonnées ou axisymétriques la résolution de ces systèmes par la méthode des éléments finis passe par la mise en équation de (3.22) sous forme d'équations aux dérivés partielles dans dans les deux systèmes de coordonnées.

Pour un problème électrostatique et dans un systèmes de coordonnées cartésiennes le champ électrique évoluent dans le plans (x,y), la relation (3.22) s'écrit :

$$-\frac{1}{\varepsilon} \left(\frac{\partial^2 V}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 V}{\partial y^2} \right) = \rho \quad (3.23)$$

En appliquant la méthode de Galerkin à cette équation on a :

$$\iint_{\Omega} \left[\omega_i \left(-\frac{\partial^2 V}{\partial x^2} - \frac{\partial^2 V}{\partial y^2} \right) \right] d\Omega = \iint_{\Omega} \omega_i \varepsilon \rho d\Omega ; \quad d\Omega = dx dy \quad (3.24)$$

Où, Ω est le domaine de résolution, ω_i les fonctions de projection. Cette expression est la forme forte de la formulation éléments finis. Mais l'intégration par partie des termes en dérivées seconde nous donne la forme faible de cette formulation. Cette dernière d'expliciter les conditions aux limites naturelles.

$$\iint_{\Omega} \left[\left(\frac{\partial \omega_i}{\partial x} \frac{\partial V}{\partial x} + \frac{\partial \omega_i}{\partial y} \frac{\partial V}{\partial y} \right) \right] d\Omega - \left[\int \omega_i \frac{\partial V}{\partial x} dx + \int \omega_i \frac{\partial V}{\partial y} dy \right] = \iint_{\Omega} \omega_i \varepsilon \rho d\Omega \quad (3.25)$$

La discrétisation de V sous la forme $V = \sum_j (\omega_j A_j)$ et l'introduction des conditions de Neumann homogènes nous permet d'écrire cette équation sous la forme :

$$\sum_j \left[\iint \left(\frac{\partial \omega_i}{\partial x} \frac{\partial \omega_j}{\partial x} + \frac{\partial \omega_i}{\partial x} \frac{\partial \omega_j}{\partial y} \right) d\Omega \right] V_j = \iint_{\Omega} \omega_i \varepsilon \rho d\Omega \quad (3.26)$$

Ceci nous conduit à la forme matricielle suivante :

$$[M]\{V\} = \{F\} \quad (3.27)$$

Tel que,

$$M_{ij} = \iint \left(\frac{\partial \omega_i}{\partial x} \frac{\partial \omega_j}{\partial x} + \frac{\partial \omega_i}{\partial x} \frac{\partial \omega_j}{\partial y} \right) d\Omega$$

$$F_i = \omega_i \varepsilon \rho d\Omega \quad (3.28)$$

Le maillage utilisé est un maillage triangulaire, et les fonctions d'interpolations sont de premier ordre.

$$\omega_i = (a_i + b_i x + c_i y) \quad i = 1, 2, 3 \quad (3.29)$$

$$\begin{cases} a_1 = \frac{(x_2 y_3 - x_3 y_2)}{2\Delta_l} \\ b_1 = \frac{(y_2 - y_3)}{2\Delta_l} \\ c_1 = (x_3 - x_2)/2\Delta_l \end{cases} \quad (3.30)$$

Où Δ_l est l'aire du triangle et les autres coefficients a_i, b_i, c_i sont obtenus par une permutation circulaire. On obtient alors :

$$M_{ij} = (b_i b_j + c_i c_j) \Delta_l \quad (3.31)$$

$$F_i = \frac{\Delta_l}{3} \rho \quad (3.32)$$

3.3.1.2 Organigramme de traitement du problème magnéto-statiques :

La méthode des éléments finis permet de résoudre les équations de Maxwell dans des conditions très générales. Ainsi, on est amené à résoudre des systèmes d'équations linéaires, suivant l'organigramme de la figure (3.6).

