

الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية
وزارة التعليم العالي والبحث العلمي



جامعة بادجي مختار – عنابة

UNIVERSITÉ BADJI MOKHTAR - ANNABA
BADJI MOKHTAR – ANNABA UNIVERSITY

Faculté : TECHNOLOGIE
Département : ELECTROTECHNIQUE
Domaine : SCIENCES ET TECHNOLOGIES
Filière : ELECTOTECHNIQUE
Spécialité : ELECTOTECHNIQUE INDUSTRIELLE

Mémoire

Présenté en vue de l'obtention du Diplôme de Master

Thème:

**Analyse des méthodes de réductions de la pollution
électromagnétique « Electrosmog » au voisinage des lignes
électrique HT**

Présenté par : *Chaoui Abderrahmen*
Ben djait Brahim

Encadrant : *Tourab Wafa* MCB *Badji Mokhtar - Annaba*

Jury de Soutenance :

KSENTINI Abdelhamid	MCA	<i>Badji Mokhtar - Annaba</i>	Président
TOURAB Wafa	MCB	<i>Badji Mokhtar - Annaba</i>	Encadrant
DAFRI Mourad	MCB	<i>Badji Mokhtar - Annaba</i>	Examineur

Année Universitaire : 2024/2025

بِسْمِ اللَّهِ الرَّحْمَنِ الرَّحِيمِ
يَرْفَعُ اللَّهُ الَّذِينَ آمَنُوا مِنْكُمْ وَالَّذِينَ أُوتُوا الْعِلْمَ دَرَجَاتٍ وَاللَّهُ بِمَا تَعْمَلُونَ خَبِيرٌ

REMERCIEMENTS

Avant tout nous rendons grâce à Allah pour nous avoir accordé la force et la persévérance nécessaire à la réalisation de ce mémoire.

*Nous tenons à exprimer notre profonde gratitude à notre encadreuse **Pr Tourab Wafa** pour sa disponibilité, ses conseils avisés et son accompagnement bienveillant.*

Nos remerciements s'adressent également à l'ensemble des enseignants qui ont contribué à notre formation.

*Une mention particulière à **Mr Messaoudi Racim** dont les remarques pertinentes ont grandement enrichi mon travail.*

Que chacun trouve ici l'expression de notre sincère reconnaissance.

DÉDICACE

Je dédie ce modeste travail à :

*A mon cher **père**, pilier de ma vie, pour ses sacrifices silencieux , sa sagesse et son amour inconditionnel.*

*A ma douce **mère**, source intarissable de tendresse, de prières et de courage.*

*A mon frère **Omar**, dont le soutien discret mais précieux a toujours compté.*

A mes oncles et tantes, mes cousins et cousines pour leurs bienveillances et leurs encouragements sincères.

*A tous mes amis, en particulier Boulebda Chihel pour leur préséance, leurs mots et leurs moment de réconfort dans les instants de doute et une pensée particulière au poste 60 à **SIDER** et surtout **Nessibi Othmane** pour son aide.*

Cette page est un humble hommage à tous ceux qui ont contribué, de près ou de loin à ce parcours. Que ces lignes soient le reflet de ma gratitude.

DÉDICACE

Je dédie ce modeste travail à :

À mon père bien-aimé, Ben Djait Hacem, modèle de droiture, de patience et de générosité, dont les sacrifices ont pavé le chemin de mon avenir.

À ma tendre mère, Boudjemaa Djemaa, dont l'amour, les prières et le soutien inébranlable m'ont porté dans chaque étape de ma vie.

À mes frères et sœurs, piliers de mon équilibre, pour leur présence, leur affection et leur confiance.

À mes amis les plus chers, pour leurs encouragements, leur humour et leur loyauté tout au long de ce parcours.

Une pensée toute particulière à Bouterfa Wail, Nadir Stambouli et Boulebdia Chiheb, pour leur amitié sincère, leur soutien constant et les précieux moments partagés.

Cette dédicace vous est dédiée, avec tout le respect, la reconnaissance et l'affection que je vous porte.

SOMMAIRE

Chapitre I : Champ électromagnétique basse fréquence

* Introduction.....	16
I.1 Champs électromagnétiques à basse fréquence et leur interaction avec l'environnement.....	16
I.1.1 Champs électromagnétiques à basses fréquences.....	16
I.1.2 Le spectre électromagnétique.....	17
I.1.3 Caractéristiques des champs électromagnétiques.....	18
I.1.4 Origines des champs électromagnétiques.....	19
I.1.4.1 Origines naturelles des champs électromagnétiques.....	20
I.1.4.2 Origines artificielles des champs électromagnétiques.....	21
I.2 Champs électromagnétiques émis par les lignes haute tension.....	22
I.2.1 Le champ électrique.....	22
I.2.2 Le champ magnétique.....	23
I.2.3 Niveaux des champs rayonnés.....	23
I.3 Contexte normatif.....	25
I.3.1 Normes sur les champs électromagnétiques de basses fréquences.....	26
I.3.1.1 Le standard IEEE C95.1-1999.....	27
I.3. 1.2 Les recommandations ICNIRP	28
I.4 Conclusion.....	29

Chapitre II : Compatibilité électromagnétique des lignes hautes tension

* Introduction	31
II.1 Lignes électriques aériennes.....	31
II.1.1 Lignes de grand transport.....	32
II.1.2 Lignes d'interconnexion.....	32
II.1.3 Lignes de répartition.....	32
II.1.4 Lignes de distribution.....	33
II.2 Éléments constitutifs des lignes aériennes.....	33

