



Mémoire de Fin de cycle

Présenté par :

MEZIAN T Rachida

&

SAHLI Siham

Pour l'obtention du diplôme de

MASTER EN ELECTROTECHNIQUE

Option :

Réseaux Electriques

Thème

*Calcul du champ électromagnétique généré par les
réseaux électriques en vue de la compatibilité
électromagnétique (CEM)*

Encadré par :

Pr. Bachir MAUCHE

REMERCIEMENT

Trouver les bons mots pour dire « merci » est une chose difficile. Tout d'abord, nous tenons à exprimer toute nos gratitudee au professeur Maouche Bachir pour sa sympathie, ses compétences et sa grande disponibilité. Son lui, nous n'aurions pas finalisé ce projet.

Nos remerciements vont aussi aux membres du jury. Qui ont bien voulu accepter d'évaluer notre travail, leur compétences et savoir sont des éléments qui apportent une plus-value à notre modeste travail, qu'ils trouvent tous ici l'expression de nos remerciements et notre reconnaissance.

En fin, nous tenons à remercier vivement tous ceux qui nous ont aidé de près ou de loin, que ce soit par leurs amitiés, leurs conseils ou par leur soutiens moraux

DEDICACES

« On passe la moitié de sa vie à retenir sans comprendre, et l'autre moitié à comprendre sans retenir »

"Il y a quelque chose de plus haut que l'orgueil, et de plus noble que la vanité, c'est la modestie ; et quelque chose de plus rare que la modestie, c'est la simplicité."

- Antoine de Rivarol

A nos amours

Je dédie ce travail, à mes très chers parents, à mon frère Djallal, à ma sœur Lydia,
à tous mes amis.

TABLE DES MATIERES

TABLE DES MATIERES	5
INTRODUCTION GENERALE.....	9
I- Généralité sur les réseaux électriques.....	10
I.1- Introduction.....	11
I.2- Historique et évolution des réseaux électriques.....	11
I.3- Niveaux de tension	11
I.4- Architecture et topologie des réseaux aériens.....	12
I.4.1- Réseaux maillés.....	12
I.4.2- Réseau bouclé	12
I.4.3- Réseau radial	12
I.4.4- Réseau arborescent	13
I.5- Types de réseaux électriques	13
I.5.1- Réseaux de transport	13
I.5.2- Réseaux de répartition.....	13
I.5.3- Réseaux de distribution.....	13
I.5.3.1- Réseau à moyenne tension (MT)	13
I.5.4- Réseau à basse tension (BT)	13
I.6- Poste de transformation.....	14
I.7- Postes d'interconnexions	15
I.8- Lignes de transport.....	15
I.8.1- Ligne aérienne	15
I.8.2- Lignes souterraines	16
I.9- Contraintes liées au fonctionnement des lignes	17
I.9.1- Contraintes électriques.....	17
I.9.1.1- Tension électrique	17
I.9.1.2- Intensité du courant électrique.....	17
I.9.2- Contraintes liées à la nature.....	17
I.10- Composants de la ligne.....	18
I.10.1- Conducteurs.....	18
I.10.2- Isolateurs	19
I.10.3- Supports	19
I.10.3.1- Triangle.....	20
I.10.3.2- Nappe.....	20

I.10.3.3-	Drapeau	20
I.10.4-	Câble de garde.....	20
I.10.4.1-	Rôle statique	21
I.10.4.2-	Rôle dynamique.....	21
I.11-	Schéma équivalent des lignes aériennes	21
I.12-	Paramètres électrique de la ligne	22
I.12.1-	Résistance	22
I.12.2-	Inductance	23
I.12.3-	Capacité	23
I.13-	Conclusion	23
II-	Notions de compatibilité Electromagnétique	24
II.1-	Introduction.....	25
II.2-	Définition de la CEM.....	25
II.3-	Acteurs de la CEM	25
II.3.1-	Source	25
II.3.1.1-	Définition	25
II.3.1.2-	Réseaux électriques comme source	25
II.3.2-	Couplage	26
II.3.2.1-	Définition	26
II.3.2.2-	Chemin de couplage dans les réseaux électriques	26
II.3.2.3-	Types de milieux	26
a.	Milieu conducteur	26
b.	Milieu isolant	26
c.	Milieu magnétique	26
d.	Milieu diélectrique	27
II.3.3-	Victime	27
II.3.3.1-	Définition	27
II.3.3.2-	Réseaux électriques comme victime	27
II.4-	- Modes de couplage	27
II.4.1-	Mode commun.....	27
II.4.2-	Mode différentiel.....	28
II.5-	Types de couplages :	28
II.5.1-	Couplage par conduction (impédance commune).....	29
II.5.1.1-	Définition	29
II.5.1.2-	Liaison directe ou perturbations directement conduites ...	29

a.	Variation rapide de tension	29
b.	Variation lente de tension.....	30
c.	Creux ou microcoupures de tension	30
d.	Surtension	30
II.5.1.3-	Couplage d'un champ électrique avec un conducteur	30
II.5.1.4-	Couplage d'un champ magnétique avec une boucle	30
II.5.2-	Couplage par rayonnement.....	31
II.5.2.1-	La zone de champs lointains	31
II.5.2.2-	La zone de champs proche	31
II.5.3-	Couplage inductif	32
II.5.3.1-	Equations mise en jeux	32
II.5.3.2-	Couplage par diaphonie inductive	32
II.5.4-	Couplage capacitif	33
II.5.4.1-	Equations mises en jeux.....	33
II.5.4.2-	Couplage par diaphonie capacitive	33
II.5.4.3-	Couplage d'un conducteur à un plan de masse	33
II.5.5-	Couplage par ionisation.....	34
II.6-	Effets de la géométrie.....	34
II.6.1-	Effet pelliculaire (Effet de peau)	34
II.6.2-	Effet de proximité	35
II.6.3-	Effet de couronne	35
II.6.4-	Effet de bord.....	35
II.7-	Norme de la CEM.....	35
II.7.1-	Limite admissible du champ électromagnétique	35
II.7.1.1-	Sur l'être humaine.....	35
II.7.1.2-	Sur le matériel.....	36
II.8-	Conclusion	36
III-	Modélisation et expression des champs électrique et magnétique	37
III.1-	Introduction.....	38
III.2-	Système triphasé équilibrée	38
III.3-	Calcul du champ magnétique	38
III.3.1-	Hypothèses.....	38
III.3.2-	Champ généré par un conducteur de longueur infini.....	39
III.3.3-	Dédution du potentiel vecteur magnétique.....	40
III.3.4-	Champ magnétique triphasé.....	41

III.3.5-	Disposition verticale	41
III.3.6-	Disposition horizontale	42
III.3.7-	Disposition triangulaire	43
III.4-	Conducteur semi-fini	45
III.5-	Expression du champ électrique	46
III.5.1-	Conducteur infini	46
III.5.2-	Champ électrique en triphasé	47
III.6-	Conclusion	49
IV-	Applications et résultats.....	50
IV.1-	Introduction.....	51
IV.2-	Evaluation spatiale du champ magnétique	52
IV.2.1-	Disposition verticale	52
IV.2.2-	Disposition horizontale	53
IV.2.3-	Disposition triangulaire	54
IV.3-	Evaluation spatiale du champ électrique	55
IV.3.1-	Configuration verticale	55
IV.3.2-	Configuration horizontale	55
IV.3.3-	Configuration triangulaire	55
IV.4-	Conclusion	56
CONCLUSION GENERALE	57	
REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES.....	58	

INTRODUCTION GENERALE

La production, le transport et la distribution de l'énergie électrique forment la colonne vertébrale de l'économie d'un état industriel moderne. Avec la progression de l'industrialisation, naissent des exigences de plus en plus élevées concernant la mise à disposition de cette énergie. Pour des raisons économiques, le transport et la distribution de l'énergie électrique s'effectuent généralement par des lignes aériennes.

Relativement à la compatibilité électromagnétique (CEM) et en dehors des différents appareils électriques constituant les centrales de production et de distribution, les conducteurs des lignes aériennes et les isolateurs sont les principaux acteurs de production du champ électromagnétique perturbateur. Ainsi, l'objectif de ce travail est l'évaluation de ce champ à proximité des pylônes et des conducteurs des lignes de transport d'énergie.

Le présent mémoire s'articule autour de quatre chapitres. Le premier chapitre a pour objectif de situer le contexte du travail et de ses enjeux en mettant en évidence la diversité des concepts généraux sur les réseaux électriques.

Le deuxième chapitre consiste à la présentation de la CEM et l'étude des différents phénomènes électromagnétiques mis en jeu.

Dans le troisième chapitre, est consacré à l'établissement des expressions des champs électriques et magnétiques à proximité des lignes de transport d'énergie.

Le dernier chapitre est réservé à l'implantation des formulations sous MATLAB et l'exposition des résultats.

1^{er} CHAPITRE

I- Généralité sur les réseaux électriques

I.1- Introduction

Un réseau électrique est un ensemble d'outils destiné à produire, à transporter et à distribuer de l'énergie électrique. Il est constitué des générateurs, des transformateurs, des lignes de transport, de distribution et de répartition.

I.2- Historique et évolution des réseaux électriques

Les premières centrales électriques ont été construites par des industries pour s'autoalimenter en courant continu. L'usage public de l'électricité n'a réellement débuté qu'après l'exposition universelle de 1881. Les premières concessions municipales de production et de distribution d'électricité sont alors faites à des entreprises privées ou à des régies municipales pour l'éclairage public et l'alimentation de particuliers. Le courant alternatif s'est généralisé avec l'évolution technologique qui a permis d'adapter les tensions à des puissances importantes grâce aux transformateurs.

Le réseau électrique est hiérarchisé par niveau de tension. Celui-ci est fractionné en trois principales subdivisions à savoir le réseau de transport, de répartition et de distribution. Une notion de frontière peut être définie entre les niveaux de tension du réseau électrique. Ces frontières sont assurées par les postes sources et les transformateurs. Le réseau de transport achemine, sur ces grandes distances, l'énergie des centrales de production jusqu'aux abords des grandes centres de consommation. [3]

I.3- Niveaux de tension

La nouvelle norme en vigueur en Algérie (SONELGAZ) définit les niveaux de tension alternative dans le tableau (I.1) [9]

Tableau I.1 : Niveaux de tension

Domaines de Tension		Valeur de la tension composée nominale (Un en Volts)	
		Tension Alternative	Tension Continue
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	$U_n > 50\,000$	$U_n > 75\,000$

I.4- Architecture et topologie des réseaux aériens

Dans les réseaux nous trouvons plusieurs types de configuration topologiques ils ont dictée par : le niveau fiabilité recherché, la flexibilité et la maintenance, ainsi que les coûts d'investissement et d'exploitation. Les différentes topologies qu'on trouve usuellement sont illustrées ci-dessous [3]:

I.4.1- Réseaux maillés

Tous les centres de production sont liés entre eux par des lignes THT au niveau des postes d'interconnexion ; ce qui forme un maillage. Cette structure permet une meilleure fiabilité mais nécessite une surveillance à l'échelle nationale voir continentale.

I.4.2- Réseau bouclé

Cette topologie est surtout utilisée dans les réseaux de répartition et distribution MT. Les postes de répartition HT ou MT alimentés à partir du réseau THT sont reliés entre eux pour former des boucles qui permettent d'assurer la disponibilité en cas de défaillance. Cependant, il faut noter que les réseaux MT ne sont pas forcément bouclés.

I.4.3- Réseau radial

C'est une topologie simple qu'on trouve usuellement dans la distribution MT et BT. Elle est composée d'une ligne alimentés au départ par un poste source HT ou MT. En moyenne tension cette structure est souvent alimentée des deux côtés afin d'assurer la disponibilité.

I.4.4- Réseau arborescent

Cette structure est très utilisée en milieu rural et quelque fois en milieu urbain. Elle est constituée d'un poste de répartition qui alimente plusieurs postes de distribution (BT) grâce à des piquages à différents niveaux des lignes alimentant les postes MT/BT.

I.5- Types de réseaux électriques

Suivant le trajet de l'énergie depuis sa production jusqu'à son utilisation, il y a successivement différents types de réseaux dont les missions sont parfaitement définies [2] :

I.5.1- Réseaux de transport

Les réseaux de transport ont pour mission de conduire l'énergie et de permettre de réaliser à chaque instant l'égalité de la production et de la consommation sur l'ensemble du territoire en respectant des contraintes sur le maintien de la tension.

I.5.2- Réseaux de répartition

Ces réseaux ont pour fonction de faire la liaison entre le réseau de transport et les réseaux de distribution. Ils doivent assurer l'alimentation du territoire qui est généralement des zones importantes de consommation.

I.5.3- Réseaux de distribution

Les réseaux de distribution ont pour vocation de couvrir l'ensemble du territoire afin de desservir la totalité de clients qui demandent à être raccordés au réseau. Ils sont généralement de structure radiale ou arborescente.

I.5.3.1- Réseau à moyenne tension (MT)

Leur tension est comprise entre 2.4KV et 69KV dont les longueurs allant de 80km à 230km. Ce réseau relie les clients aux postes de transformation principaux [3].

I.5.4- Réseau à basse tension (BT)

Il est constitué des lignes aériennes dans les régions rurales, et des câbles souterrains dans les lieux urbains et les centres industriels. Leur tension est comprise entre 120V et 600V dont les longueurs sont inférieures à 80 km. Nous distinguons dans les réseaux de distribution deux entités principales que sont les

postes et les liaisons [3]. La figure (I.1) montre l'architecture de réseau électrique en Algérie [9].