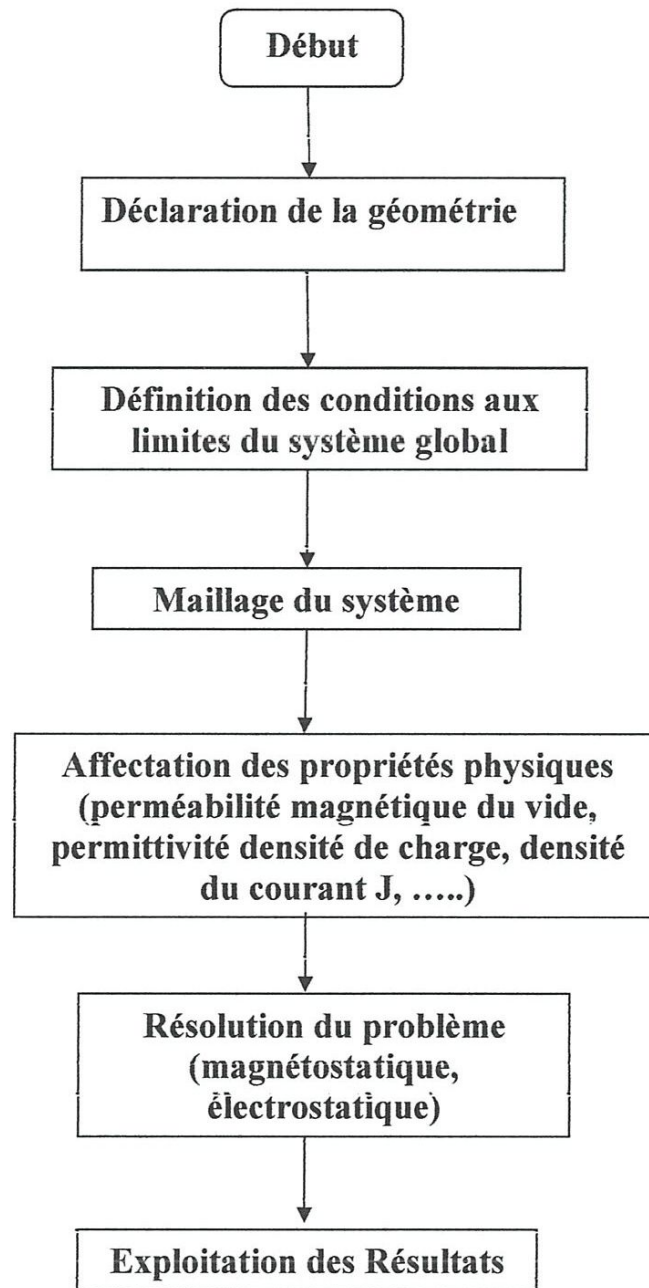


Figure 3.6 : Organigramme du principe de résolution du problème magnétostatique/électrostatique linéaire par la méthode des éléments finis

3.4 Validation :

Dans ce paragraphe nous proposons une comparaison entre les deux modèles proposés. Le dispositif test une ligne Haute tension de 380KV , possédant les caractéristiques suivants (Figure 3. 6) :

- Hauteur des phases $h=15\text{m}$
- Distance entre phases 7.7m
- Rayon du conducteur $r=0.01114\text{m}$

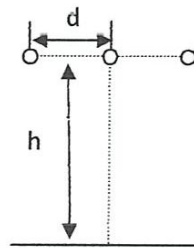


Figure 3.6 : Géométrie de la ligne étudiée

3.4.1 Calcul de l'intensité du champ électrique d'une ligne HT :

3.4.1.1 Procédé de calcul du champ électrique, à l'aide des éléments finis

a) Définition de la structure géométrique

La structure géométrique qui fera l'objet d'étude est représentée par le domaine de résolution de la figure 3.7 suivant

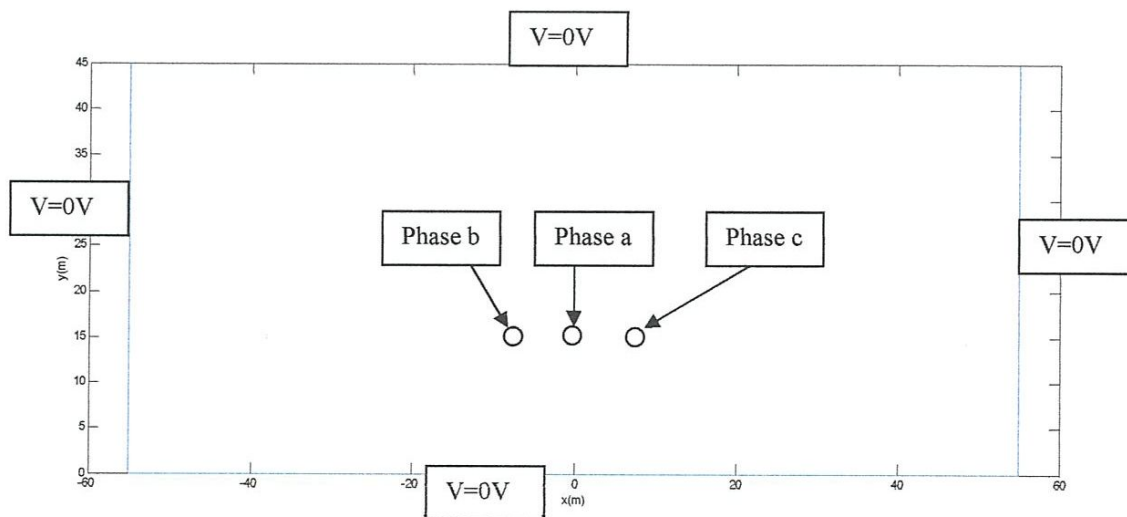


Figure 3.7 : Domaine d'étude

b) Définition des conditions aux limites

Les conditions aux limites associées au domaine d'étude sont telles que :

-Conditions Dirichlet $V=0$ sur l'infini

-Condition Dirichlet $V=220$ kv sur la phase a

-Condition Dirichlet $V = 220.(-0.5 + j\frac{\sqrt{3}}{2})$ sur la phase b

-Condition Dirichlet $V = 220.(-0.5 - j\frac{\sqrt{3}}{2})$ sur la phase c

c) maillage du domaine d'étude

Le domaine d'étude maillé en éléments finis qui fera l'objet de traitement est celui représenté par la figure 3.8 ci-dessous.

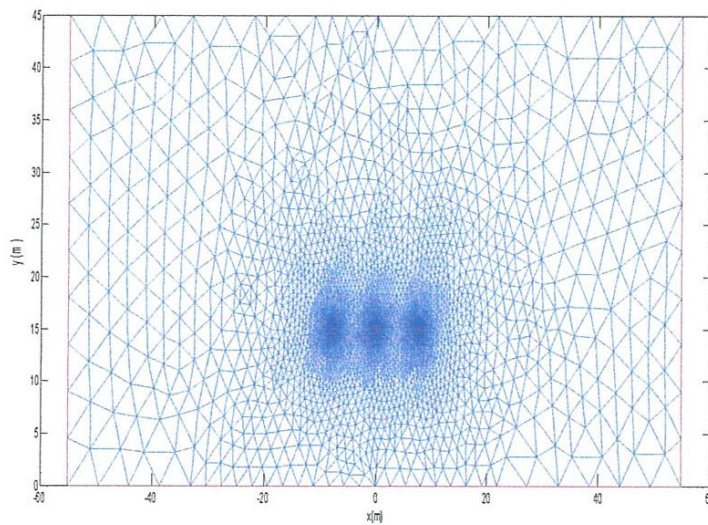


Figure 3.8 : Maillage du domaine d'étude

3.4.1.2 Exploitation des Résultats :

Les simulations ont été effectuées en utilisant deux programmes mis en œuvre sous environnement Matlab, l'un est basé sur le calcul éléments finis et l'autre basé sur le calcul analytique du champ électrique. Les résultats obtenus sont fournis dans les figures 3.9, et 3.10. Ce premier résultat permet de valider les

programmes de calcul du champ électrique d'une ligne haute tension mis en œuvre sous environnement Matlab.