II.2.1 Pylônes.....	34
II.2.1.1 Terminologie essentielle.....	35
II.2.1.2 Familles de supports.....	35
*. Disposition de l'armement.....	35
II.2.1.3 Matériaux.....	37
II.2.1.4 Dimensionnement mécanique et charges appliquées.....	37
II.2.1.4.1 Charges permanentes.....	38
II.2.1.4.2 Charges dues aux conducteurs et câbles de garde.....	38
II.2.1.4.3 Charges climatiques.....	38
II.2.1.4.4 Charges liées aux opérations.....	38
II.2.1.5 Dimensionnement géométrique.....	38
II.2.1.5.1 Durabilité.....	38
II.2.2 Conducteurs.....	38
II.2.2.1 Caractéristiques et contraintes des conducteurs aériens.....	40
II.2.2.2 Rayon moyen géométrique des conducteurs toronnés.....	40
II.2.2.3 Rayon moyen géométrique des conducteurs en faisce	41
II.2.3 Isolateurs.....	42
II.2.4 Câbles de garde.....	43
II.3 Avantages et inconvénients des lignes électriques aériennes.....	43
II.3.1 Avantages.....	43
II.3.2 Inconvénients.....	42
II.4 Tensions de fonctionnement.....	44
II.5 Interférence des lignes électrique HT avec l'environnement	44
II.5.1 Phénomène inductif.....	44
II.5.2 Couplage capacitif.....	45
II.6 Contraintes de proximité – Induction magnétique et capacitive – Conduction.....	46
II.6.1 Proximité avec des réseaux MT/BT.....	47
II.6.2 Proximité avec les réseaux de télécommunications.....	47
II.6.3 Proximité des exploitations agricoles et d'élevages.....	48
II.6.4 Proximité des ouvrages linéaires de type clôture, glissière d'autoroutes.....	49
II.6.5 Proximité des canalisations de transport de fluide.....	50
II.7 Effet de peau.....	51
II.8 Effet couronne : bruits radioélectriques et acoustiques.....	52
II.9 Conclusion	54

Chapitre III : Analyse de l'environnement électromagnétique au voisinage des lignes de transmission

*Introduction.....	56
III.1 Méthodes géométrique et électrique pour la réduction du champ électromagnétique	56
III.2 Effet de la géométrie de la ligne sur la réduction du champ électromagnétique rayonné....	57
III.2.1 Modèle étudié.....	58
III.2.2 Réduction du champ électrique par la méthode géométrique.....	59
A. Programme de modélisation analytique.....	60
B. Influence de la configuration de la ligne.....	60
C. Effet de la hauteur.....	63
D. Effet de la distance entre phases.....	64
E. Influence du nombre de conducteurs par phase.....	65
III.2.3 Réduction du champ magnétique par la méthode géométrique.....	66
III.2.3.1 Effets du changement de la géométrie de la ligne.....	67
A. Influence de la configuration de la ligne.....	67
B. Influence de la hauteur sur le champ magnétique.....	68
C. Influence de la distance entre phases.....	69
III.3 Méthode électrique pour la réduction du champ électromagnétique.....	71
III.3.1 Calcul du Champ Électrique avec écran passif.....	71
III.3.2 Effet des écrans passifs sur le champ électrique.....	72
III.3.2.1 Profil du champ électrique en l'absence d'écrans.....	72
III.3.2.2 Profil du champ électrique avec écrans.....	72
III.3.3 Effet des écrans passifs sur le champ magnétique.....	76
III.3.3.1 Profil du champ magnétique sans câble de blindage.....	76
III.3.3.2 Profil du champ magnétique avec câble de blindage.....	77
III.4 Conclusion.....	78

Listes des figures

Chapitre I : Champ électromagnétique basse fréquence

Figure I.1. Ondes électromagnétiques basse fréquence.....	17
Figure I.2. Spectre électromagnétique.....	18
Figure I.3. Propagation du champ électromagnétique en fonction de la longueur d'onde de la source.....	19
Figure 1. 4. Champ électromagnétique terrestre assimilable à celui d'un dipôle.....	20

Chapitre II : Compatibilité électromagnétique des lignes hautes tension

Figure II.1 Eléments constitutifs des lignes électriques aériennes.....	32
Figure II.2 Types de supports à phases étagées.....	36
Figure II.3 Pylônes ou portiques à armement nappe ou nappe-voute.....	36
Figure II.4 Configurations typiques des pylônes pour les lignes HT/THT.....	37
Figure II.5 Conducteur conventionnel sur la gauche et à âme en fibre composite à droite.....	39
Figure II.6 Conducteur en âme d'acier.....	39
Figure II.7 Conducteurs toronnés.....	41
Figure II.8 Couplage Inductif à proximité des ouvrages HT/THT.....	45
Figure II.9 Couplage Capacitif à proximité des ouvrages HT/THT.....	46
Figure II.10 Distances d'approches dans une exploitation agricole.....	49
Figure II.11 Proximité des canalisations de transport de fluide.....	50
Figure II.12 Effet de peau.....	52
Figure II.13 Effet de couronne avec présence de petites saillies à la surface des conducteurs.....	53