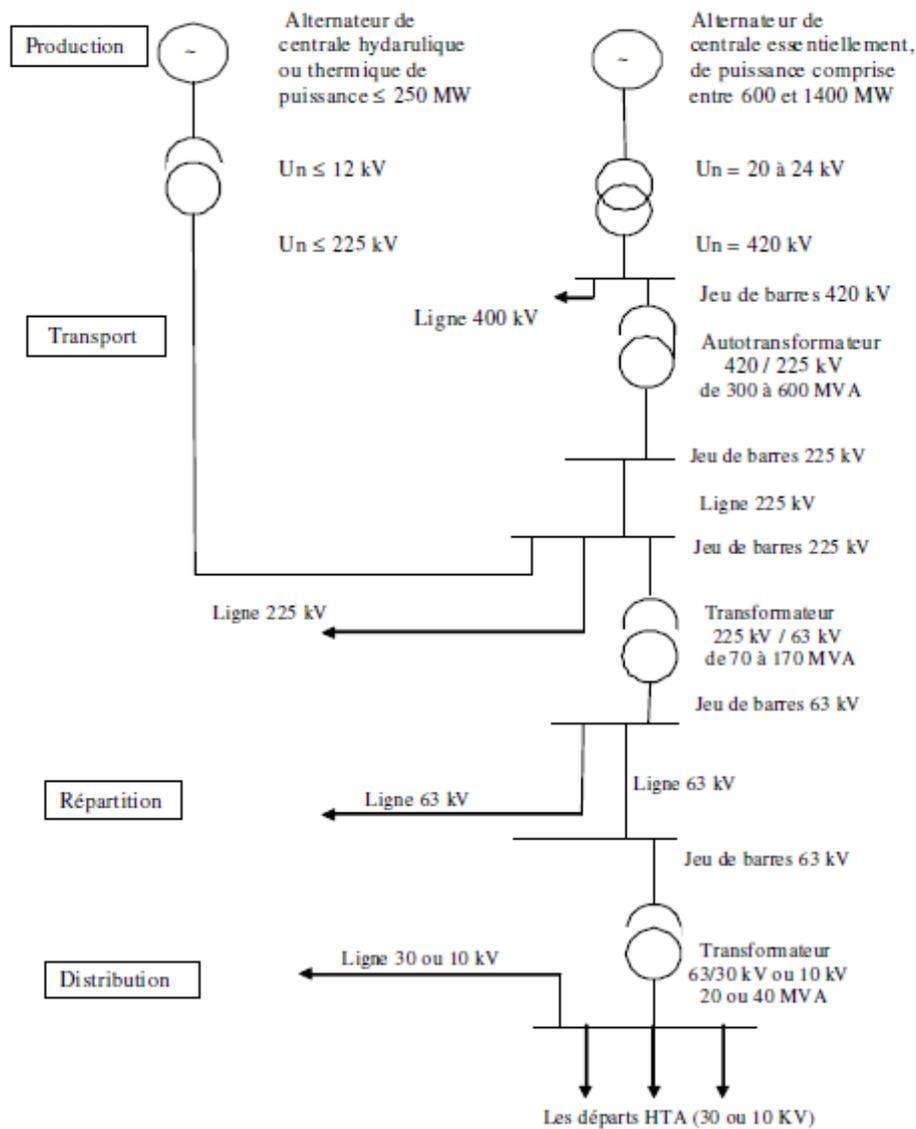


Figure I.1 : Architecture générale du réseau électrique en Algérie

I.6- Poste de transformation

C'est l'ensemble de deux postes de coupure à des tensions différentes reliés par des transformateurs qu'ils ont pour rôle d'augmenter ou abaisser la tension, et réguler celle-ci au moyen de compensateur statiques, de réactance capacitatives ou inductives et de transformateurs à prise variables[3].

I.7- Postes d'interconnexions

Ils sont des connexions essentiellement réalisées par des jeux de barre qui relie les nœuds du réseau afin d'augmenter la stabilité de l'ensemble et de permettre des échanges d'énergie [3].

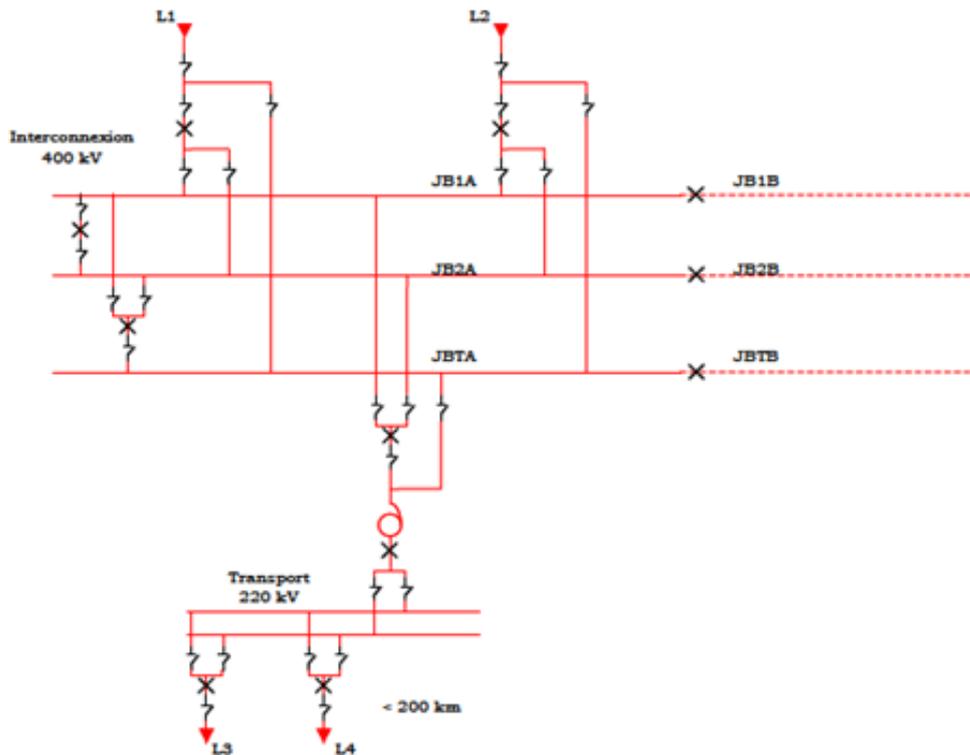


Figure I.2 : Réseau d'interconnexion

I.8- Lignes de transport

I.8.1- Ligne aérienne

Elle est composée de conducteur, d'isolateurs, de pylônes et d'un câble de garde pour les lignes de haute tension. Son rôle principale est de transporter l'énergie électrique de la source de production jusqu'à la zone de consommation. Elle possède les caractéristiques suivantes [2] :

- La tension reste constante sur toute la longueur de la ligne et pour toutes les charges comprises entre zéro est la charge nominale.
- Un bon rendement.
- Les pertes joules ne doivent pas surchauffer les conducteurs.

Parmi les avantages des lignes aériennes sont:

- Sont moins coûteuses que les lignes souterraines du point de vue des frais d'installation et de réparation.
- Elles permettent une surveillance aisée de leur état et un repérage facile des accidents et des défauts.
- Elles peuvent être réparées très rapidement en cas d'accident ou de défaut.
- Elles peuvent être surchargées en intensité de courant sans trop de danger.

Parmi les inconvénients, on distingue:

- L'exposition aux surtensions d'origine atmosphérique.
- Leur installation donne lieu à des oppositions des propriétaires des terrains surplombés.
- Elles soulèvent des problèmes d'esthétique et de respect des sites.
- Elles sont susceptibles d'induire des forces électromotrices perturbatrices ou dangereuses dans les circuits de télécommunication.
- Elles sont susceptibles de produire des perturbations radioélectriques gênant les réceptions de radiodiffusion et de télévision.
- La rupture de leurs conducteurs est susceptible de présenter des dangers pour les personnes, les animaux.
- Selon certains, les champs électriques et magnétiques peuvent exercer une influence néfaste sur la santé [2].

I.8.2- Lignes souterraines

Les câbles souterrains ne produisent pas de champ électrique. En effet, celui-ci est confiné à l'intérieur de la gaine métallique qui entoure les conducteurs. [2]

Ces avantages:

- Elles constituent la seule solution possible dans les agglomérations plus serrées.
- Elles sont soustraites aux surtensions d'origine atmosphérique.
- Elles ne causent pas d'interférences avec les circuits de télécommunications.
- ne produisent aucune gêne pour les réceptions de radiodiffusion et télévision.
- Elles sont les seules solutions possibles pour traverser de larges fleuves ou des bras de mer lorsque la distance à franchir dépasse 3 km.

Parmi les inconvénients, en note:

- Elles sont d'un coût beaucoup plus élevé que celui des lignes aériennes. La différence est d'autant plus grande que la tension est plus élevée.
- Le repérage des défauts est délicat et lent.
- Les réparations sont coûteuses et parfois malaisées.
- Leurs armures et gaines doivent être protégées contre les effets de corrosion dus aux courants.
- Elles risquent d'être détériorées en cas de mouvements de terrains (particulièrement à craindre dans les régions minières).
- Leur isolement est susceptible d'être détérioré par élévation de température des conducteurs en cas de surcharge.
- Le dimensionnement des lignes aériennes est soumis à des contraintes liées à ses conditions de fonctionnement et à des contraintes externes dues à son environnement climatique.

I.9- Contraintes liées au fonctionnement des lignes

I.9.1- Contraintes électriques

I.9.1.1- Tension électrique

Les conducteurs aériens n'étant isolés que par la couche d'air qui les entoure. Le dimensionnement des lignes doit tenir compte de la tension à laquelle sont portés les conducteurs. Le maintien de l'isolation est assuré par des chaînes d'isolateurs dont le rôle est de relier le conducteur au pylône tout en maintenant une distance d'isolement suffisante pour éviter les phénomènes de claquage diélectrique (les champs électrique de rupture diélectrique dans l'air étant de l'ordre de 3 KV/m). [3]

I.9.1.2- Intensité du courant électrique

Les conducteurs sont le siège de pertes joule qui engendrent un échauffement provoquant une dilatation des conducteurs et un allongement de la flèche qui sépare les conducteurs du sol. Ce phénomène a pour conséquence la détérioration des câbles et l'interruption du service.

I.9.2- Contraintes liées à la nature

Les contraintes liées à l'environnement climatique sont de nature mécanique dues principalement aux effets de:

- Vent

Le vent a tendance de faire balancer les conducteurs créant ainsi un risque de court-circuit mais aussi de rupture. Il a un effet important sur les pylônes qui doivent être conçus pour résister aux augmentations les plus violents. [3]

- Givre

Ce phénomène hivernal peut être important sur les sites montagneux ou il crée par accumulation des gaines de glace autour des conducteurs ce qui les alourdit et les fragilise lorsque la température est très basse. Il est donc nécessaire de prévoir une solidité et une résistance à la surcharge suffisantes [3].

- Neige

Certaines formes de neige ont une capacité d'adhérence très forte qui crée des manchons autour des conducteurs et donc un poids supplémentaire qu'il convient de prévoir en termes de solidité et une résistance à la surcharge suffisantes [3].

I.10- Composants de la ligne

I.10.1- Conducteurs

Les conducteurs sont des câbles constitués de brins toronnés de cuivre ou d'aluminium ou d'alliages spéciaux d'aluminium à haute résistance mécanique. Leur surface extérieure est quasi cylindrique, striée de rainures hélicoïdales. Ils présentent des avantages de réduction du diamètre à section utile égale et de réduction du coefficient de traînée.

L'aluminium est souvent associé à l'acier sous forme de câbles aluminium-acier. On emploie également des câbles constitués par des brins ayant chacun une âme d'acier recouverte d'une couche conductrice de cuivre ou d'aluminium.

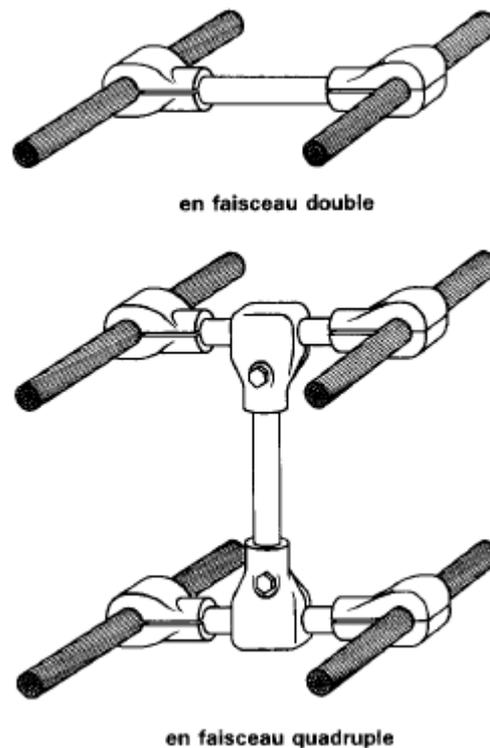


Figure I.3:Ligne triphasée

Le conducteur d'une phase peut être réalisé en faisceau double, triple ou quadruple de conducteurs maintenus à distance par des entretoises [4] ; comme indiqué sur la figure (I.2).