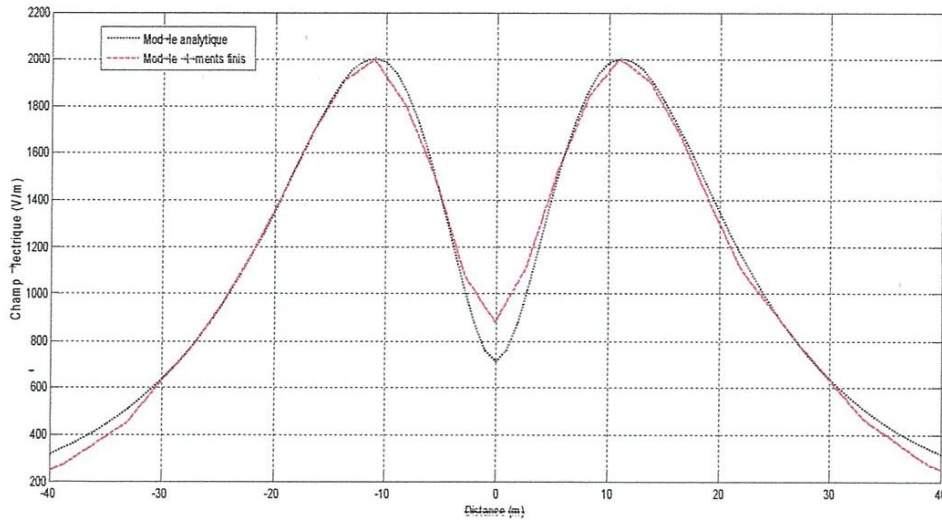


Figure 3.9 : Champ électrique en voisinage du pylône pour $y=0m$

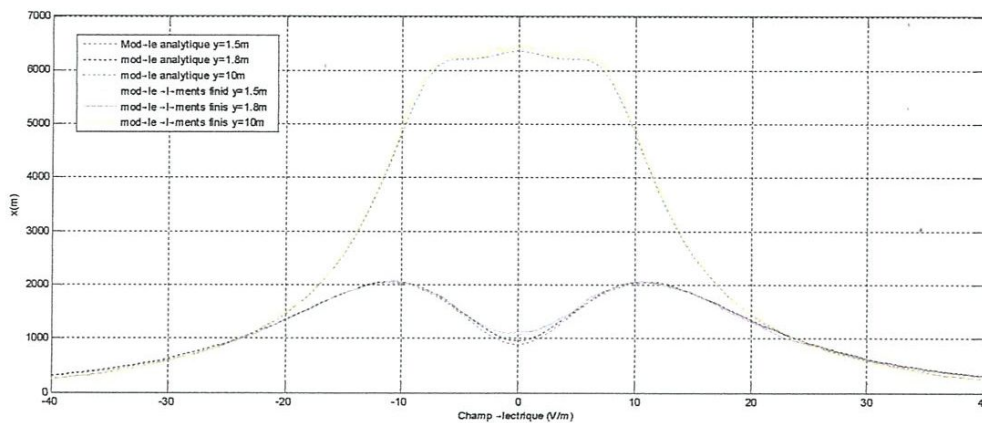


Figure 3.10 : Champ électrique en voisinage du pylône obtenu par les deux méthodes pour $y=1.5, 1.8$ et $10m$.

Les résultats de confrontation obtenus montrent une parfaite concordance entre le champ électrique de la ligne obtenu par le calcul éléments finis (modèle de Maxwell électrostatique) et le champ électrique obtenu par la méthode analytique.

3.4.2 Calcul de l'induction magnétique d'une ligne HT : ..

3.4.2.1 Procédé de calcul de l'induction magnétique, à l'aide des éléments finis

a) Définition de la structure géométrique et les conditions aux limites

La structure géométrique qui fera l'objet d'étude est représentée par le domaine de résolution de la figure 3.11 suivant :

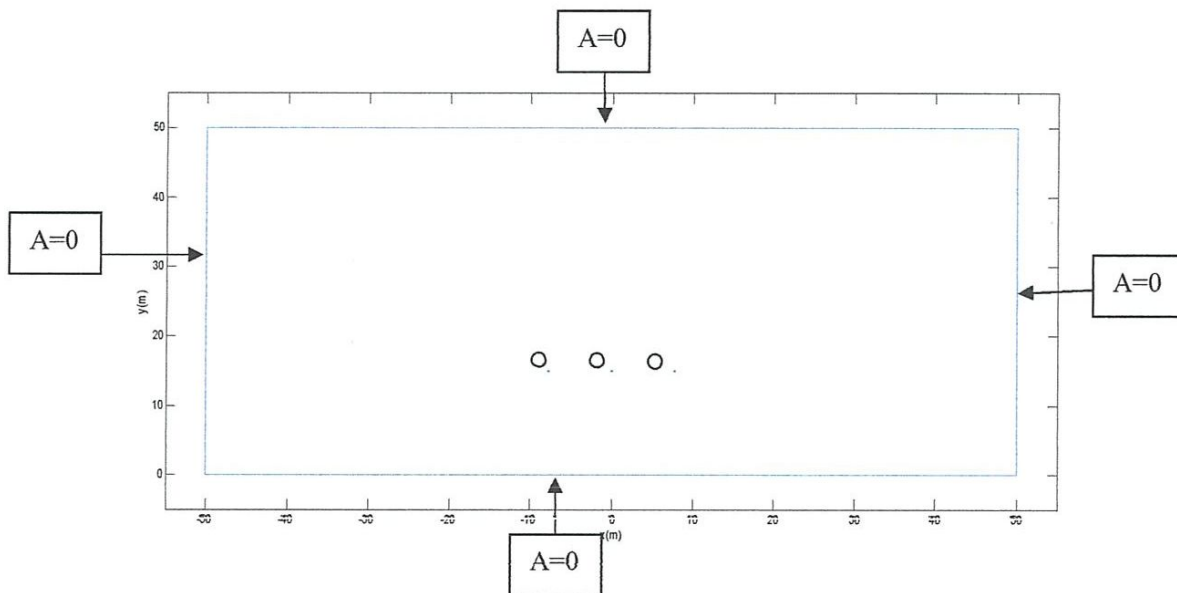


Figure 3.11 : Domaine d'étude

Les conditions aux limites sont des types Dirichlet homogène $A=0$ sur l'infini.