Chapitre III : Analyse de l'environnement électromagnétique au voisinage des lignes de transmission

Figure III.1 modèle étudié de la ligne de transmission 400kV.....	58
Figure. III.2 Algorithme de réduction du champ électrique au voisinage des lignes THT.....	60
Figure III.3 Champ électrique pour les trois configurations de lignes.....	61
Figure. III.4 Champ électrique pour différentes gardes au sol.....	63

Figure.III.5	Effet de la distance entre phases sur le profil du champ électrique.....	65
Figure. III.6	Champ magnétique pour les trois configurations de lignes.....	67
Figure. III.7	Champ magnétique calculé pour différentes hauteurs.....	69
Figure. III.8	Champ magnétique calculé pour différents espacement entre phases...	70
Figure III.9	l'intensité du champ électrique pour différentes hauteurs de la ligne....	72
Figure III.10	modèle étudié de la ligne de transmission 400kV avec des fils de blindage passifs.....	73
Figure III.11	distributions de champ électrique à hauteur de 1 m au-dessus de la surface du sol pour la ligne de transport de 400.....	73
Figure III.12	Maximum Champ électrique avec la variation de l'espacement S entre les fils de blindage et nombre de fils différent.....	75
Figure III.13	Maximum champ électrique par rapport au nombre de fils de blindage passifs de la ligne de transmission avec H=15m.....	75
Figure.III.14	Distribution du champ magnétique à une hauteur de 1 m au-dessus de la surface du sol pour la ligne de 400 kV.....	76
Figure III.15	Distribution du champ magnétique à 1 m du sol de la ligne400 kV....	77

Listes des tableaux

Chapitre I Champ électromagnétique basse fréquence

Tableau I. 1 : Niveaux de champs électromagnétiques rayonnés par les lignes aériennes.....	24
Tableau 1. 2 : Niveaux de champs électromagnétiques rayonnés par des appareils domestiques.....	25
Tableau I-3: Limites d'expositions maximales (IEEE C95.1-1999).....	27
Tableau I. 4: Restrictions de base.....	28

Chapitre II Compatibilité électromagnétique des lignes hautes tension

Tableau II.1 Rayon moyen géométrique des conducteurs toronnés.....	41
Tableau II.2 Rayon moyen géométrique des conducteurs en faisceaux.....	42
Tableau II.3 les niveaux de tension et leur usage dans le réseau électrique Algérien	44

Chapitre III : Analyse de l'environnement électromagnétique au voisinage des lignes de transmission

Tableau III.1 : influence des paramètres géométriques sur les champs électrique et magnétique d'une ligne HT.....	57
---	----

Résumé en français :

Le transport d'électricité à haute et très haute tension (HT/THT) est essentiel pour assurer un approvisionnement fiable en énergie. En Algérie, la croissance de la demande énergétique a conduit à l'expansion des réseaux 400 kV. Cependant, ces lignes génèrent des champs électromagnétiques à basse fréquence (50 Hz), qui peuvent affecter la santé humaine et perturber les équipements. Le champ magnétique, en particulier, est préoccupant car il pénètre les matériaux et les corps. Cette étude analyse d'abord l'impact de la configuration de la ligne sur la distribution des champs, puis propose l'utilisation de câbles de blindage passifs pour en réduire l'intensité dans l'environnement immédiat.

Summary in English:

High and very high voltage (HV/EHV) electricity transmission is crucial for delivering power efficiently. In Algeria, rising energy demands have driven the development of 400 kV networks. However, these lines emit low-frequency electromagnetic fields (50 Hz), which may impact human health and disrupt nearby electronic devices. Magnetic fields are particularly concerning as they penetrate materials and the human body. This study first examines how the line's configuration affects field distribution, then explores the use of passive shielding cables to reduce field intensity in sensitive areas.

الملخص بالعربية:

يُعد نقل الكهرباء عبر خطوط الجهد العالي والجهد العالي جدًا (THT/HT) عنصراً أساسياً لضمان التزويد المستقر بالطاقة. في الجزائر، أدى تزايد الطلب على الطاقة إلى تطوير شبكات نقل تصل إلى 400 كيلوفولت. ومع ذلك، فإن هذه الخطوط تولّد مجالات كهرومغناطيسية بتردد منخفض (50 هرتز)، قد تؤثر على صحة الإنسان وتسبب في اضطراب الأجهزة الإلكترونية القريبة. ويُعد المجال المغناطيسي مصدر القلق الأكبر، نظرًا لقدرته على اختراق المواد وأجسام البشر. تهدف هذه الدراسة أولاً إلى تحليل تأثير شكل الخط ومعايير الهندسية على توزيع هذه المجالات، ثم تقترح استخدام كابلات للتدريع السلبي لتقليل شدة المجال في المناطق الحساسة.

Introduction générale

Introduction Générale

Le transport de l'énergie électrique représente un maillon essentiel du système énergétique moderne. Si la production et la consommation d'électricité attirent souvent l'attention du grand public et des décideurs, c'est bien la capacité à acheminer cette énergie sur de longues distances, en toute sécurité et avec un minimum de pertes, qui garantit la stabilité et l'efficacité du réseau. Depuis la fin du XIX^e siècle, les infrastructures de transport d'électricité n'ont cessé d'évoluer, s'adaptant à la croissance des besoins industriels, résidentiels et technologiques. Cette évolution a conduit à la mise en place de réseaux interconnectés à haute (HT) et très haute tension (THT), pouvant atteindre aujourd'hui des niveaux allant jusqu'à 400 kV.