I.10.2- Isolateurs

Ils sont généralement en porcelaine ou en verre. Ils se présentent sous deux formes d'isolateurs rigides utilisés jusqu'aux tensions de 15 kV et les isolateurs de suspension composés généralement de plusieurs éléments accrochés les uns aux autres, (chaînes d'isolateurs). Ces derniers sont employés pour les tensions plus élevées. [4]

I.10.3- Supports

Les supports sont souvent appelés pylône à cause de leur forme. Il caractérise l'armement qui est la forme géométrique de répartition des conducteurs dans l'espace. Ils comprennent des conducteurs et des câbles de garde destinés à protéger les conducteurs des coups de foudre. Il y a trois grandes familles d'armement: triangle, nappe et drapeau. [3]

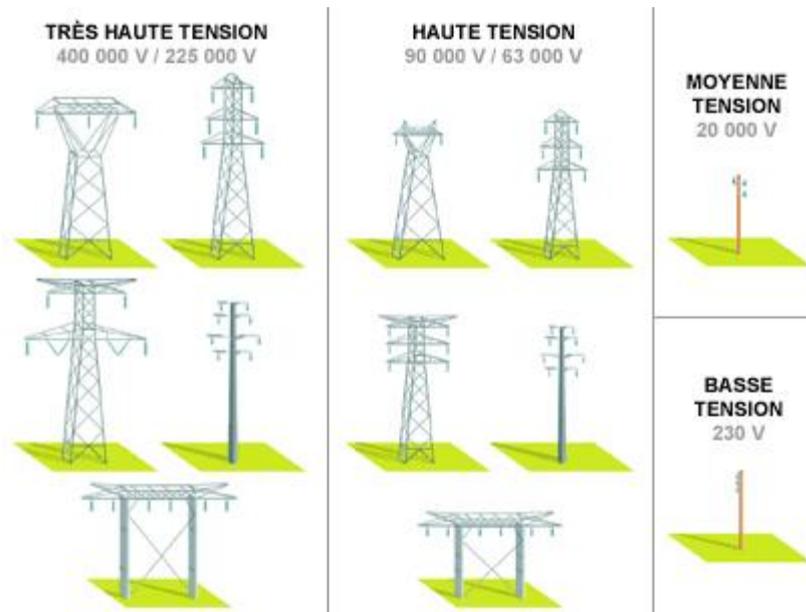


Figure I.4: Type de pylônes

I.10.3.1- Triangle

Les trois conducteurs sont repartis aux sommets d'un triangle équilatéral. Il y a une répartition régulière des conducteurs de phase et de leurs caractéristiques électriques (inductances et capacités) mais une dissymétrie par rapport au sol.

I.10.3.2- Nappe

Les conducteurs sont tous dans un même plan horizontal. Les caractéristiques par rapport au sol sont identiques mais la répartition entre phases est dissymétrique.

I.10.3.3- Drapeau

Dans cette répartition les conducteurs sont dans un même plan vertical. Il n'y plus aucune symétrie dans le calcul des caractéristiques électriques.

I.10.4- Câble de garde

Le câble de garde est constitué d'un ou plusieurs conducteurs d'un diamètre inférieur ou équivalent au conducteur de phase d'une ligne. Il est situé à un niveau supérieur et parallèlement aux conducteurs de phase et relié à la terre par l'intermédiaire à travers le pylône. Il est caractérisé par ses rôles statiques et dynamiques.

I.10.4.1- Rôle statique

Le câble de garde contribue à la réduction du potentiel statique des conducteurs de phases d'une ligne située sous un nuage orageux. [5]

I.10.4.2- Rôle dynamique

Les lignes sont alimentées ou mises à la terre pour des raisons de sécurité. Les rôles dynamiques du câble de garde sont :

- Amortissement des ondes de surtensions de foudre par abaissement de l'impédance caractéristique des conducteurs de phase.
- Blindage contre les surtensions induites par le transport d'énergie électrique en haute tension sur les lignes de télécommunication. [5]

I.11- Schéma équivalent des lignes aériennes

Théoriquement chaque phase d'une ligne aérienne peut être représentée par un circuit équivalent comprenant un ensemble de résistances, d'inductances, de capacités et de conductance. Le schéma équivalent est donné par la figure ci-dessous :

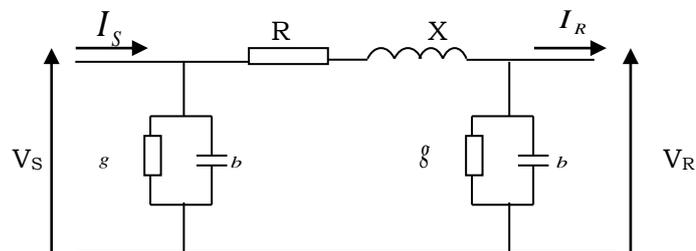


Figure I.5 : Schéma équivalent d'un tronçon de ligne aérienne

Les paramètres longitudinaux sont dus au passage du courant électrique et caractérisé par une impédance :

$$Z = R + jX \quad (I.1)$$

Les paramètres transversaux sont dus aux effets engendrés par le champ électrique et caractérisé par une admittance :

$$Y = g + jb \quad (I.2)$$

$Z[\Omega/m]$: Impédance de la ligne.

$Y[\Omega^{-1}/m]$: Admittance de la ligne.

$R[\Omega/m]$: Résistance de la ligne.

$X[\Omega/m]$: Réactance de la ligne.

$G[\Omega^{-1}/m]$: Conductance de la ligne.

$b[\Omega^{-1}/m]$: Susceptance de la ligne.

$l[Km]$: Longueur de la ligne.

I.12- Paramètres électrique de la ligne

I.12.1- Résistance

La résistance des conducteurs dépendent de la température et de la fréquence.

a. Effet de la température :

Si on note par $\rho(T)$ la résistivité électrique dépendant de la température :

$$\rho(T) = \rho_0(1 - \alpha\Delta T) \quad (I.3)$$

ρ_0 : résistivité à 20°C

La résistance linéique de la ligne est donc :

$$R(T) = \frac{\rho(T)}{S} = \frac{\rho_0(1 - \alpha\Delta T)}{S} \quad (I.4)$$

b. Effet de la fréquence :

Si on note par δ l'épaisseur de peau électromagnétique, telle que :

$$\delta = \sqrt{\frac{\rho}{\mu\pi f}} \quad (I.5)$$

Si le diamètre du conducteur est très grand devant l'épaisseur de peau, la résistance linéique est :

$$R = \frac{\rho}{\pi D \delta} \quad (I.6)$$

$\rho[\Omega.m]$: Résistivité du métal

$S[m^2]$: Section du conducteur

$D[m]$: Diamètre du conducteur

$f [Hz]$: La fréquence du réseau

I.12.2- Inductance

Un conducteur parcouru par courant variable « I » génère un flux magnétique « φ ». La variation de ce dernier est à l'origine de l'apparition de tension induite. Pour tenir compte de ces effets, on définit l'inductance linéique d'un conducteur seul comme suit :

$$L = \frac{\varphi}{I} = \frac{\mu_0}{2\pi} \left(\ln \frac{2h}{D} + \frac{1}{4n} \right) \quad (I.7)$$

$h(m)$: hauteur de la ligne par rapport à la terre.

$D (mm)$: diamètre du conducteur

n : Nombre de conducteurs du faisceau.

I.12.3- Capacité

Le champ électrique établit entre la ligne et la terre est à l'origine de l'apparition de courant capacitif (courant de fuites). Pour tenir compte de ces effets, on définit la capacité telle que :

$$C = \frac{Q}{V} = \frac{2\pi\epsilon_0}{\ln \frac{D}{h}} \quad (I.8)$$

I.13- Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons évoqué quelques généralités sur les réseaux électriques et donné un bref aperçu sur les expressions des paramètres électrique des conducteurs formant une ligne de transport d'énergie. Dans le prochain chapitre, nous résumons les concepts de la compatibilité électromagnétique qui permettent de fixer le niveau du champ électromagnétique généré par les lignes de transport.

2^{ème} CHAPITRE

II-Notions de compatibilité

Electromagnétique

II.1- Introduction

La Compatibilité électromagnétique (CEM) est présente partout à l'état naturel. Il règne à la surface de la terre un champ électrique naturel créé par la présence de charges électriques dans la haute atmosphère. De même pour le champ magnétique terrestre dont l'existence est prouvée par la déviation d'une aiguille aimantée suivant l'axe Nord-Sud. Artificiellement, tout passage de l'énergie électrique dans un conducteur génère à la fois un champ électrique et un champ magnétique. Sachant que ces champs sont relativement néfastes, il faut alors les étudier vis-à-vis de la CEM.

II.2- Définition de la CEM

La CEM est l'aptitude d'un appareil ou d'un système à fonctionner dans son environnement électromagnétique de façon satisfaisante, sans émettre des perturbations insupportables ni être perturbé par les autres appareils.

II.3- Acteurs de la CEM

Les acteurs qui mettent en évidence la CEM sont : Source, Couplage et Victime. Le schéma de la figure II.1, la position de ces acteurs dans un processus d'étude de la CEM.



Figure II.1: Acteurs de la CEM

II.3.1- Source

II.3.1.1- Définition

Tout appareil, qui émet une perturbation électromagnétique, est qualifié de source. Parmi les principales causes de perturbations, on cite ; la distribution d'énergie électrique, les ondes hertziennes, les décharges électrostatiques et la foudre. [6]

II.3.1.2- Réseaux électriques comme source

La tension et le courant génèrent respectivement des champs électrique et magnétique. Le transit de l'énergie mise en jeu étant à basse fréquence, les champs

électrique et magnétique sont alors indépendants ; il s'agit des champs proches où le calcul se fait séparément.

Des coupures brèves de l'énergie (dV/dt ou dI/dt), génèrent des champs électrique et magnétique à haute fréquence ; on parle alors de champ lointain où les champs électrique et magnétique sont étroitement liés par une onde électromagnétique.

II.3.2- Couplage

II.3.2.1- Définition

Le couplage est le chemin de transmission des perturbations électromagnétiques de la source vers la victime. [6]

II.3.2.2- Chemin de couplage dans les réseaux électriques

Les conducteurs de la ligne sont des chemins de couplage. Ils peuvent conduire les harmoniques issus des variations ou des chocs de foudre.

L'air environnant est aussi un chemin de propagation car c'est un support des champs magnétique et électrique.

II.3.2.3- Types de milieux

a. Milieu conducteur

Un milieu conducteur est décrit, localement à la matière, par la loi d'Ohm.

$$\vec{J} = \sigma \vec{E} \quad (II.1)$$

σ : Conductivité électrique [$\Omega \cdot m^{-1}$].

La loi d'Ohm, est $U = RI$, pour les circuits électriques devient :

Pour une tension sinusoïdale et en notation complexe la loi se généralise $U = ZI$ où Z est l'impédance.

b. Milieu isolant

Un milieu isolant est caractérisé par une conductance nulle, donc aucun courant électrique.

c. Milieu magnétique

Un milieu magnétique favorise la circulation du champ magnétique. Il est caractérisé par :

$$\begin{cases} B = \mu H \\ \mu = \mu_0 \mu_r \end{cases} \quad (II.2)$$

μ_r : Perméabilité magnétique relative du milieu

$\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7} [H / m]$ Perméabilité magnétique du vide

d. Milieu diélectrique

Un milieu diélectrique favorise la circulation du champ électrique. Il est caractérisé par :

$$\begin{cases} \vec{D} = \varepsilon \vec{E} \\ \varepsilon = \varepsilon_0 \varepsilon_r \end{cases} \quad (II.3)$$

ε : Permittivité diélectrique appelée aussi constante diélectrique

$\varepsilon_0 = 10^{-9} / 36 \pi [F / m]$: Permittivité diélectrique du vide.

ε_r : Permittivité diélectrique relative du milieu

II.3.3- Victime

II.3.3.1- Définition

La victime, dans la trilogie source/couplage/victime, représente tout matériel susceptible d'être perturbé. [6]

II.3.3.2- Réseaux électriques comme victime

Les coups de foudre sont des perturbations naturelles caractérisés par des décharges électriques ; lorsqu'elles touchent les lignes de transport d'énergie, ces derniers deviennent des victimes.

II.4- - Modes de couplage

II.4.1- Mode commun

Le mode commun correspond souvent à un mode parasite. Sa tension est définie comme étant égale à la valeur moyenne de la tension entre les différents fils et la masse. Le courant de mode commun se divise entre les différents fils de liaison dans le même sens. Il est égal au courant qui s'écoule à la masse. [7]

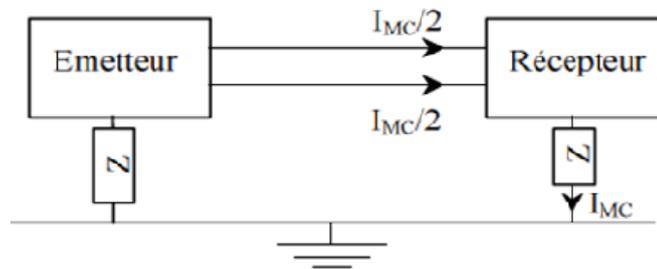


Figure II.2: Mode commun

II.4.2- Mode différentiel

Les signaux utiles sont généralement transmis en mode différentiel. Le courant différentiel se boucle sur les deux fils de liaison. Il circule en sens opposé sur chacun des fils. [7]

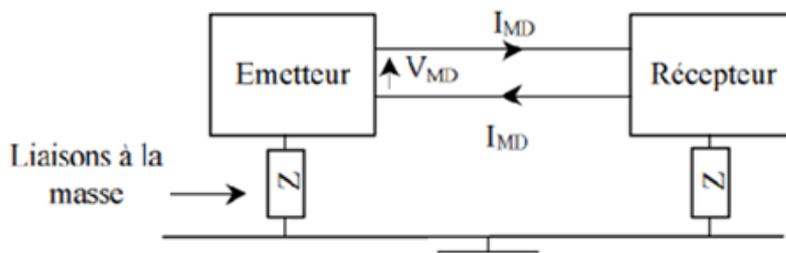


Figure II.3 : Mode différentiel

Il est difficile de filtrer une perturbation en mode différentielle si le signal utile à la même fréquence que la perturbation. Il faut donc éviter que ce mode de couplage puisse se produire. [7]

II.5- Types de couplages :

En peut citer trois types de couplages:

- Couplage par conduction qui se traduit par la circulation d'un courant perturbateur.
- Couplage par rayonnement qui se transmet par le champ électrique, ou magnétique B ou électromagnétique (E, B).
- Couplage par ionisation qui se transmet à travers une décharge électrique dont le courant est constant. Le schéma(II.2) montre les différent mode de couplage. [7]

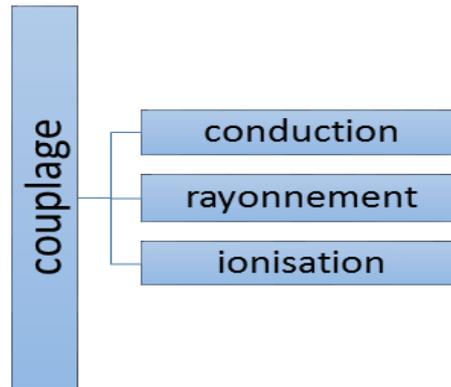


Figure II.4 : Modes de couplage

II.5.1- Couplage par conduction (impédance commune)

II.5.1.1- Définition

Le couplage par conduction est mis en évidence lorsqu'un courant circule entre deux sous-systèmes d'un système électrique à travers des impédances communes constituées caractérisé par un milieu conducteur (résistances et réactances).