b) maillage du domaine d'étude

Le domaine d'étude maillé en éléments finis qui fera l'objet de traitement est celui représenté par la figure 3.12 ci-dessous.

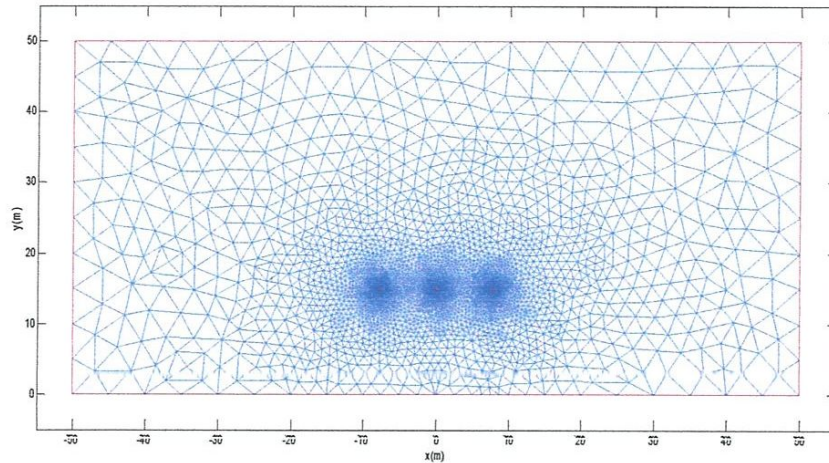


Figure 3.12 : Maillage du domaine d'étude

3.4.2.2 Exploitation des Résultats

La figure 3.13 montrent les sens de l'induction magnétique B créée par la ligne

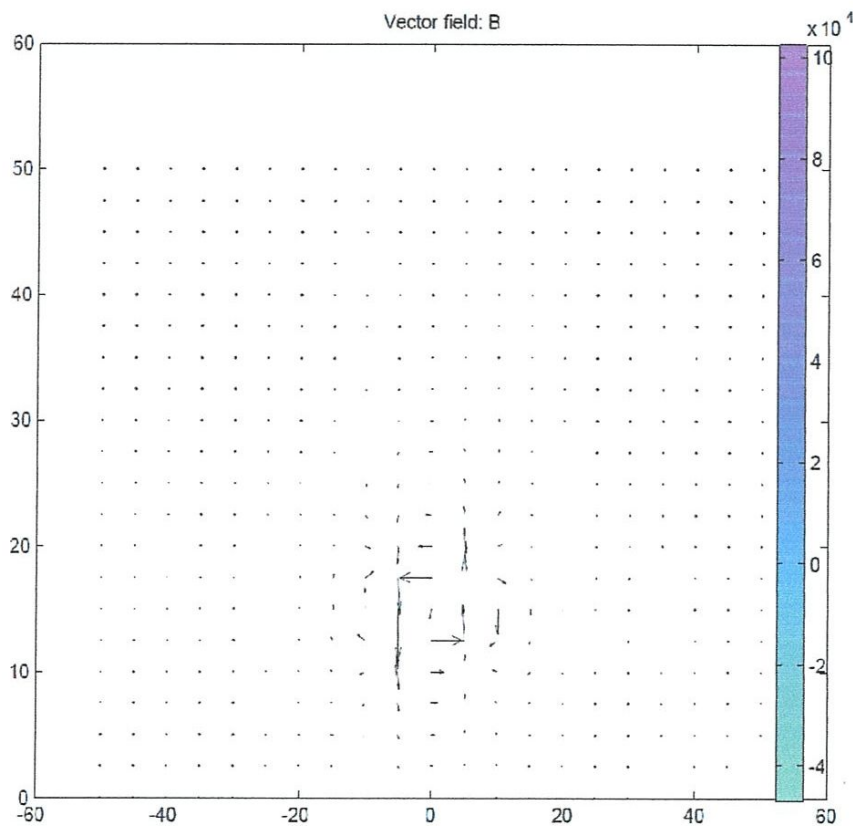


Figure 3.13 Induction magnétique B

Dans le cas du problème magnétostatique, le champ d'induction magnétique obtenus par les deux modèles sont proches, comme montre la figure 3.14.

Ce résultat permet de valider les programmes de calcul du champ magnétique d'une ligne haute tension mis en œuvre sous environnement Matlab.