En Algérie, à l'image de nombreuses nations en développement rapide, la demande énergétique croît de manière continue. Pour y répondre, le pays a investi massivement dans des réseaux de transport performants, capables de desservir aussi bien les grands centres urbains que les régions éloignées. Ces réseaux, bien qu'indispensables, ne sont pas sans conséquences sur l'environnement et la santé publique. En effet, les lignes HT/THT émettent des champs électromagnétiques à basse fréquence (50 Hz), composés d'un champ électrique et d'un champ magnétique, qui peuvent interagir avec les êtres vivants et les équipements situés à proximité.

Il est aujourd'hui scientifiquement établi que, si le champ électrique peut être partiellement bloqué ou atténué par la peau ou des barrières physiques, le champ magnétique, quant à lui, traverse aisément les matériaux, atteignant les espaces clos et pénétrant directement le corps humain. Cette caractéristique en fait une source de préoccupation majeure, d'autant plus que des études épidémiologiques ont suggéré des liens possibles entre une exposition prolongée à ces champs et certains effets sanitaires, bien que les mécanismes exacts restent encore en discussion.

Outre les aspects biologiques, les effets physiques générés au voisinage des lignes HT/THT – tels que les couplages inductifs et capacitifs, l'effet de couronne, l'ionisation de l'air ou encore les tensions induites – posent également des défis techniques. Ces phénomènes peuvent entraîner des perturbations dans le fonctionnement des équipements électroniques, réduire la durée de vie des matériaux, et imposer des contraintes supplémentaires lors de l'implantation ou de l'entretien des lignes.

Face à ces enjeux, il devient impératif d'étudier les moyens permettant de réduire ou de contrôler l'intensité des champs électromagnétiques dans l'environnement immédiat des lignes THT. Plusieurs approches peuvent être envisagées : optimisation de la configuration géométrique des conducteurs, ajustement des paramètres électriques, ou encore utilisation de dispositifs de blindage passifs. Chacune de ces méthodes présente ses avantages et ses limites, et leur efficacité dépend étroitement du contexte d'implantation, de la nature du sol, et des caractéristiques de la ligne.

Dans ce travail, nous nous proposons de mener une étude approfondie sur la distribution des champs électromagnétiques générés par une ligne de transport THT de 400 kV, en analysant d'abord l'impact de la configuration et des paramètres géométriques de la ligne. Dans un second temps, nous

explorerons l'efficacité de câbles de blindage passifs, placés stratégiquement sous les conducteurs, afin de réduire l'intensité du champ dans les zones sensibles. Cette double approche permettra de dégager des pistes concrètes pour concilier performance énergétique et respect des contraintes environnementales et sanitaires.

Chapitre I

Champ électromagnétique basse fréquence

Introduction

Les lignes à haute tension constituent des émetteurs puissants de champs électromagnétiques. Fonctionnant à une fréquence de 50 Hz, elles produisent à la fois un champ électrique et un champ magnétique qui interagissent avec leur environnement immédiat. Lorsqu'un individu se trouve à proximité de ces installations, son corps peut être traversé par des champs et courants induits.

Il est reconnu que le champ magnétique issu de ces lignes représente un risque plus important pour la santé que le champ électrique. Ce dernier, en effet, est bloqué par la peau et peut être atténué efficacement à l'aide d'écrans électrostatiques. En revanche, le champ magnétique traverse les matériaux, atteint les espaces clos, et pénètre directement dans le corps humain.

Deux principaux cas d'exposition aux champs électromagnétiques à basse fréquence se présentent :

Les infrastructures à haute tension et faible intensité de courant, comme les lignes aériennes.

Les équipements à basse tension mais à fort courant, typiques des appareils utilisés dans les foyers et l'industrie.

I.1 Champs électromagnétiques à basse fréquence et leur interaction avec l'environnement

Le champ électromagnétique traduit, dans l'espace, l'influence exercée par des particules chargées en mouvement. Il s'agit d'un concept fondamental en électromagnétisme, englobant les deux composantes principales de la force électromagnétique qui s'exerce sur une particule mobile dans un référentiel galiléen.

Lorsqu'une particule q de charge se déplace avec une vitesse \vec{v} elle est soumise à une force résultante donnée par l'expression suivante :

$$\vec{F} = q(\vec{E} + \vec{v} \wedge \vec{B})$$

Où \vec{E} représente le champ électrique et \vec{B} le champ magnétique. Ainsi, le champ électromagnétique est défini comme l'ensemble constitué de ces deux champs :

(\vec{E}, \vec{B}) .

I.1.1 Champs électromagnétiques à basses fréquences

Les champs électriques et magnétiques appartiennent à la catégorie des rayonnements « non ionisants », ce qui signifie qu'ils ne possèdent pas une énergie suffisante pour arracher un électron d'un atome ou d'une molécule. Chaque fois que des charges électriques se déplacent, un champ électromagnétique variable dans le temps est généré.

Ce phénomène consiste en deux ondes étroitement liées (voir figure I.1) : une onde électrique \vec{E} et une onde magnétique \vec{H} . Ces deux composantes se propagent simultanément à la vitesse de la lumière, et sont définies par leur fréquence et leur longueur d'onde. La fréquence correspond au nombre

d'oscillations effectuées par seconde, exprimée en hertz (Hz), où 1 Hz équivaut à un cycle par seconde. La longueur d'onde désigne la distance parcourue par l'onde pendant un cycle complet.