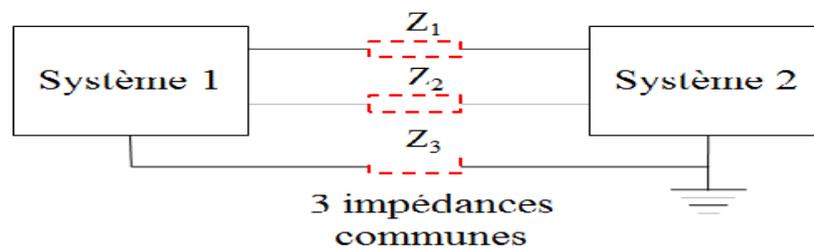


Figure II.5 : Impédance commune

II.5.1.2- Liaison directe ou perturbations directement conduites

La perturbation provoquée est transmise directement à la victime sans qu'elle soit modifiée. En peut citer quelque perturbation causée sont les suivent:

a. Variation rapide de tension

Elle est causée principalement par des défauts où la tension peut augmenter ou diminuer de quelques pourcent dont la durée est de quelques (ms).

b. Variation lente de tension

Causée principalement par la variation la charge sur le réseau de distribution dont la durée peut atteindre plusieurs secondes. [7]

c. Creux ou microcoupures de tension

Causées par des défauts sur les lignes d'alimentation, orage, vent (contact bref entre les lignes) pendant une durée comprise entre 1ms et 1s.

d. Surtension

Produite soit localement par une variation rapide du courant traversant un circuit inductif ou par résonance du circuit LC, (coupure due à un défaut, délestage du réseau, ...). [7]

II.5.1.3- Couplage d'un champ électrique avec un conducteur

Un champ électrique variable engendre, sur les conducteurs parallèles à ses lignes de champ, un courant électrique. Ce phénomène est appelé couplage champ à câble.

Dans le cas du réseau filaire cuivré, les lignes aériennes se comportent comme de véritables antennes vis-à-vis des multiples champs électriques alentours, qui y induisent des courants parasites de mode commun.

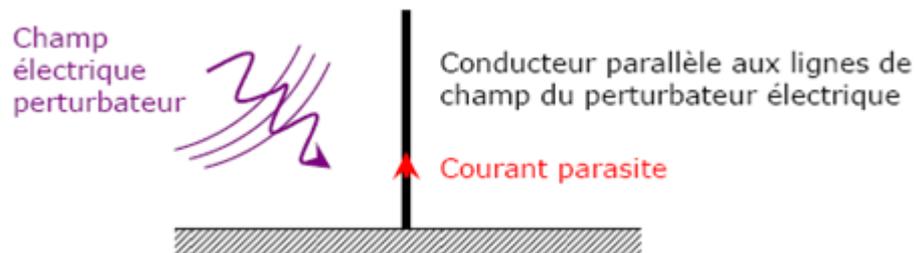


Figure II.6 : Couplage d'un champ électrique avec un conducteur*

II.5.1.4- Couplage d'un champ magnétique avec une boucle

Un champ magnétique variable traversant une boucle y induit un flux magnétique variable dont toute variation crée une différence de potentiel contre électromotrice. Ce phénomène est appelé couplage champ à boucle.

Dans le cas d'une ligne monofilaire, un courant de mode commun peut être induit par un champ magnétique externe dans la boucle formée par le câble, le plan

de terre et les impédances de connexion des équipements à la terre. Ce mécanisme est présenté sur la figure II.8.

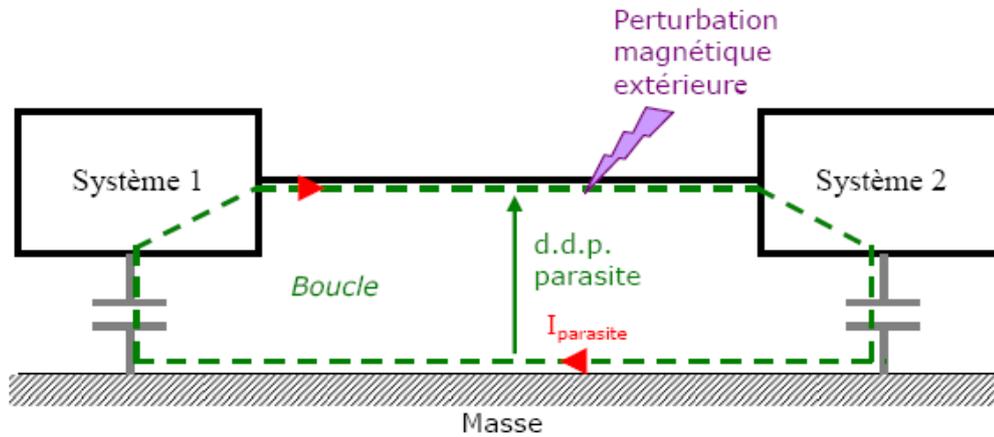


Figure II.7 : Couplage d'un champ magnétique avec la boucle

II.5.2- Couplage par rayonnement

Le schéma de la figure II.5. au-dessous montre ce dernier

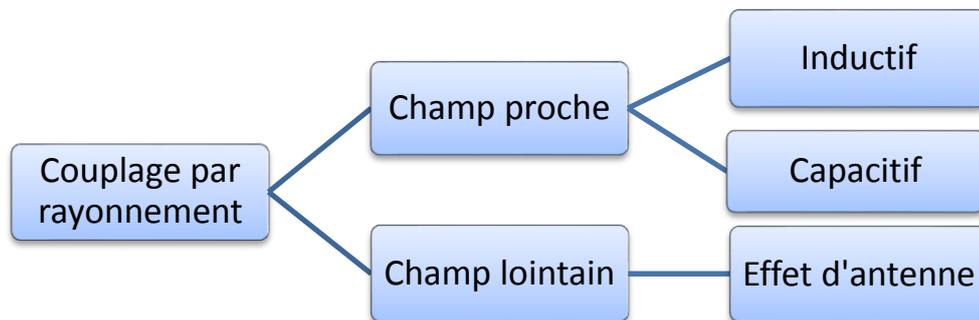


Figure II.8: Couplage par rayonnement

II.5.2.1- La zone de champs lointains

Dans la zone lointaine de l'émetteur ($> \lambda/6$), où la fréquence est élevée, le champ électrique et le champ magnétique sont perpendiculaires à la fois entre eux et à la direction de propagation. Leur mesure et leur calcul se font d'une manière couplées. Ils forment une onde électromagnétique.

II.5.2.2- La zone de champs proche

Dans la zone proche de l'émetteur où la fréquence est faible, le champ électrique et le champ magnétique sont découplés et agissent indépendamment les uns des autres et sont mesurables et se calculent séparément.

II.5.3- Couplage inductif

II.5.3.1- Equations mise en jeux

Une circulation du courant dans un conducteur crée un champ magnétique qui rayonne autour de ce dernier. [6]

Dans le cas de configurations symétriques, le champ se calcule par le théorème d'Ampère :

$$\oint_C \vec{B} d\vec{l} = \mu_0 \sum_i^N I_i = N\mu_0 I \quad (II.4)$$

Dans le cas de configurations qui ne présentent aucune symétrie, le champ se calcule par la formule de Biot et Savart:

$$\vec{B} = \frac{\mu_0}{4\pi} \int \frac{Id\vec{l} \times \vec{r}}{r^3} \quad (II.5)$$

Quand un champ magnétique traverse circuit formant une surface, le flux génère une tension induite décrite par la loi de Faraday.

$$e = -\frac{d\phi}{dt} = -S \frac{dB}{dt} \quad (II.6)$$

II.5.3.2- Couplage par diaphonie inductive

La diaphonie est un mode de couplage qui se rapproche du couplage champ à câble.

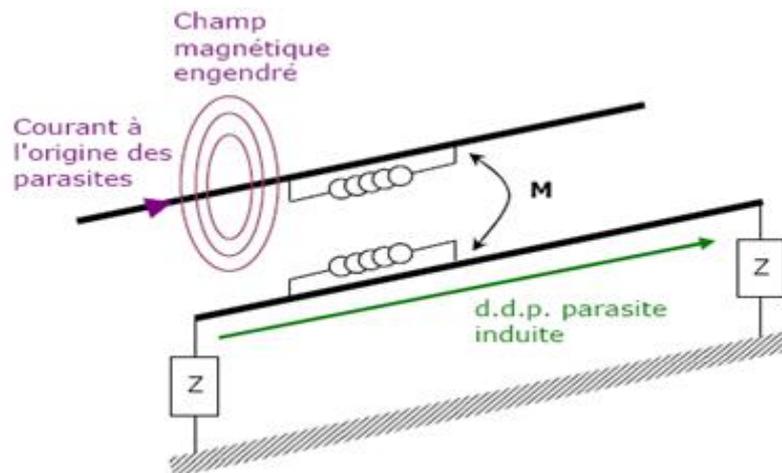


Figure II.9 : Diaphonie inductive

Le courant qui circule dans un fil génère un champ magnétique. Ce champ, s'il est variable, génère à son tour une différence de potentiel contre électromotrice dans les boucles voisines.

II.5.4- Couplage capacitif

II.5.4.1- Equations mises en jeux

Toute différence de potentiel entre deux éléments, causée par une différence de charges électriques, va générer un champ électrique sous la loi de Gauss :

$$\int_s \vec{E} \cdot d\vec{S} = \frac{\sum Q}{\epsilon_0} \quad (II.7)$$

Le champ électrique et les différents potentiels sont liés par :

$$\vec{E} = -\text{grad}V \quad (II.8)$$

II.5.4.2- Couplage par diaphonie capacitive

La différence de potentiel entre un conducteur et son environnement génère autour de ce conducteur un champ électrique. Ce champ, s'il est variable, peut se coupler dans une autre structure filaire qui lui est parallèle et génère à son tour un courant. Ce courant parasite sera d'autant plus élevé que la tension et la fréquence de ce courant sont élevées.

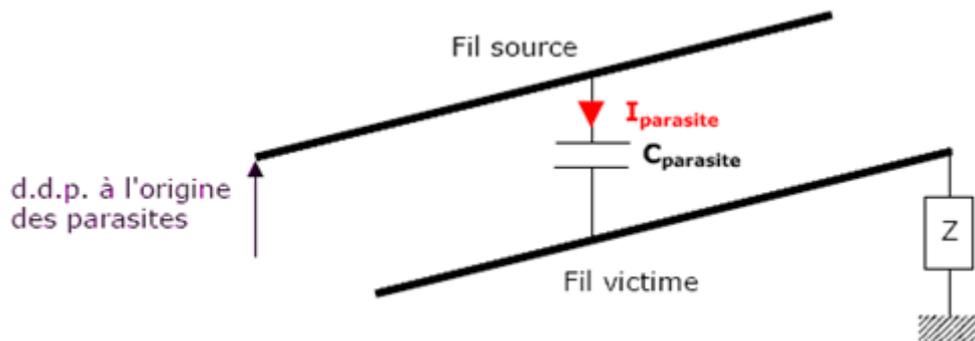


Figure II.10 : Couplage par diaphonie capacitive

II.5.4.3- Couplage d'un conducteur à un plan de masse

La capacité entre deux conducteurs voisins n'est jamais nulle. Sous l'action d'une perturbation extérieure, une différence de potentiel peut être engendrée entre ces deux conducteurs, donnant naissance à un courant de mode commun entre les deux systèmes. Ce phénomène est appelé couplage conducteur à plan de masse.

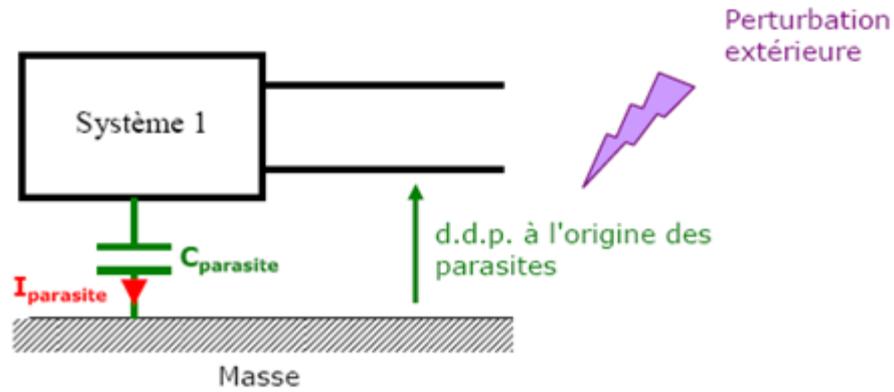


Figure II.11 : Couplage conducteur - plan de masse

II.5.5- Couplage par ionisation

Ce couplage concerne les milieux ionisés soit par la chaleur ou par l'humidité.