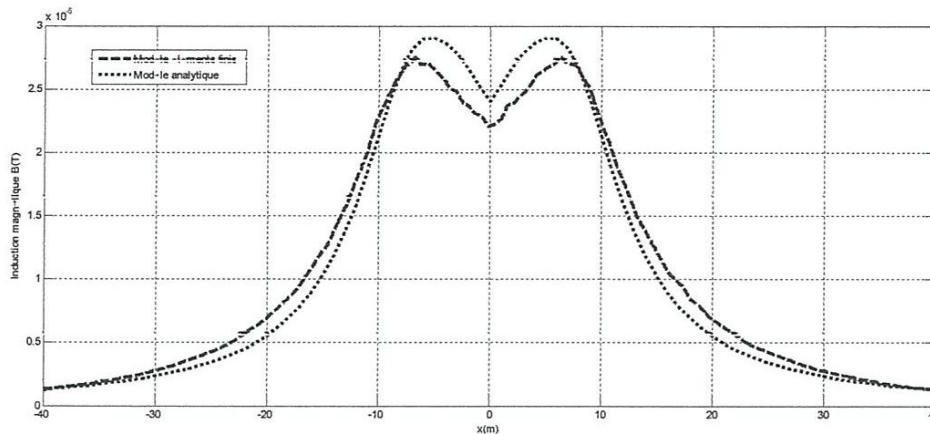


Figure 3.14 : Évolution du champ d'induction magnétique créée par la ligne pour $y=10$ m

Conclusion

Dans ce chapitre nous avons présenté les deux méthodes analytiques et les formulations des équations de Maxwell, en termes des potentiels scalaire V et magnétique A pour le calcul du champ électromagnétique d'une ligne à haute tension. Nous avons également proposé des algorithmes de calcul du champ électromagnétique par des méthodes analytiques et une méthode numérique (éléments finis). La validation est effectuée en comparant les résultats de calcul du champ électromagnétique d'une ligne HT obtenus par les deux méthodes.

chapitre VI

Applications

4. Applications :

Le champ électromagnétique au voisinage d'une ligne de transport d'énergie est en fonction de différents paramètres géométrique et électriques, telle que :

1. La configuration de la ligne.
2. La hauteur de la ligne.
3. La distance entre les phases.
4. La tension d'alimentation.
5. Le rayon du conducteur
6. Câble de grade

4.1 Champ électrique :

- **Configuration de la ligne :**

Dans ce chapitre nous procédés à des calculs effectués sur une ligne de 380KV pour trois configurations (Figure 4.1) : Ligne en nappe, ligne en triangle et ligne en drapeau. En utilisant les deux méthodes (Analytique et numérique).

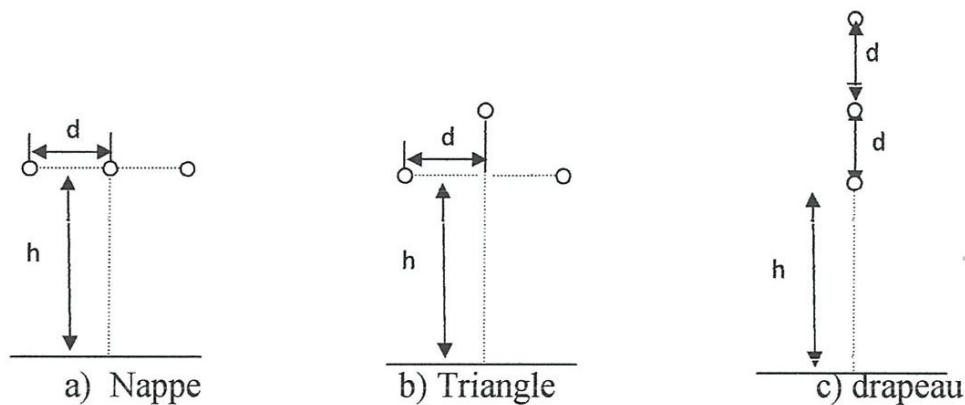


Figure 4.1 : Différents configuration de la ligne

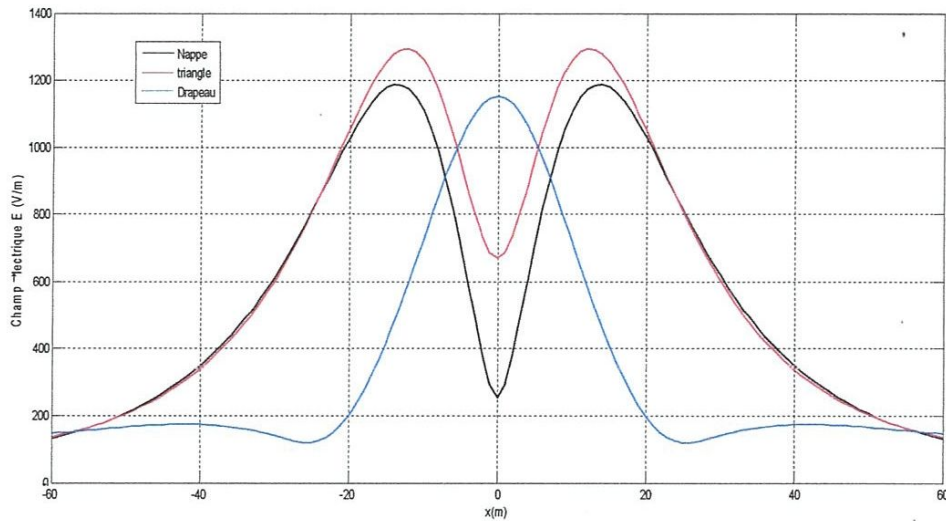


Figure 4.2 : Champ électrique émis par une ligne de transport d'énergie pour les trois configurations

A partir de ces résultats de calculs du champ électrique (Figure 4.2), le champ électrique crée par la ligne de configuration en triangle est plus grand que celle en nappe et en drapeau.

- **Influence de la hauteur de la ligne :**

Nous remarquons bien que le champ électrique est inversement proportionnel à la hauteur de la ligne (Figure 4.3).