Les champs électromagnétiques à basse fréquence (CEM ELF) se définissent comme ceux dont la fréquence est inférieure ou égale à 300 Hz. À ces fréquences, la longueur d'onde dans l'air est très importante, atteignant environ 6000 km à 50 Hz et 5000 km à 60 Hz. En pratique, les champs électrique et magnétique sont souvent considérés et mesurés de manière indépendante, car leurs effets s'exercent séparément.

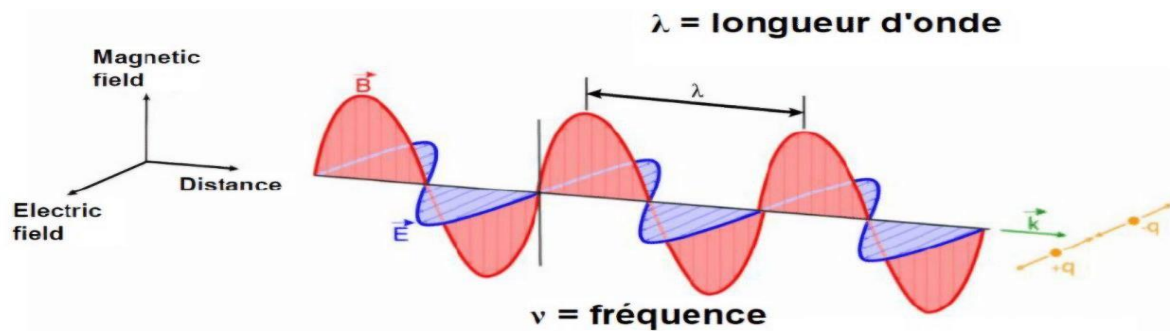


Figure I.1. Ondes électromagnétiques basse fréquence

I.1.2 Le spectre électromagnétique

Le spectre électromagnétique regroupe toutes les sources, qu'elles soient naturelles ou créées par l'homme, qui génèrent des champs électromagnétiques. Ces champs sont classés selon leurs fréquences, et l'ensemble de ces fréquences constitue le spectre électromagnétique complet. Comme illustré dans la *figure (I-2)*, la majorité des champs électriques et magnétiques produits par des activités humaines changent rapidement et régulièrement dans le temps. On parle alors de champs alternatifs, caractérisés par leurs intensités et leurs fréquences propres.

Les champs électromagnétiques à haute fréquence, également appelés radiofréquences, couvrent une plage allant de 10 MHz à 300 GHz. Ces fréquences sont largement exploitées dans les technologies de communication, notamment par les téléphones mobiles et les antennes relais qui émettent des signaux à environ 900 MHz ou 1,8 GHz.

En revanche, les champs situés entre 0 et 300 Hz sont désignés comme des champs d'extrême basse fréquence (ELF). Les lignes de transport d'énergie électrique et la plupart des équipements électriques fonctionnent à une fréquence standard de 50 Hz. Toutefois, certains appareils et installations industrielles convertissent cette fréquence de 50 Hz en courant continu (comme dans certaines applications électrochimiques industrielles), ou la modifient en fréquences plus élevées, par exemple dans les dispositifs de chauffage par induction ou les fours à micro-ondes utilisés aussi bien en industrie qu'à domicile.