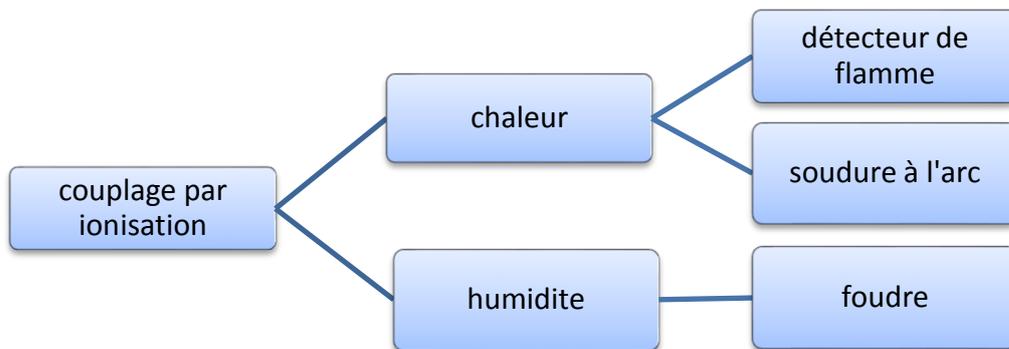


Figure II.12: Couplage par ionisation

II.6- Effets de la géométrie

II.6.1- Effet pelliculaire (Effet de peau)

En courant alternatif, la densité de courant est maximale sur la surface d'un conducteur et décroît vers l'intérieur du conducteur. Ce phénomène, appelé "effet pelliculaire" ou "effet Kelvin", modifie les pertes par effet Joule et la réactance interne des conducteurs.

L'amortissement des courants de Foucault dans le matériau, dans le cas simple d'une onde plane harmonique d'incidence nulle, décroît exponentiellement en fonction de la profondeur du matériau. [7]

L'épaisseur où circule le courant est donnée par:

$$\delta = \sqrt{\frac{2}{\mu\sigma\omega}} = \frac{1}{\sqrt{\mu\sigma\pi f}} \quad (\text{II.9})$$

II.6.2- Effet de proximité

Dans une ligne monophasée, le courant circulant dans l'un des conducteurs, a tendance à se concentrer dans la région en regard de l'autre conducteur. [4]

II.6.3- Effet de couronne

Il s'agit d'un phénomène appelé « effet couronne ». Tout près des fils, le champ électrique est très intense ; ce qui crée une multitude des petites décharges électriques dans l'air à proximité. L'effet couronne est très local puisqu'il ne se produit qu'à quelques centimètre des conducteurs. Il augmente par mauvais temps et produit alors un faible bruit.

Nous pouvons aussi en percevoir l'effet sous forme de perturbation des ondes radio lorsque nous passons en voiture sous la ligne. [4]

II.6.4- Effet de bord

Appelé aussi l'effet de proximité, il est souvent à l'origine de la déformation des lignes de champs électromagnétiques. On le retrouve à proximité des pylônes et isolateurs. Il est inexistant au milieu de la ligne.

II.7- Norme de la CEM

Dans de nombreux domaines d'activité, l'action des perturbations électromagnétiques sur les systèmes électriques peut entraîner des dysfonctionnements ; c'est pourquoi la validation de la compatibilité électromagnétique (CEM) des systèmes, qui suit les phases de conception et développement, est basée sur l'application de normes bien définies.

II.7.1- Limite admissible du champ électromagnétique

II.7.1.1- Sur l'être humaine

Relativement à l'électricité de 50/60 Hz, les valeurs limites, en fonction des effets immédiats que peuvent avoir sur l'être humain les champs électriques et magnétiques sont de 100μT pour le champ magnétique et de 5 kV/m pour le champ électrique. Ces valeurs ne tiennent compte que de la protection contre les effets

thermiques (chaleur) et non des effets biologiques liés à une exposition sur le long terme. [11]

En ce qui concerne l'exposition chronique, les valeurs limites sont de 10V/m pour le champ électrique et de 0.2 μ T pour le champ magnétique.

Pendant le sommeil, les individus sont plus sensibles aux champs électromagnétiques. Dans ce cas, les limites doivent être bien plus basses dans des lieux de repos. Elles sont de 5V/m pour le champ électrique et 0.05 μ T pour le champ magnétique. [11]

II.7.1.2- Sur le matériel

Considérons la norme 55022 qui concerne une catégorie importante d'appareils électriques et les appareils de traitement de l'information. Cette norme est directement dérivée de la publication n°22 du CISPR et distingue deux classes d'appareils : [11]

- Les appareils de classe A qui sont destinés à être utilisés en milieu industriel, commercial ou d'affaires ;
- Les appareils de classe B qui sont destinés à être utilisés dans des locaux d'habitation.

A des fins de sécurité pour préserver la santé humaine ou des biens matériels, la directive 89/336/CEE, relative au rapprochement des législations des états membre, impose une réglementation vis-à-vis de la comparabilité électromagnétique. [11]

II.8- Conclusion

Ce chapitre a été l'objet d'une brève introduction à la compatibilité électromagnétique où nous avons traité seulement les concepts susceptibles d'intervenir dans les réseaux électriques.

3^{ème} CHAPITRE

**III- Modélisation et expression des champs
électrique et magnétique**

III.1- Introduction

Dans ce chapitre, nous nous intéressons au calcul des champs électrique et magnétique générés par les câbles aériens de transport d'énergie électrique. Nous calculons les champs de chaque phase et pour les trois topologies de ligne (verticale, horizontale et triangle). Pour chacune de ces dernières, nous utilisons le théorème de superposition pour évaluer le champ global en triphasé.

III.2- Système triphasé équilibrée

Les réseaux électriques sont équilibrés si les amplitudes des courants de chaque phase ainsi que les amplitudes des tensions entre phases et terre sont égaux. Un système triphasé équilibré se traduit par les systèmes d'équations suivants :

$$\text{Tension : } \begin{cases} \bar{V}_1 = V\sqrt{2} \sin(\omega t + \varphi) \\ \bar{V}_2 = V\sqrt{2} \sin(\omega t + \varphi - 2\pi/3) = a\sqrt{2}V \\ \bar{V}_3 = V\sqrt{2} \sin(\omega t + \varphi - 4\pi/3) = a^2\sqrt{2}V \end{cases} \Rightarrow \begin{cases} V_1 = \sqrt{2}V \\ V_2 = a\sqrt{2}V \\ V_3 = a^2\sqrt{2}V \end{cases} \quad (\text{III.1})$$

$$\text{Courant : } \begin{cases} \bar{I}_1 = I\sqrt{2} \sin \omega t \\ \bar{I}_2 = I\sqrt{2} \sin(\omega t - 2\pi/3) \\ \bar{I}_3 = I\sqrt{2} \sin(\omega t - 4\pi/3) \end{cases} \Rightarrow \begin{cases} I_1 = I\sqrt{2} \\ I_2 = a\sqrt{2}I \\ I_3 = a^2\sqrt{2}I \end{cases} \quad (\text{III.2})$$

Où $a = e^{-j\frac{2\pi}{3}}$

I et V : sont respectivement les valeurs efficaces de courant et de tension.

φ : Le déphasage entre la tension et le courant.

III.3- Calcul du champ magnétique

Pour calculer le champ magnétique au voisinage d'une ligne de transport d'énergie, nous considérons une ligne parcourue par un courant électrique.

III.3.1- Hypothèses

- Les conducteurs sont de forme cylindrique dont le rayon est très faible devant la longueur et la hauteur par rapport du sol.
- Les conducteurs suspendus entre deux pylônes sont bien droits ou la flèche est négligée.
- L'effet de peau et de proximité sont négligées.

III.3.2- Champ généré par un conducteur de longueur infini

Soit un conducteur de longueur infinie dirigé suivant l'axe (Oz) et parcouru par un courant d'intensité I .

L'étude des symétries et les invariances révèlent que le champ magnétique est :

- angulaire autour de (Oz) ,
- ne dépend pas de la variable longitudinale (z) et angulaire (θ)

Donc, il prend la forme : $\vec{B}(r) = B_\theta(r)\vec{e}_\theta$

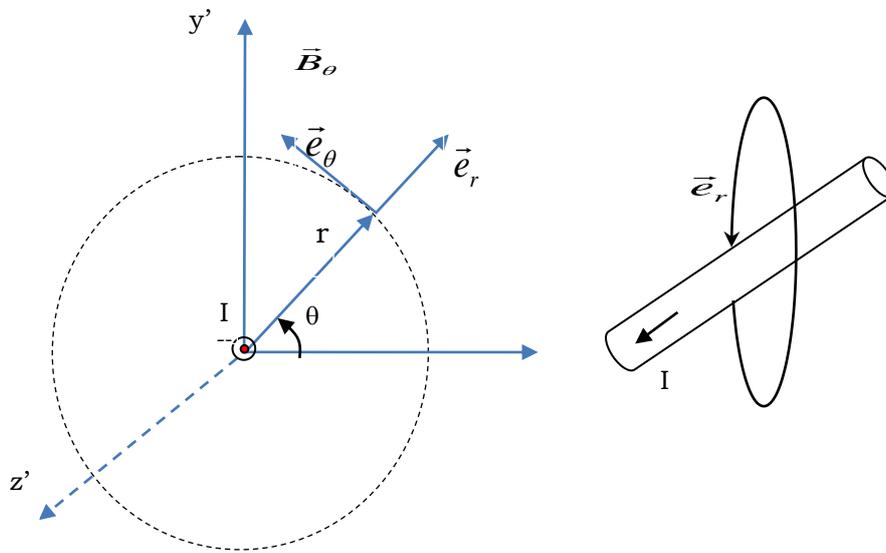


Figure III.1 : Model géométrique

Le fait le système est à symétrie de révolution, le théorème d'Ampère (équation II.8) peut s'appliquer et donne l'expression ci-dessous :

$$\vec{B}(r) = B_\theta(r)\vec{e}_\theta = \frac{\mu_0 I}{2\pi r}\vec{e}_\theta \quad (\text{III.3})$$

En tenant compte de la transformation des coordonnées cylindriques en coordonnées cartésiennes, dont les repères sont liés au conducteur, telle que :

$$\vec{e}_\theta = -\sin\theta\vec{e}_x + \cos\theta\vec{e}_y \quad (\text{III.4})$$

On arrive à l'expression du champ magnétique en coordonnées cartésiennes :

$$\vec{B}(x', y') = B_x(x', y')\vec{e}_x + B_y(x', y')\vec{e}_y \Rightarrow \begin{cases} B_x(x', y') = -\frac{\mu_0 I}{2\pi} \frac{y'}{x'^2 + y'^2} & \text{(a)} \\ B_y(x', y') = \frac{\mu_0 I}{2\pi} \frac{x'}{x'^2 + y'^2} & \text{(b)} \end{cases} \quad (\text{III.5})$$

III.3.3- Dédution du potentiel vecteur magnétique

A partir de l'équation Maxwell-Thomson :

$$\text{div}\vec{B} = 0 \quad (\text{III.6})$$

On définit le potentiel vecteur magnétique, tel que :

$$\vec{B} = r\vec{\otimes}t\vec{A} \quad (\text{III.7})$$

En coordonnées cylindriques l'expression (III.6), s'écrit :

$$\vec{B} = \left(\frac{1}{r} \frac{\partial A_z}{\partial \theta} - \frac{\partial A_\theta}{\partial z} \right) \vec{e}_r + \left(\frac{\partial A_r}{\partial z} - \frac{\partial A_z}{\partial r} \right) \vec{e}_\theta + \frac{1}{r} \left(\frac{\partial(rA_\theta)}{\partial r} - \frac{\partial A_r}{\partial \theta} \right) \vec{e}_z \quad (\text{III.8})$$

Le fait que l'induction est angulaire et ne dépend que de r, l'équation (III.8) se réduit à :

$$\vec{B}_\theta(r) = -\frac{\partial A_z(r)}{\partial r} \vec{e}_\theta \quad (\text{III.9})$$

La solution de l'équation (III.9) donne :

$$A_z(r) = -\frac{\mu_0 I}{2\pi} \ln r + k \quad (\text{III.10})$$

En coordonnées cartésiennes, le potentiel se réécrit :

$$A_z(x, y) = -\frac{\mu_0 I}{2\pi} \ln \sqrt{x'^2 + y'^2} + k \quad (\text{III.11})$$

La constante k est déterminé par les conditions aux limites où $A_z(x, y) = 0$ pour $y=h$ et $x=h$

Dans ces conditions, l'expression finale du potentiel vecteur magnétique est :

$$A_x(x, y) = \frac{\mu_0 I}{2\pi} \ln \left(\frac{\sqrt{2}h}{\sqrt{x'^2 + y'^2}} \right) \quad (\text{III.12})$$

III.3.4- Champ magnétique triphasé

Soit trois conducteurs rectilignement parallèles et parcourus par des courants triphasés dans le même sens. D'une manière générale, on peut réécrire les expressions (III.3) et (III.5) comme suit :

$$B_i = \frac{\mu_0 I_i}{2\pi r_i} ; r_i = \sqrt{x_i'^2 + y_i'^2} \text{ pour } i = 1, 2, 3 \quad (\text{III.13})$$

$$\begin{cases} B_{ix}(x', y') = -\frac{\mu_0 I_i}{2\pi} \frac{y_i'}{x_i'^2 + y_i'^2} & \text{(a)} \\ B_{iy}(x', y') = \frac{\mu_0 I_i}{2\pi} \frac{x_i'}{x_i'^2 + y_i'^2} & \text{(b)} \end{cases} \quad (\text{III.14})$$

Nous calculons le champ magnétique pour les trois configurations : disposition verticale, disposition horizontale et trèfle (triangulaire).