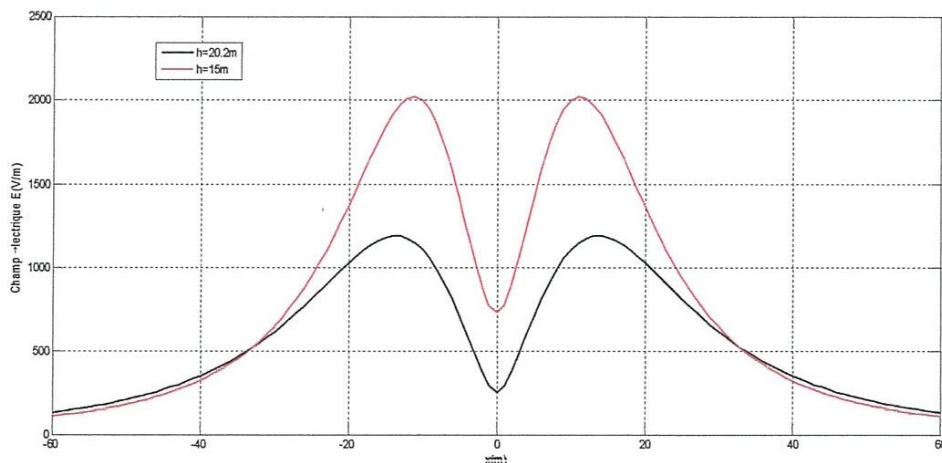


Figure 4.3 : Influence de hauteur de la ligne

- **Influence de la distance entre phase :**

Le champ électrique est plus important lorsque la distance entre phase petites (Figure 4.4).

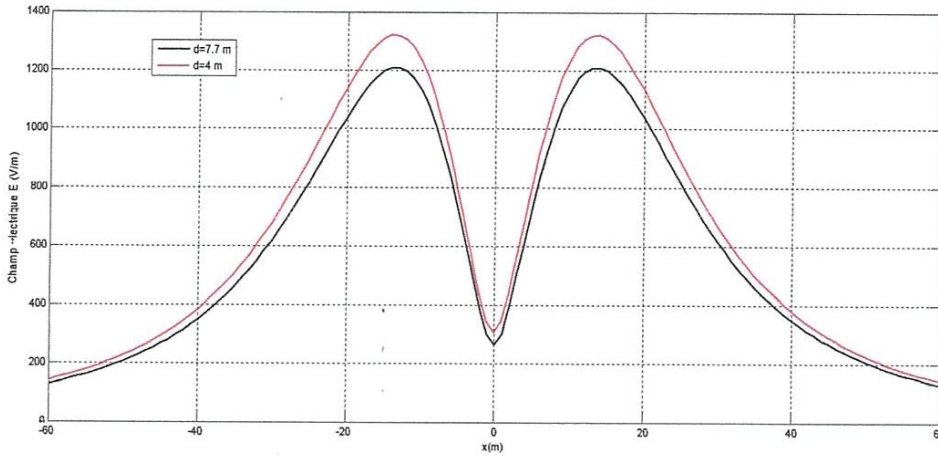


Figure 4.4 : influence de la hauteur de la ligne

- **Influence de la tension d'alimentation :**

Le champ électrique est plus important lorsque la tension d'alimentation est élevée (Figure 4.5).

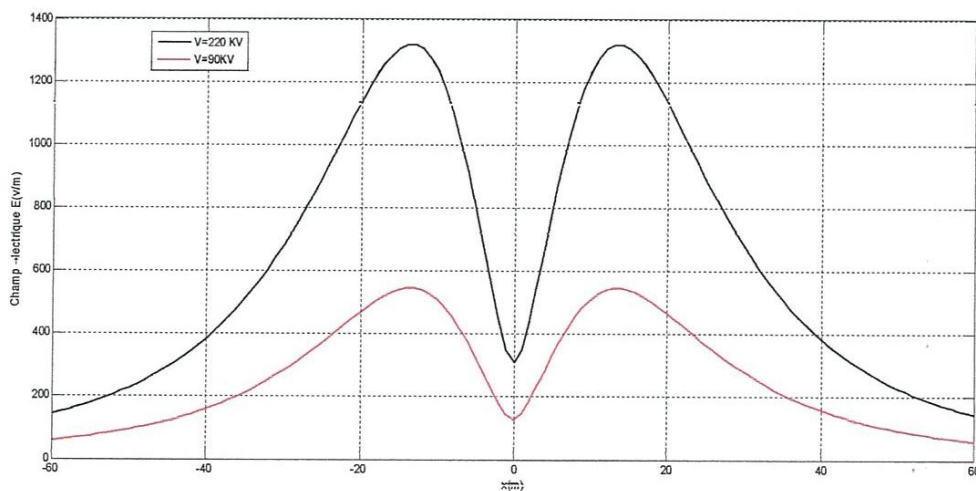


Figure 4.5 : Influence de la tension d'alimentation

- **Influence du câble de garde :**

L'existence de câble de garde augmente légèrement le champ électrique placé dans cet environnement (Figure 4.6), un objet conducteur électriquement isolé sera porté à un certain potentiel par rapport au sol (toiture métallique, clôture avec piquet en bois, véhicule,....) le contact fortuit d'une personne avec cet objet pourra, conduire à une sensation de picotement à l'instant du toucher. Si seule la décharge transitoire est perceptible au moment du contact, l'intensité du courant permanent observé dès le contact reste très inférieure au seuil de perception.

Néanmoins pour des objets métalliques de grande surface et pour des intensités de champs électrique de plus élevées, il convient d'assurer une mise à la terre permanente des pièces métalliques.