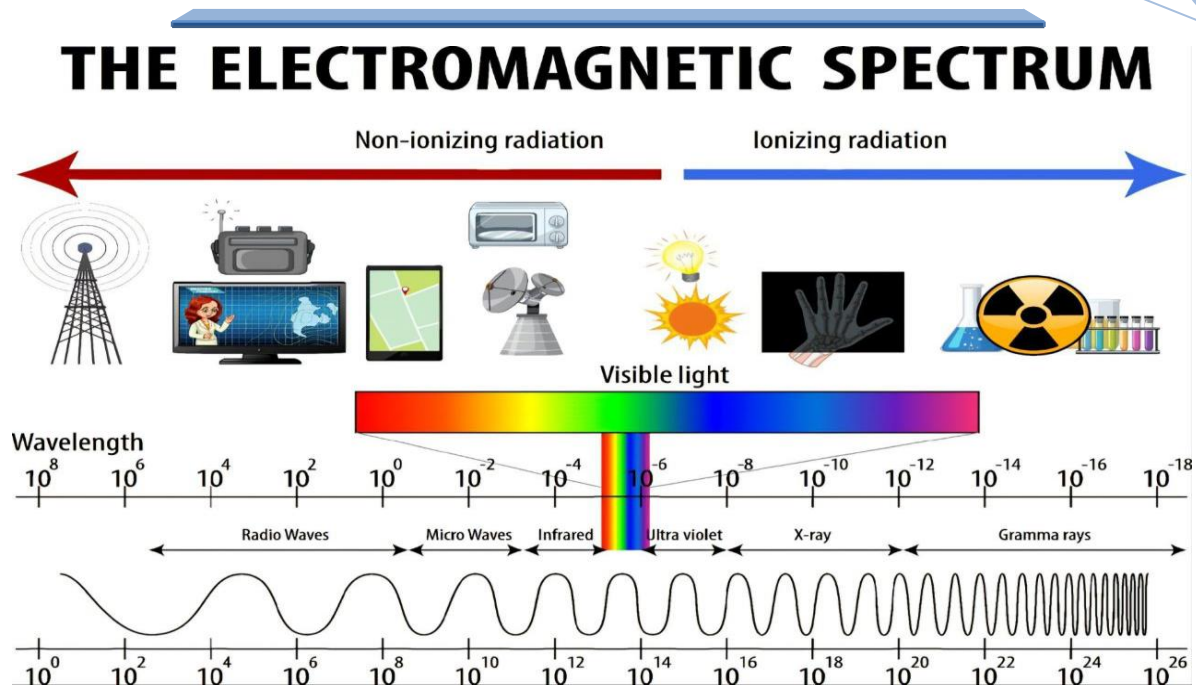


Figure I.2 : Spectre électromagnétique

I.1.3 Caractéristiques des champs électromagnétiques

Les propriétés des champs électromagnétiques varient considérablement en fonction de plusieurs facteurs, notamment la distance par rapport à la source émettrice, la longueur d'onde, les spécificités de la structure qui rayonne, ainsi que l'environnement alentour. On peut distinguer trois zones principales autour d'une source d'émission :

- **Zone de champ proche réactif :**

Cette zone se situe à une distance inférieure à une fraction de la longueur d'onde de la source, enveloppant directement la source ou la structure émettrice. Elle est aussi appelée zone d'évanescence ou zone de Rayleigh. Dans cette région, les champs électrique et magnétique sont étroitement liés par l'impédance caractéristique du vide Z_0 et seules les composantes transversales sont prédominantes. La puissance active rayonnée y est dominante. Un exemple courant de cette zone est le téléphone portable, où l'antenne est très proche de la tête ou du corps humain. Dans ce contexte, la mesure du débit d'absorption spécifique (DAS) est plus significative que la simple mesure du champ électrique extérieur.

- **Zone de transition ou région de Fresnel :**

Située au-delà de la zone de Rayleigh, cette région constitue une zone intermédiaire où le phénomène de propagation des ondes commence à se manifester, mais l'onde électromagnétique n'est pas encore pleinement formée. Les composantes radiales restent majoritaires dans cette zone.

- **Zone de champ lointain :**

Connue aussi sous le nom de région de Fraunhofer, cette zone est caractérisée par des propriétés bien définies du champ électromagnétique, où les ondes se propagent selon les phénomènes classiques. Elle s'étend généralement à plusieurs longueurs d'onde de la source. Dans cette zone, l'amplitude des vecteurs des champs électrique et magnétique diminue progressivement à mesure que la distance à la source augmente, tendant vers zéro à l'infini.

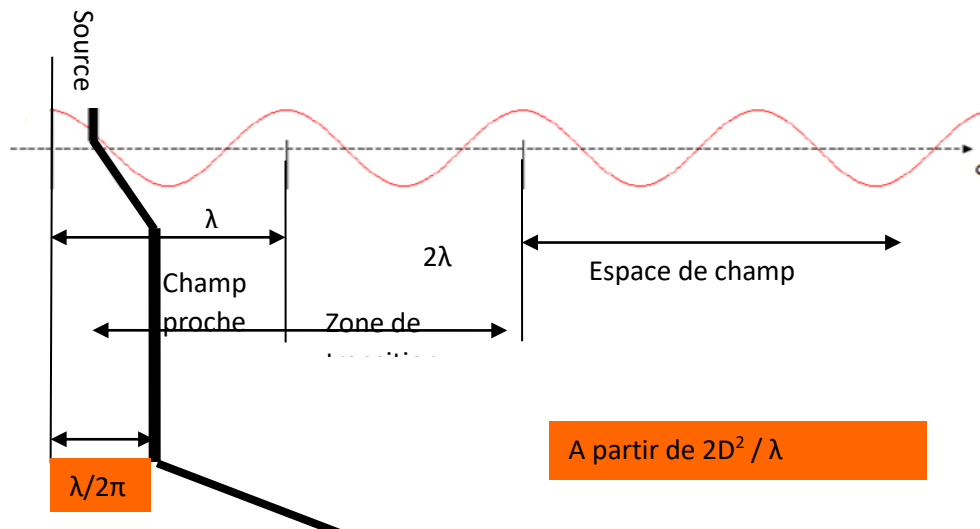


Figure I.3. Propagation du champ électromagnétique en fonction de la longueur d'onde de la source

I.1.4 Origines des champs électromagnétiques

Les champs électromagnétiques, aussi appelés rayonnements électromagnétiques, représentent une forme de transfert d'énergie sans nécessiter de support matériel. Leur utilisation s'étend à de nombreuses applications couvrant une large plage de fréquences. On distingue deux grandes catégories de rayonnements : les rayonnements ionisants et les rayonnements non ionisants.

Les rayonnements sont dits ionisants lorsqu'ils possèdent une énergie suffisante pour arracher un électron à une molécule. Ce type d'énergie peut provoquer des dommages biologiques importants, notamment en ciblant et en altérant l'ADN à travers des processus physiques et chimiques. Ces rayonnements sont associés à des fréquences très élevées (supérieures à Hz) ou à des longueurs d'onde très courtes (inférieures à $0,1 \mu\text{m}$).

En revanche, à des fréquences plus basses, l'énergie transportée n'est pas suffisante pour causer de telles modifications atomiques. On y observe principalement deux types d'effets : thermiques et athermiques.