III.3.5- Disposition verticale

En exprimant les variables (x'_i, y'_i) en fonction des coordonnées (x_i, y_i) , relativement à la figure (III.2), telles que :

$$\begin{cases} x'_1 = x \\ x'_2 = x \\ x'_3 = x \end{cases} \text{ et } \begin{cases} y'_1 = h - y \\ y'_2 = h + d - y \\ y'_3 = h + 2d - y \end{cases} \quad (\text{III.15})$$

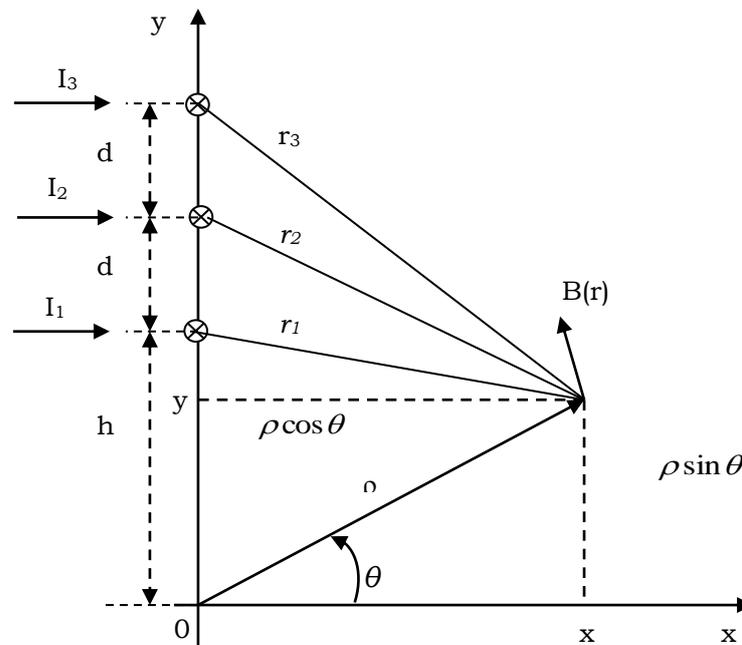


Figure III.2 : Conducteurs disposés en disposition verticale

On arrive aux expressions des composantes du champ magnétique :

$$\left\{ \begin{array}{l} B_{1x}(x, y) = \frac{\mu_0 I}{2\pi} \frac{y-h}{x^2 + (y-h)^2} \quad (a) \\ B_{2x}(x, y) = \frac{\mu_0 I}{2\pi} \frac{y-h-d}{x^2 + (y-h-d)^2} \quad (b) \text{ et} \\ B_{3x}(x, y) = -\frac{\mu_0 I}{2\pi} \frac{y-h-2d}{x^2 + (y-h-2d)^2} \quad (a) \end{array} \right. \left\{ \begin{array}{l} B_{1y}(x, y) = \frac{\mu_0 I}{2\pi} \frac{x}{x^2 + (y-h)^2} \quad (a) \\ B_{2y}(x, y) = \frac{\mu_0 I}{2\pi} \frac{x}{x^2 + (y-h-d)^2} \quad (b) \\ B_{3y}(x, y) = -\frac{\mu_0 I}{2\pi} \frac{x}{x^2 + (y-h-2d)^2} \quad (a) \end{array} \right. \quad (III.16)$$

L'expression du potentiel vecteur magnétique est :

$$\left\{ \begin{array}{l} A_1(x, y) = \frac{\mu_0 I}{2\pi} \ln \left(\frac{\sqrt{2}h}{\sqrt{x^2 + (y-h)^2}} \right) \quad (a) \\ A_2(x, y) = \frac{\mu_0 I}{2\pi} \ln \left(\frac{\sqrt{2}h}{\sqrt{x^2 + (y-h-d)^2}} \right) \quad (b) \\ A_3(x, y) = \frac{\mu_0 I}{2\pi} \ln \left(\frac{\sqrt{2}h}{\sqrt{x^2 + (y-h-2d)^2}} \right) \quad (c) \end{array} \right. \quad (III.17)$$

III.3.6- Disposition horizontale

En exprimant les variables (x'_i, y'_i) en fonction des coordonnées (x_i, y_i) , telles que (figure III.3) :

$$\left\{ \begin{array}{l} x'_1 = x + d \\ x'_2 = x \\ x'_3 = d - x \end{array} \right. \text{ et } \left\{ \begin{array}{l} y'_1 = h - y \\ y'_2 = h - y \\ y'_3 = h - y \end{array} \right. \quad (III.18)$$

On exprime les composantes du champ magnétique d'une disposition horizontale :

$$\left\{ \begin{array}{l} B_{1x}(x, y) = \frac{\mu_0 I}{2\pi} \frac{y-h}{(x+d)^2 + (y-h)^2} \quad (a) \\ B_{2x}(x, y) = \frac{\mu_0 I}{2\pi} \frac{y-h}{x^2 + (y-h)^2} \quad (b) \text{ et} \\ B_{3x}(x, y) = -\frac{\mu_0 I}{2\pi} \frac{y-h}{(x-d)^2 + (y-h)^2} \quad (a) \end{array} \right. \left\{ \begin{array}{l} B_{1y}(x, y) = \frac{\mu_0 I}{2\pi} \frac{x+d}{(x+d)^2 + (y-h)^2} \quad (a) \\ B_{2y}(x, y) = \frac{\mu_0 I}{2\pi} \frac{x}{x^2 + (y-h)^2} \quad (b) \\ B_{3y}(x, y) = -\frac{\mu_0 I}{2\pi} \frac{d-x}{(x-d)^2 + (y-h)^2} \quad (a) \end{array} \right. \quad (III.19)$$

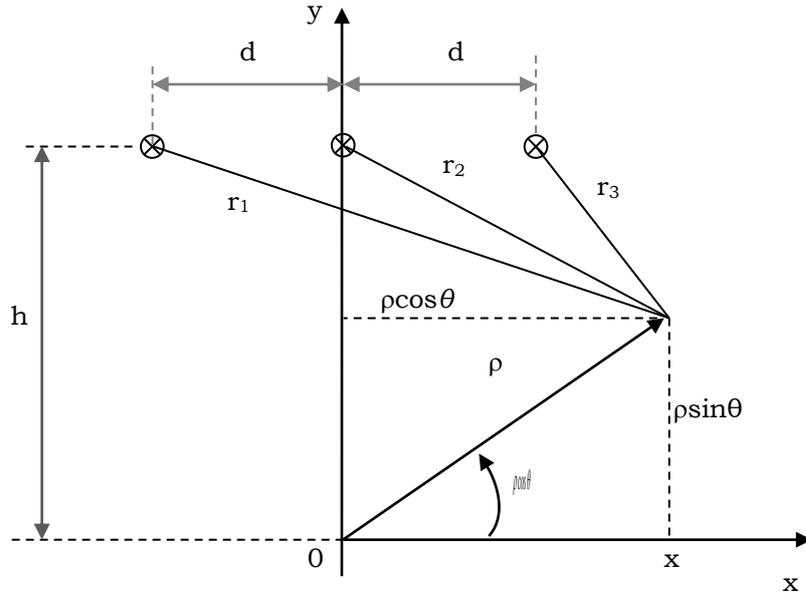


Figure III.3 : Conducteurs disposés en disposition horizontale

L'expression du potentiel vecteur magnétique est :

$$\begin{cases}
 A_1(x, y) = \frac{\mu_0 I}{2\pi} \ln \left(\frac{\sqrt{2}h}{\sqrt{(x+d)^2 + (y-h)^2}} \right) & \text{(a)} \\
 A_2(x, y) = \frac{\mu_0 I}{2\pi} \ln \left(\frac{\sqrt{2}h}{\sqrt{x^2 + (y-h)^2}} \right) & \text{(b)} \\
 A_3(x, y) = \frac{\mu_0 I}{2\pi} \ln \left(\frac{\sqrt{2}h}{\sqrt{(x-d)^2 + (y-h)^2}} \right) & \text{(c)}
 \end{cases} \quad \text{(III.20)}$$

III.3.7- Disposition triangulaire

En exprimant les variables (x'_i, y'_i) en fonction des coordonnées (x_i, y_i) , telles que (figure III.6) :

$$\begin{cases}
 x'_1 = x & y'_1 = h + 0.86d - y \\
 x'_2 = x + 0.5d & y'_2 = h - y \\
 x'_3 = x - 0.5d & y'_3 = h - y
 \end{cases} \quad \text{(III.21)}$$

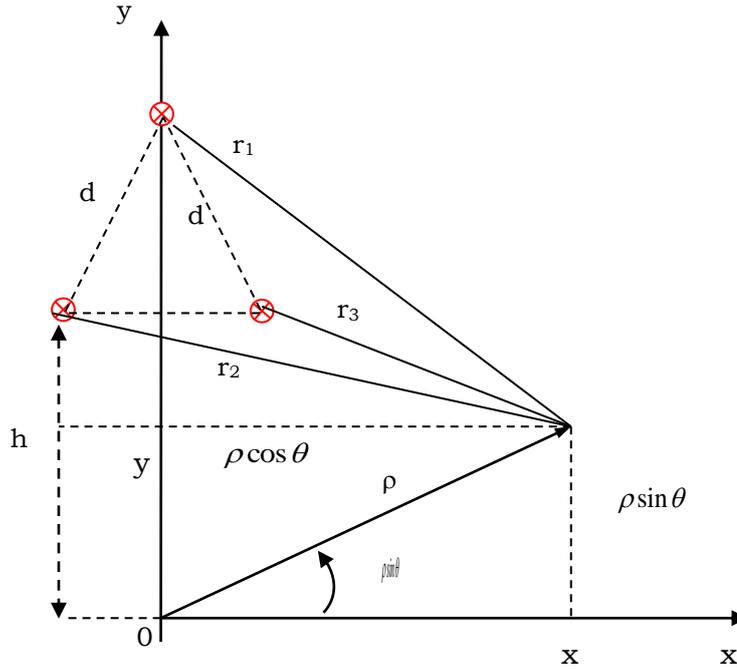


Figure III.4 : Disposition triangulaire

On exprime les composantes du champ magnétique d'une disposition horizontale :

$$\left\{ \begin{array}{l} B_{1x} = \frac{\mu_0 I}{2\pi} \frac{y-h-0.86d}{x^2 + (y-h-0.86d)^2} \quad (a) \\ B_{2x} = \frac{\mu_0 I}{2\pi} \frac{y-h}{(x+0.5d)^2 + (y-h)^2} \quad (b) \text{ et} \\ B_{3x} = \frac{\mu_0 I}{2\pi} \frac{y-h}{(x-0.5d)^2 + (y-h)^2} \quad (a) \end{array} \right. \left\{ \begin{array}{l} B_{1y} = \frac{\mu_0 I}{2\pi} \frac{x}{x^2 + (y-h-0.86d)^2} \quad (a) \\ B_{2y} = \frac{\mu_0 I}{2\pi} \frac{x+0.5d}{(x+0.5d)^2 + (y-h)^2} \quad (b) \\ B_{3y} = \frac{\mu_0 I}{2\pi} \frac{x-0.5d}{(x-0.5d)^2 + (y-h)^2} \quad (a) \end{array} \right. \quad (III.22)$$

Les expressions du potentiel vecteur magnétique pour les trois conducteurs sont :

$$\left\{ \begin{array}{l} A_1(x, y) = \frac{\mu_0 I}{2\pi} \ln \left(\frac{\sqrt{2}h}{\sqrt{x^2 + (y-h-0.86d)^2}} \right) \quad (a) \\ A_2(x, y) = \frac{\mu_0 I}{2\pi} \ln \left(\frac{\sqrt{2}h}{\sqrt{(x+0.5d)^2 + (y-h)^2}} \right) \quad (b) \\ A_3(x, y) = \frac{\mu_0 I}{2\pi} \ln \left(\frac{\sqrt{2}h}{\sqrt{(x-0.5d)^2 + (y-h)^2}} \right) \quad (c) \end{array} \right. \quad (III.23)$$

III.4- Conducteur semi-fini

Un conducteur semi-fini est une partie de la ligne qui est proche du pylône. Autrement dit, le conducteur est fini du côté pylône et il est infini du côté inverse. Dans ce genre de configurations l'effet de bord n'est pas négligé.

Le fait que la configuration ne présentant pas de symétrie, le théorème d'Ampère ne s'applique pas. Alors on fait appel à la loi de Biot et Savart (équ. II.9).

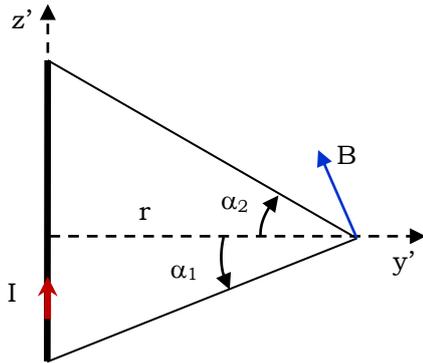


Figure III.5 : Conducteur fini

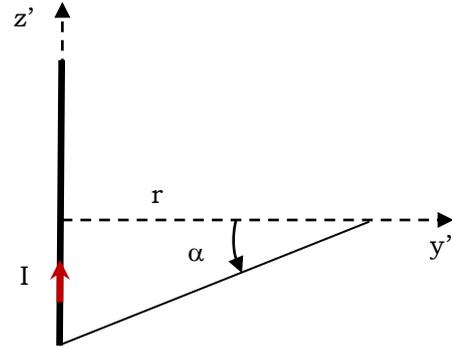


Figure III.6 : Conducteur semi-fini

Pour un conducteur fini, le champ magnétique est donné par :

$$\vec{B} = \frac{\mu_0 I}{4\pi r} (\sin \alpha_2 - \sin \alpha_1) \vec{e}_\theta \quad (\text{III.24})$$

Pour un fil semi-fini où $\alpha_1 = \alpha$ et $\alpha_2 = \pi/2$, l'expression du champ devient :

$$\vec{B} = \frac{\mu_0 I}{4\pi r} (1 - \sin \alpha) \vec{e}_\theta \quad (\text{III.25})$$

D'après la figure III.6, le champ se réécrit :

$$\vec{B} = \frac{\mu_0 I}{4\pi r} \left(1 - \frac{z}{r}\right) \vec{e}_\theta \quad (\text{III.26})$$

En tenant compte de la relation (III.4), et en multipliant et en divisant par (r) le second membre de l'équation (III.27), on arrive :

$$\vec{B} = \frac{\mu_0 I}{4\pi (x'^2 + y'^2)} \left(1 - \frac{z'}{\sqrt{x'^2 + y'^2}}\right) (-y' \vec{e}_x + x' \vec{e}_y) \quad (\text{III.27})$$

Ainsi, les composantes du champ magnétique s'écrivent :

$$\begin{cases} B_x = -\frac{\mu_0 I}{4\pi(x'^2 + y'^2)} \left(1 - \frac{z'}{\sqrt{x'^2 + y'^2}}\right) y' & \text{(a)} \\ B_y = \frac{\mu_0 I}{4\pi(x'^2 + y'^2)} \left(1 - \frac{z'}{\sqrt{x'^2 + y'^2}}\right) x' & \text{(b)} \end{cases} \quad \text{(III.28)}$$

On remarque que le champ magnétique dépend de la variable (z) contrairement au champ issu d'un câble infini.