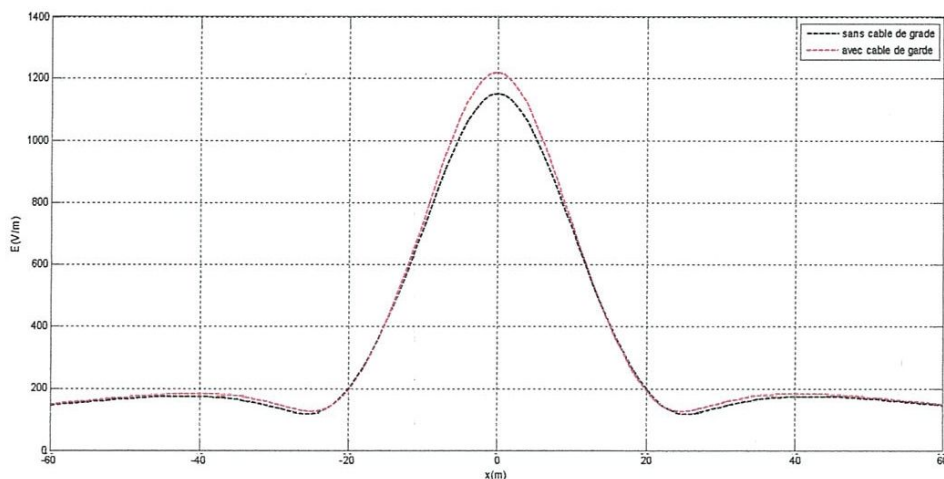


Figure 4.6 : Influence du câble de garde

4.1.2 Intensité du champ d'induction magnétique :

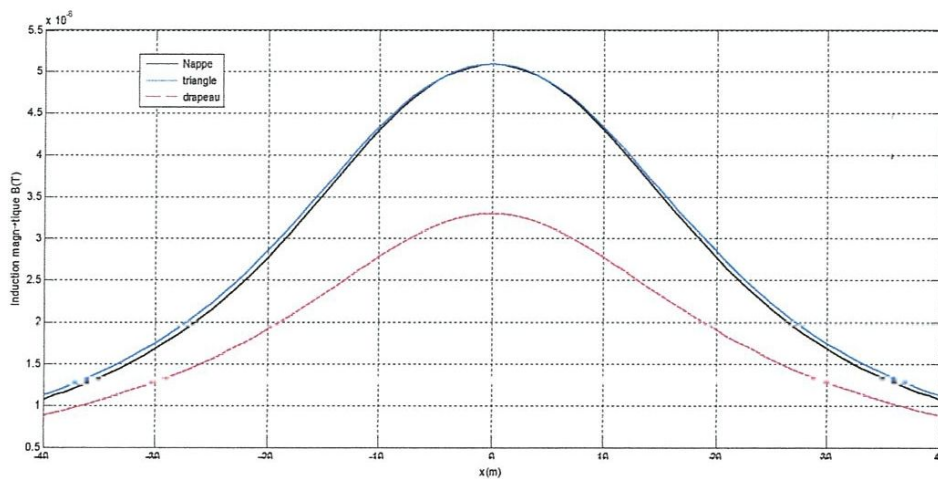


Figure 4.7 :: Champ magnétique émis par une ligne de transport d'énergie pour les trois configurations

Dans cette figure en voit que l'induction magnétique émis par la ligne en configuration drapeau est plus faible que les deux autres configurations.

- **Influence de la hauteur de la ligne :**

L'influence de la hauteur de la ligne sur la répartition du champ d'induction magnétique est représentée dans la figure 4.8. Le champ d'induction magnétique est important lorsque la hauteur de la ligne est grande.