Les effets thermiques, bien connus et exploités depuis longtemps notamment en médecine, résultent du réchauffement des tissus par absorption d'énergie électromagnétique (chauffage diélectrique).

Les effets athermiques, plus complexes à analyser, n'impliquent pas d'élévation de température. Ils influencent plutôt des mécanismes cellulaires comme le potentiel de membrane ou les échanges ioniques à travers les membranes. Ces effets sont observés aussi bien dans les radiofréquences que dans les basses fréquences (ELF), bien que dans cette dernière gamme les effets thermiques soient en général négligeables.

Dans le cadre de notre étude, l'attention est portée exclusivement sur les rayonnements non ionisants, notamment ceux à basse fréquence. Les champs électromagnétiques statiques, d'origine naturelle, sont présents depuis toujours sur Terre. Cependant, avec l'évolution rapide des sociétés modernes, l'exposition humaine aux sources artificielles de ces champs s'est considérablement accrue au cours du 20^e siècle. Cela est principalement dû à l'essor de la production et de l'utilisation de l'électricité, à la généralisation des technologies sans fil – en particulier dans les télécommunications – ainsi qu'aux changements dans les modes de vie, les environnements professionnels et les habitudes sociales.

I.1.4.1 Origines naturelles des champs électromagnétiques

Les champs électromagnétiques d'origine naturelle sont majoritairement statiques, c'est-à-dire de fréquence nulle (0 Hz). Parmi les exemples les plus connus figurent le champ magnétique terrestre, responsable de l'orientation de l'aiguille d'une boussole, ainsi que le champ électrique atmosphérique, dont l'intensité peut devenir très élevée sous les formations orageuses ou à proximité des pôles géographiques.

Cependant, certains phénomènes naturels dynamiques engendrent également des champs électromagnétiques variables dans le temps, dont les fréquences peuvent parfois être très élevées.

Parmi ces sources, on retrouve notamment :

L'électricité statique résultant de la séparation de charges électriques,

La foudre, qui génère des impulsions électromagnétiques intenses et soudaines,

Et les rayonnements électromagnétiques de très haute fréquence, produits par certaines interactions naturelles à l'échelle cosmique ou atmosphérique.

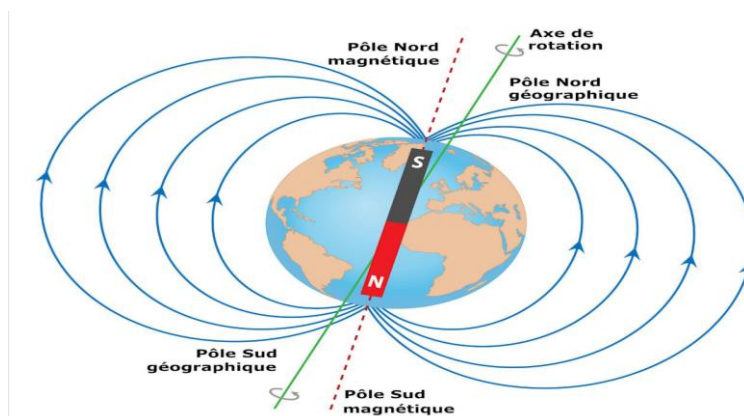


Figure 1. 4. Champ électromagnétique terrestre assimilable à celui d'un dipôle

I.1.4.2 Origines artificielles des champs électromagnétiques

Dans le domaine des basses fréquences, les lignes électriques à haute tension représentent la source principale des champs électriques, tandis que les appareils domestiques et industriels génèrent la majorité des champs magnétiques.

❖ Dans l'environnement extérieur :

L'électricité produite par les centrales est transportée jusqu'aux zones urbaines via des lignes de transmission à haute tension. Cette tension est ensuite réduite grâce à des transformateurs, pour être redistribuée localement. Sous ces lignes, les valeurs des champs électriques peuvent atteindre 12 kV/m, tandis que les champs magnétiques peuvent aller jusqu'à 30 μ T. Près des centrales électriques ou des postes de transformation, les intensités peuvent être encore plus élevées, atteignant jusqu'à 16 kV/m pour le champ électrique et 270 μ T pour le champ magnétique.

❖ Dans l'environnement domestique :

Les niveaux de champ électromagnétique dans les habitations dépendent de divers facteurs, tels que :

- La proximité des lignes électriques,
- Le type et la quantité d'appareils en fonctionnement,
- La disposition des câbles dans la maison.

En général, les champs électriques générés par les équipements ménagers ne dépassent pas 500 V/m, et les champs magnétiques sont inférieurs à 150 μ T. Cependant, à très courte distance des appareils, ces valeurs peuvent augmenter de façon significative avant de chuter rapidement avec l'éloignement.

❖ Sur les lieux de travail :

Dans les milieux industriels, des champs électromagnétiques sont présents autour des machines et câblages. Les techniciens intervenant sur les lignes de transmission ou dans les postes de distribution peuvent être exposés à des niveaux très élevés. À l'intérieur des centrales ou sous-stations, le champ électrique peut dépasser 25 kV/m et le champ magnétique atteindre 2 mT. Certains travailleurs, comme les soudeurs, peuvent être exposés à des champs magnétiques allant jusqu'à 130 mT, tandis que près des fours à induction ou des cuves d'électrolyse, les champs peuvent monter à 50 mT. À l'inverse, dans les bureaux, les expositions restent faibles, émanant d'équipements comme les photocopieurs ou les moniteurs.