Pour traiter les trois configurations de dispositions triphasées (verticale, horizontale et triangle), il suffit de faire le changement de coordonnées donné par les équations respectives (équ.III. 16, équ.III. 19 et équ.III. 22) auxquelles il faut ajouter le changement de la variable longitudinale ($z'=z$).

III.5- Expression du champ électrique

III.5.1- Conducteur infini

Pour exprimer le champ électrique généré par la tension de la ligne, on applique le théorème de Gauss à un conducteur cylindrique plein d'axe (oz), de diamètre D et de longueur infini.

Certaines hypothèses sont nécessaires :

- A l'intérieur du conducteur où circule le courant, la charge électrique est nulle,
- Le conducteur est supposé chargé uniformément en surface de densité λ .
- La charge surfacique par unité de longueur est : $Q = \pi D \lambda$

On en déduit que le champ électrique est radial et ne dépend que de r : $\vec{E} = E_r \vec{e}_r$

L'application du théorème de Gauss (équ. II.10), donne l'expression du champ électrique, par unité de longueur, en un point r est donné par :

$$\vec{E} = \frac{Q}{2\pi\epsilon_0 r} \vec{e}_r = \frac{Q}{2\pi\epsilon_0 r^2} \vec{r} \quad \text{(III.29)}$$

En coordonnées cartésiennes liées au conducteur, les composantes du champ sont:

$$\begin{cases} E_x = \frac{Q}{2\pi\epsilon_0} \frac{x'}{x'^2 + y'^2} & \text{(a)} \\ E_y = \frac{Q}{2\pi\epsilon_0} \frac{y'}{x'^2 + y'^2} & \text{(b)} \end{cases} \quad \text{(III.30)}$$

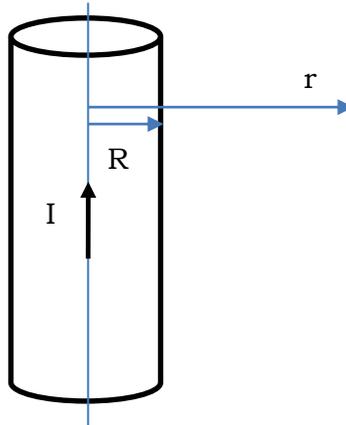


Figure III.7 : Conducteur cylindrique chargé en surface

Pour éliminer la charge électrique et exprimer le champ en fonction du potentiel de la ligne, on fait appel à l'expression de la capacité donnée en (équ. I.7).

$$\vec{E} = \frac{V_i}{\ln \frac{D}{h_i}} \frac{\vec{r}}{r^2} \quad (\text{III.31})$$

III.5.2- Champ électrique en triphasé

En utilisant le changement de coordonnées relativement aux dispositions verticale, horizontale et triangulaire respectivement données par les équations (équ. III.16, III.19 et III.22), on aboutit :

a. Disposition verticale :

$$\text{On note par : } \begin{cases} k_1 = \frac{V_1}{\ln \frac{D}{h}} & \text{(a)} \\ k_2 = \frac{V_2}{\ln \frac{D}{h+d}} & \text{(b)} \\ k_3 = \frac{V_3}{\ln \frac{D}{h+2d}} & \text{(c)} \end{cases} \quad (\text{III.34})$$

$$\left\{ \begin{array}{l} E_{1x} = \frac{k_1 x}{x^2 + (y-h)^2} \quad (a) \\ E_{2x} = \frac{k_2 x}{x^2 + (y-h-d)^2} \quad (b) \\ E_{3x} = \frac{k_3 x}{x^2 + (y-h-2d)^2} \quad (c) \end{array} \right. \text{ et } \left\{ \begin{array}{l} E_{1y} = \frac{k_1 (h-y)}{x^2 + (y-h)^2} \quad (a) \\ E_{2y} = \frac{k_2 (h+d-y)}{x^2 + (y-h-d)^2} \quad (b) \\ E_{3y} = \frac{k_3 (h+2d-y)}{x^2 + (y-h-2d)^2} \quad (c) \end{array} \right. \quad (III.32)$$

b. Disposition horizontale :

$$\text{On note par : } k_i = \frac{V_i}{\ln \frac{D}{h}} \quad \text{pour } i = 1, 2, 3 \quad (III.34)$$

$$\left\{ \begin{array}{l} E_{1x} = \frac{V_1}{\ln \frac{D}{h}} \frac{d+x}{(x+d)^2 + (y-h)^2} \quad (a) \\ E_{2x} = \frac{V_2}{\ln \frac{D}{h}} \frac{x}{x^2 + (y-h)^2} \quad (b) \\ E_{3x} = \frac{V_3}{\ln \frac{D}{h}} \frac{d-x}{(x-d)^2 + (y-h)^2} \quad (c) \end{array} \right. \text{ et } \left\{ \begin{array}{l} E_{1y} = \frac{V_1}{\ln \frac{D}{h}} \frac{h-y}{(x+d)^2 + (y-h)^2} \quad (a) \\ E_{2y} = \frac{V_2}{\ln \frac{D}{h}} \frac{h-y}{x^2 + (y-h)^2} \quad (b) \\ E_{3y} = \frac{V_3}{\ln \frac{D}{h}} \frac{h-y}{(x-d)^2 + (y-h)^2} \quad (c) \end{array} \right. \quad (III.33)$$

c. Disposition triangulaire :

$$\text{On note par : } \left\{ \begin{array}{l} k_1 = \frac{V_1}{\ln \frac{D}{h+0.86d}} \quad (a) \\ k_2 = \frac{V_1}{\ln \frac{D}{h}} \quad (b) \\ k_3 = \frac{V_1}{\ln \frac{D}{h}} \quad (c) \end{array} \right. \quad (III.34)$$

$$\left\{ \begin{array}{l} E_{1x} = k_1 \frac{x}{x^2 + (y - h - 0.86d)^2} \quad (a) \\ E_{2x} = k_2 \frac{x + 0.5d}{(x + 0.5d)^2 + (y - h)^2} \quad (b) \\ E_{3x} = k_3 \frac{x - 0.5d}{(x - 0.5d)^2 + (y - h)^2} \quad (c) \end{array} \right. ; \left\{ \begin{array}{l} E_{1y} = k_1 \frac{h + 0.86d - y}{x^2 + (y - h - 0.86d)^2} \quad (a) \\ E_{2y} = k_2 \frac{h - y}{(x + 0.5d)^2 + (y - h)^2} \quad (b) \\ E_{3y} = k_3 \frac{h - y}{(x - 0.5d)^2 + (y - h)^2} \quad (c) \end{array} \right. \quad (III.35)$$

III.6- Conclusion

Nous avons exposé dans ce chapitre une modélisation analytique des champs électrique et magnétique dont les expressions sont données en coordonnées cylindriques et cartésiennes pour trois configurations de lignes aériennes. Le chapitre suivant consacré à l'implantation de ces expressions sous environnement MATLAB dans le but d'étudier les champs générés.

4^{ème} CHAPITRE

IV- Applications et résultats

IV.1- Introduction

Le calcul du champ magnétique et électrique est limité à une ligne de haute tension dont les données géométriques et électriques sont données dans le tableau ci-dessous :

Tableau N°.IV.1 : Caractéristiques d'une ligne de HT.

Caractéristiques géométriques et électriques	Valeurs
Hauteur du 1 ^{er} conducteur : h(m)	24
Distance entre les conducteurs : d(m)	3
Diamètre des conducteurs : D(mm)	28
Tension : V(kV)	220
Courant : I(kA)	20
Fréquence : f (Hz)	50