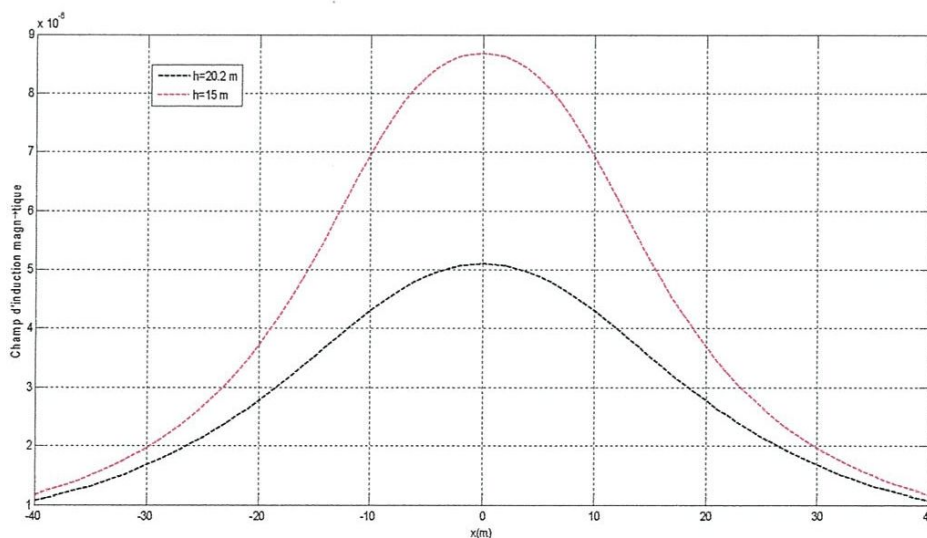


Figure 4.8 : Influence de la hauteur de la ligne

- **Influence de la puissance de la ligne :**

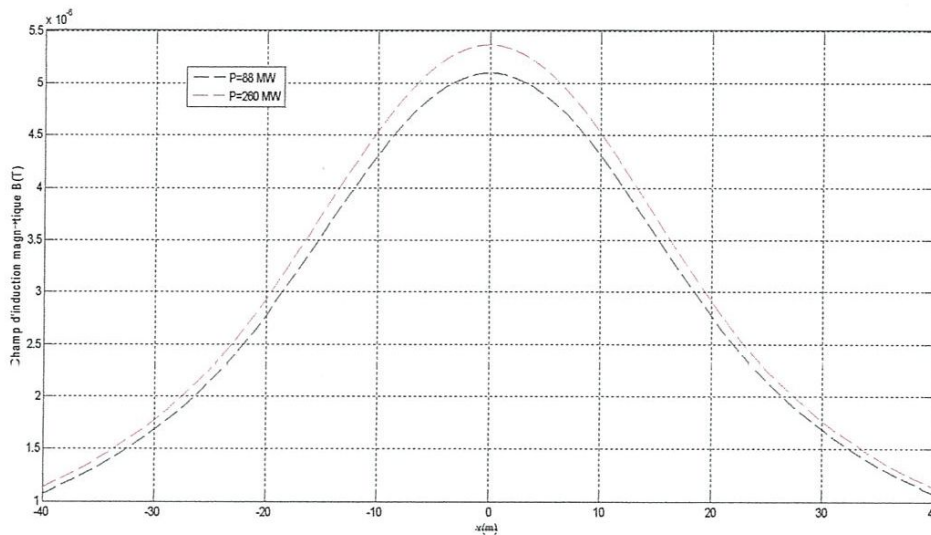
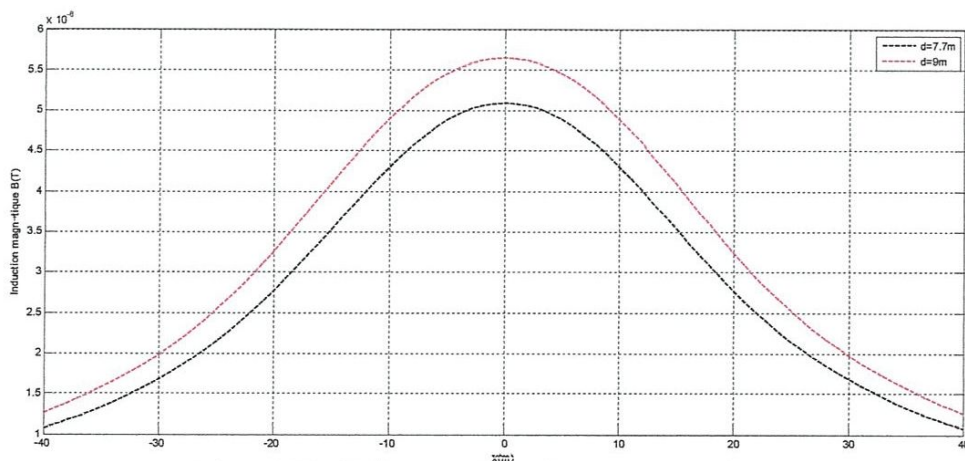


Figure 4.9 : Influence de la puissance de la ligne

D'après la figure (4.9) le champ d'induction magnétique émis par une ligne de transport dépend de la puissance d'alimentation, lorsque la puissance est grande le champ émis important.

- **Influence de la distance entre phase :**

La figure 4. Montre que le champ d'induction B est plus important lorsque la distance entre les phases est petite.



Figur 4.10 : Influence de la distance entre phase

Conclusion :

La quantification par le calcul directement en triphasé, du champ électromagnétique émis par une ligne de transport d'énergie a été l'objet de ce chapitre.

Le calcul du champ électrique à partir de la connaissance de la répartition des charges superficielle a des résultats satisfaisants.

Le calcul du champ magnétique par un modèle simplifié (théorème d'Ampère) a aussi conduit à des résultats acceptables.

Dans ce chapitre nous avons aussi analysé en matière d'émission EM des différentes configurations des lignes de transport d'énergie.

Conclusion générale

Le dimensionnement des réseaux électriques doit tenir compte des contraintes thermiques, diélectriques, mécaniques et environnementales. Lorsque le squelette de la ligne se dessine on peut calculer par exemple le gradient superficiel autour du conducteur ou du faisceau et prédéterminer le niveau de conséquence de l'effet couronne.

La limitation du niveau de conséquences réside dans le maintien du champ électrique et du champ magnétique à des valeurs bien déterminés. La valeur du champ électromagnétique engendré par la ligne dépend essentiellement des hauteurs du pylône, configuration de la ligne, la tension et la puissance de la ligne. Une fois ces grandeurs et fixées, l'ingénieur n'a qu'une faible marge de manœuvre pour y remédier.

Les contraintes environnementales ont compliqué l'implantation des nouveaux réseaux même quand les besoins énergétiques futurs sont justifiés. Cela a conduit les gouvernements à fixer des limites aux champs électrique et magnétique ; d'où la nécessité pour les bureaux d'études de reconsidérer la problématique et d'envisager des modèles non classiques.

Les programmes réalisés permet en effet d'effectuer plusieurs types de calcul afin de prédéterminer les grandeurs diverses liées à l'émission électromagnétique. Il est ainsi possible de connaître avant réalisation d'une nouvelle ligne ou d'un nouveau réseau les conséquences dues à l'effet d'émission du champ électromagnétique. De cette façon on peut concevoir une ligne qui donne le minimum d'impact sur l'environnement.

Bibliographie

- [1] CIGRÉ, Group de travail, 36.01 (Interférences et champs), *Champs électriques et magnétiques engendrés par les réseaux de transport. Exemple de calcul des perturbations électromagnétiques par la méthode CIGRÉ*, Travail 21-43, 1980, Paris.
- [2] [2] CIGRÉ, *Guide pour l'établissement délimites d'exposition aux champs électriques, magnétiques et électromagnétiques*, International Congress on Large High Voltage Electric, 1-9 sept. 2001, Paper 30.01, Paris.
- [3] K. J. Satsios, D. P. Labridis and P. S. Dokopoulos, *Finite element computation of field and eddy currents of a system consisting of a power transmission line above conductors buried in nonhomogeneous earth*, IEEE Trans. on Power Delivery, vol.13, pp. 876-882, July 1998
- [4] Michel auget et Jean-Jaques Morf, (Energie électrique), *Traité d'électricité*, vol XII.
- [5] Valentin Crastan (les réseaux d'énergie électrique 1) , modélisation des éléments du réseau triphasé. C.Gary et M.Moreau, l'effet de couronne en tension alternative.
- [6] Mostéfa Brahami est enseignant a l'université de sedi-Bel Abbés, au département d'électrotechnique.
- [7] A. Ladjimi ,(notre de cours 2010).
- [8] Travail de fin d'études présenté par Olivier Houet en vue de l'obtention du grade académique d'Ingénieur Civil électromécanicien (électricité).
- [9] Mémoire de fin d'étude Master (Calcul et méthode de minimisation du champ électromagnétique d'une ligne haute 2010).