IV.2- Evaluation spatiale du champ magnétique

IV.2.1- Disposition verticale

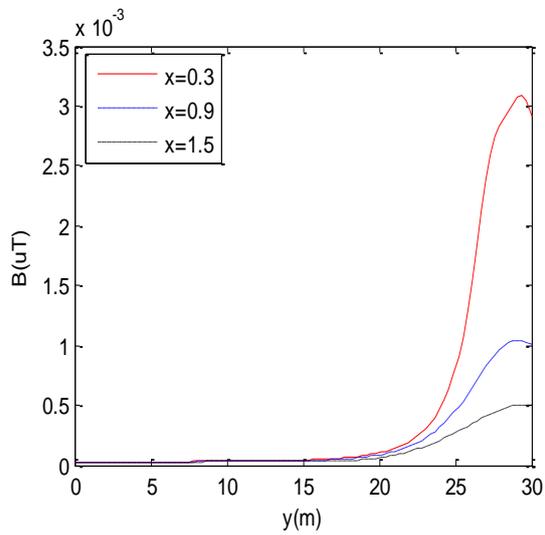


Figure IV.1 : Fonction $B(y)$

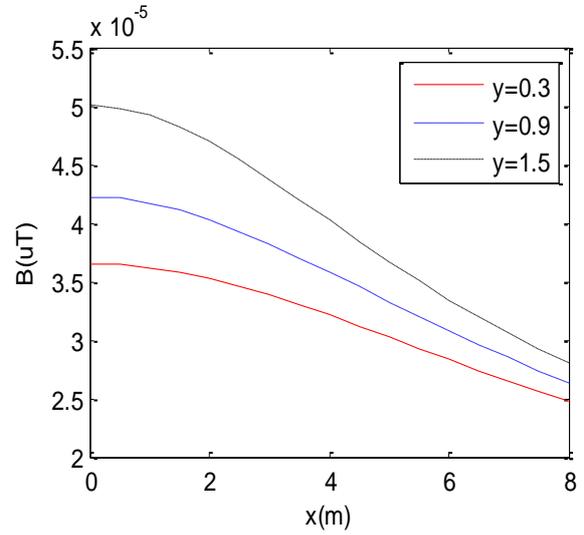


Figure IV.2 : Fonction $B(x)$

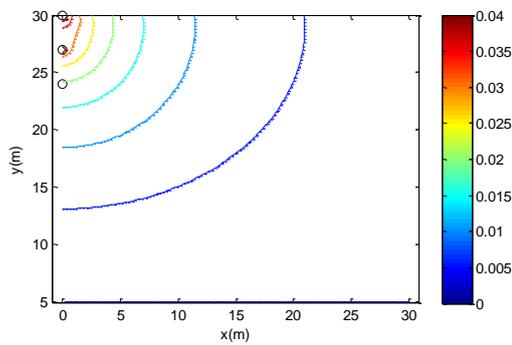


Figure IV.3 : Equipotiel de A

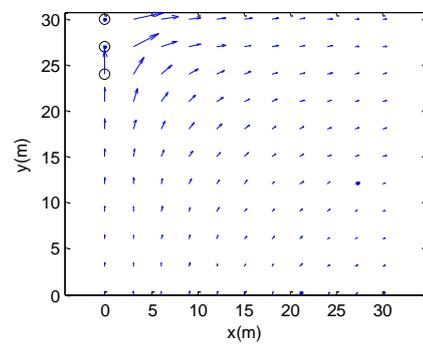


Figure IV.4 : Lignes de champ

IV.2.2- Disposition horizontale

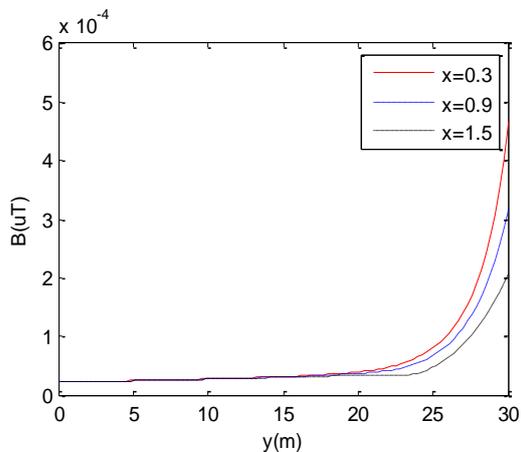


Figure IV.5 : Fonction $B(y)$

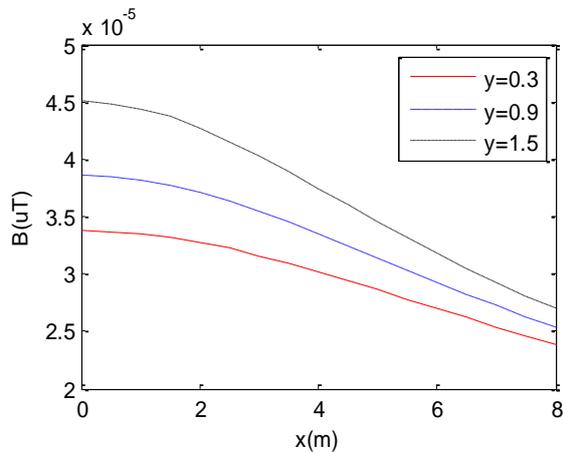


Figure IV.6: Fonction $B(x)$

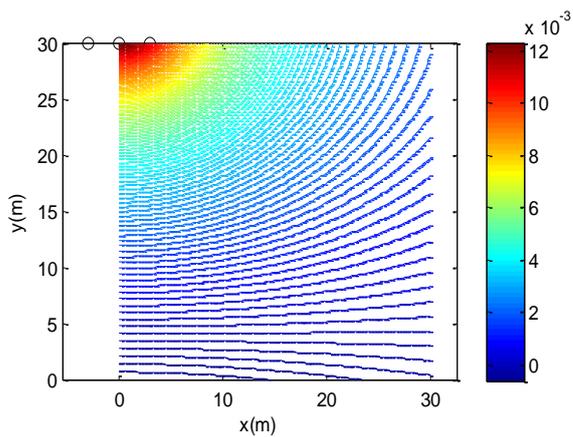


Figure IV.7 : Lignes équipotentielles

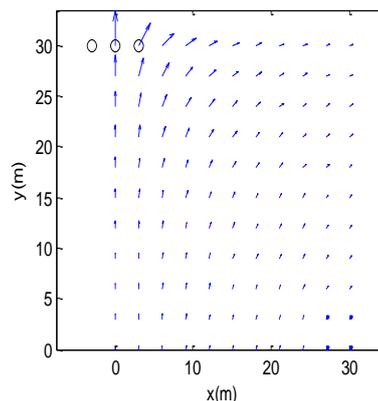


Figure IV.8 : Lignes de champ

IV.2.3- Disposition triangulaire

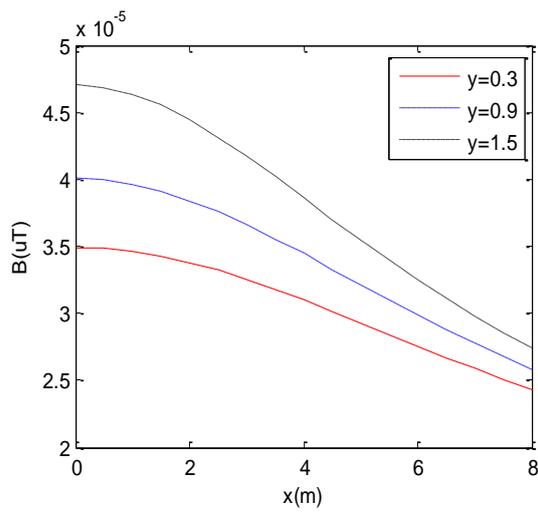


Figure IV.9: Fonction $B(x)$

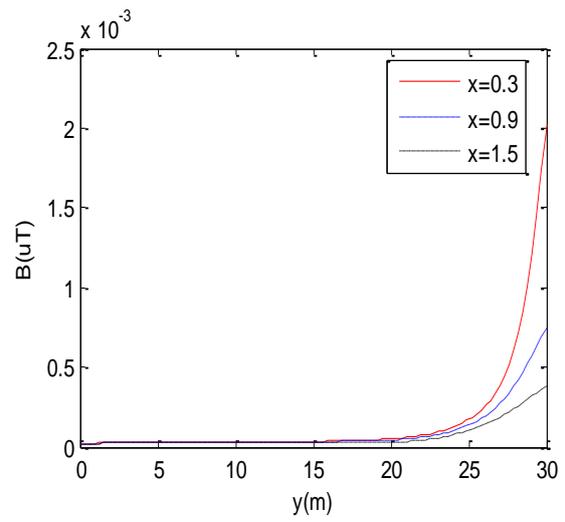


Figure IV.10 : Fonction $B(y)$

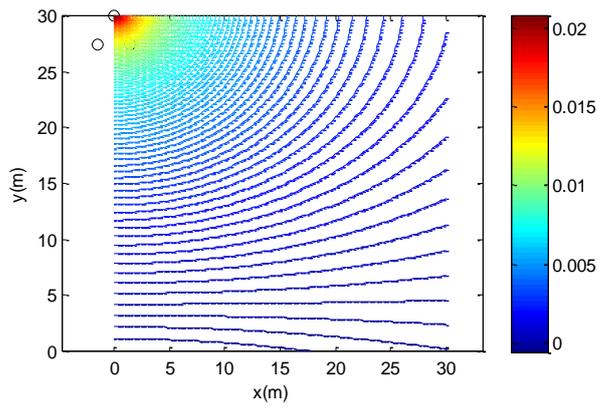


Figure IV.11: Lignes équipotentielles

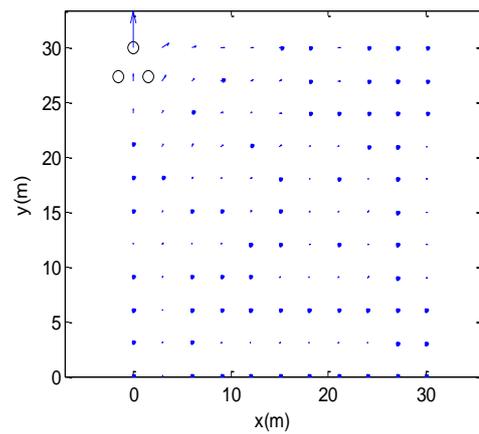


Figure IV.12 : Lignes de champ

IV.3- Evaluation spatiale du champ électrique

IV.3.1- Configuration verticale

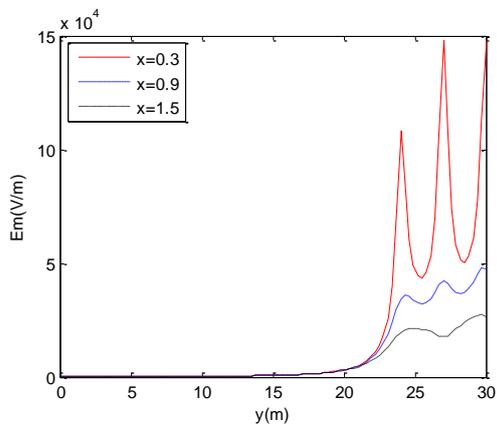


Figure IV.13: Fonction E(y)

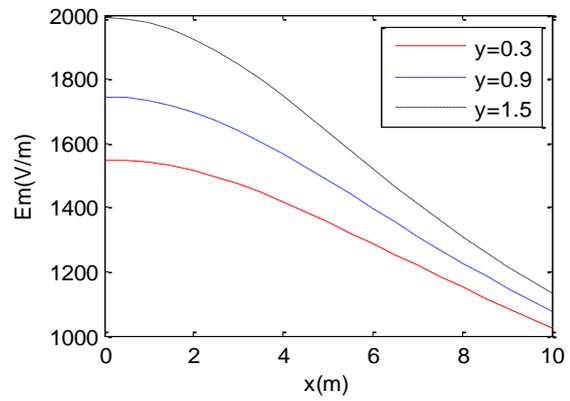


Figure IV.14: Fonction E(x)

IV.3.2- Configuration horizontale

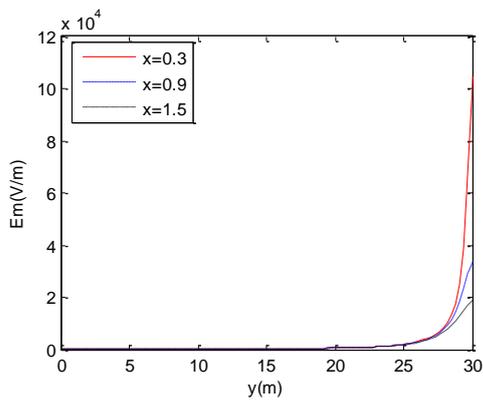


Figure IV.15: Fonction E(y)

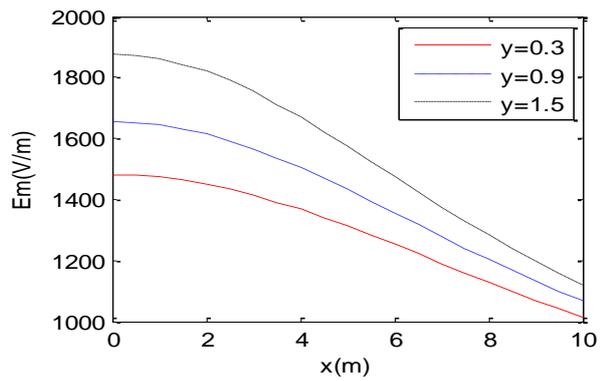


Figure IV.16: Fonction E(x)

IV.3.3- Configuration triangulaire

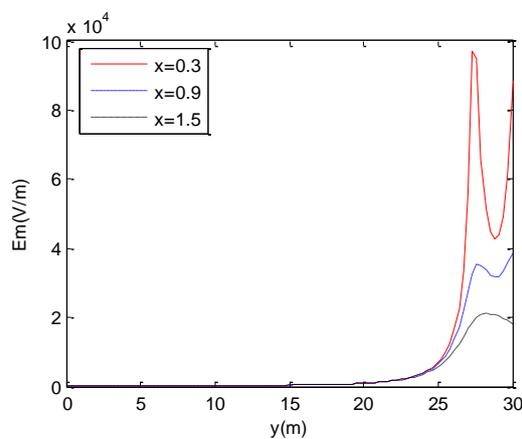


Figure IV.17: Fonction E(y)

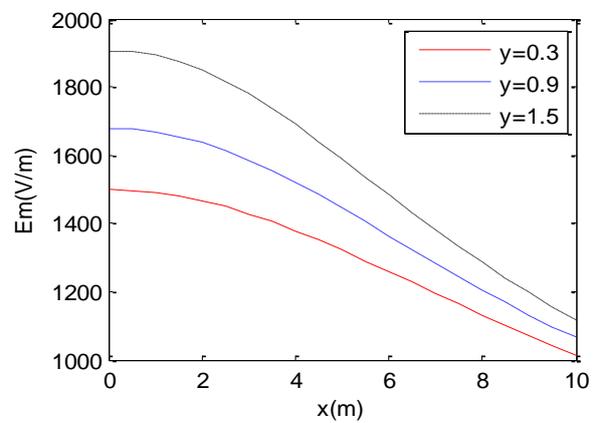


Figure IV.18: Fonction E(x)

IV.4- Conclusion

Une réglementation européenne a été établie visant à réduire les effets des champs électriques et magnétiques dans les habitations. Elle prévoit de ne plus permettre la construction de lignes de 100 à 220 kV à moins de trente mètres des habitations et d'imposer une distance de 20 mètres pour les lignes à haute tension de 65 kV.

Tout près d'une ligne à haute tension, les champs électromagnétiques sont intenses voir indéfini au centre des conducteurs et décroissent au fur à mesure que l'on s'éloigne des câbles.

Relativement aux champs calculés, la compatibilité électromagnétique est respectée.

CONCLUSION GENERALE

Le travail mené dans ce mémoire a permis d'étudier et d'évaluer les champs électrique et magnétique générés par les lignes de transport d'énergie électrique. Le calcul est éventuellement utile pour le dimensionnement des lignes aériennes en vue de respecter la compatibilité électromagnétique dans le but de réduire les effets néfastes sur les êtres vivants et les appareils se trouvant à proximité de ces lignes.

Dans le cas de configurations symétriques où l'effet de bord est négligé, les formulations des champs électrique et magnétique sont établies respectivement sur la base du théorème d'Ampère et de Gauss. Dans le cas contraire où l'effet de bord n'est pas négligé, le champ magnétique est exprimé par la loi de Boit et Savart.

Les formulations, établies pour trois configurations géométriques (verticale, horizontale et triangulaire), permettent de connaître les valeurs du champ électromagnétique à différentes distances de la ligne.

Les conducteurs disposés en nappe triangulaire et vertical génèrent des champs électrique et magnétique plus important que s'ils sont disposés en horizontal. Aujourd'hui, 95 % des lignes nouvelles THT et HT sont disposées en triangle, conformément aux règles de l'art.

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- [1] Jacques DELABALLE, «Cahiers Techniques, La CEM : la compatibilité électromagnétique» CT 149(e) édition, décembre 2001
- [2] BEN DERRADJI Selsabil « Calcul des protections d'un départ HTA (30 KV) », mémoire (mastère académique), université « Kasdi Marbah Ouargla » année 2014.
- [3] J.C. Sabonnadere et N.Hadjasaid, «ligne et réseau électrique vol 1 », 1ère édition Lavoisier. Année 2007
- [4] M. Aguet et J-J Morf « Traité d'électricité (Energie électrique) ». Volume 12, édition de Georgi 1998
- [5] M. AGUET et M.IANOS « Traité d'électricité, d'électronique et d'électrotechnique Haute tension », Volume 22, Edition Dunod, 1997.
- [6] Abdallah Darkawi, «la compatibilité électromagnétique (Cem)», Ecole d'ingénieur, France 2016 «cl-01358003»
- [7] B.Maouche, «Cours de Cem», Université de Bejaia, site e-learning, date de mise à jour
- [8] Sylvie Rathoin, « Contribution à la caractérisation du rayonnement électromagnétique de la foudre et à sa modélisation en vue du couplage sur les câbles. Thèse de doctorat, Ecole Centrale de Lyon, 1993.
- [9] ZELLAGUI Mohamed, «étude des protections des réseaux électrique MT (30 & 10 kV) » mémoire de magistère, université « Mentouri Constantine »Année 2010
- [10] Pierre Paul Barbière « étude et justification des courant de contacte induits par les lignes à haute tension dans le parc résidentiel belge et leurs incidences sur la population ».Université de liège. Année 2014.
- [11] Journal Officiel de la République Française du 5 mai 2002, page 8626