I.2 Champs électromagnétiques émis par les lignes haute tension

Les lignes de transport d'électricité à haute tension sont des émettrices de champs électromagnétiques. Elles génèrent à la fois une énergie rayonnée (radiation) et une énergie non rayonnée (champs statiques). Toutefois, en raison de la faible fréquence utilisée (50 ou 60 Hz), la composante rayonnée est pratiquement négligeable. Ainsi, ces lignes sont considérées comme des sources de champs électriques et magnétiques, sans véritable émission d'ondes électromagnétiques au sens classique. Ces champs sont produits par le courant électrique circulant dans les conducteurs. Leur intensité dépend principalement de :

- la quantité de courant qui traverse les lignes,
- la distance séparant l'observateur de la ligne.

I.2.1 Le champ électrique

Un champ électrique est généré autour des lignes de transport dès lors qu'une tension électrique est appliquée entre les phases, indépendamment du courant qui y circule. Autrement dit, il suffit qu'il y ait une différence de potentiel entre les conducteurs pour qu'un champ électrique apparaisse.

L'intensité du champ diminue avec la distance par rapport aux lignes. Puisque le potentiel électrique au niveau du sol est considéré comme nul, les mesures de champ électrique doivent idéalement être prises à une certaine hauteur au-dessus du sol pour plus de précision.

Les principaux facteurs influençant l'intensité du champ électrique sont les suivants :

- La hauteur des conducteurs par rapport au sol,
- L'espacement entre les phases, notamment si deux circuits sont proches l'un de l'autre,
- La configuration géométrique des lignes (linéaire, triangulaire, etc.),
- L'environnement immédiat, comme la présence d'arbres, de clôtures ou d'autres structures métalliques pouvant perturber le champ,
- La distance latérale par rapport à l'axe de la ligne,
- L'altitude du point de mesure et la valeur de la tension appliquée aux lignes.

I.2.2 Le champ magnétique

Le champ magnétique généré par les lignes haute tension dépend de plusieurs paramètres géométriques, notamment :

- La position du point de mesure,
- La distance entre les phases,
- La hauteur des conducteurs par rapport au sol.

Contrairement au champ électrique, il ne dépend pas de la tension appliquée aux lignes, mais est directement proportionnel au courant électrique qui y circule. Ainsi, plus l'intensité du courant est élevée, plus le champ magnétique est fort.

Les principaux facteurs influençant le champ magnétique sont :

- L'intensité du courant circulant dans les conducteurs (par exemple, une ligne haute tension transporte typiquement un courant moyen de 700 A),
- La hauteur des conducteurs au-dessus du sol (le champ est maximal juste sous les câbles et décroît rapidement en s'éloignant),
- L'espacement entre les conducteurs et l'ordre des phases.
- Un facteur important est la transposition des phases :
 - Dans une ligne non transposée (où les phases sont ordonnées de la même façon des deux côtés du pylône), le champ magnétique décroît proportionnellement à l'inverse du carré de la distance à la ligne.
 - Dans une ligne transposée (où l'ordre des phases est alterné), cette décroissance est proportionnelle à l'inverse du cube de la distance, ce qui réduit considérablement l'intensité du champ magnétique à distance égale.

I.2.3 Niveaux des champs rayonnés

Les champs électromagnétiques générés par les lignes à 50/60 Hz suivent des lois de décroissance rapide avec la distance :

Le champ magnétique est proportionnel au courant, et décroît rapidement selon la distance par rapport aux conducteurs.

Le champ électrique décroît aussi fortement à mesure que l'on s'éloigne des câbles.

De manière similaire, les appareils électroménagers produisent des champs électriques et magnétiques qui diminuent rapidement avec la distance, bien que les valeurs maximales soient généralement inférieures à celles des lignes haute tension.

Les tableaux I-1 et I-2 présentent les ordres de grandeur typiques des intensités de champs émis par :

- Les lignes à haute tension,
- Divers appareils utilisés dans le domaine domestique.

Ordres de grandeur des champs électromagnétiques des lignes aériennes		
Champs Lignes aériennes	<i>Champ électrique</i> (V/m)	<i>Champ magnétique</i> (μT)
400 kV	(1) – 5000	(1) – 30
	(2) – 2000	(2) – 12
	(3) – 200	(3) – 1.5
225 kV	(1) – 3000	(1) – 20
	(2) – 400	(2) – 03
	(3) – 40	(3) – 0.3
90 kV	(1) – 1000	(1) – 10
	(2) – 100	(2) – 01
	(3) – 10	(3) – 0.1
20 kV	(1) – 250	(1) – 06
	(2) – 10	(2) – 0.2
	(3) – négligeable	(3) – négligeable
230 kV	(1) – 09	(1) – 0.4
	(2) – 0.3	(2) – négligeable
	(3) – négligeable	(3) – négligeable
(1)- sous la ligne ; (2)- à 30m de l'axe ; (3)- à 100m de l'axe		

Tableau I. 1 : Niveaux de champs électromagnétiques rayonnés par les lignes aériennes

Champ magnétique moyen rayonné par certains appareils domestiques	
Source de champ magnétique	Induction magnétique
Téléviseurs	0.2 μ T à 60 cm
	0.7 μ T à 30 cm
Sèche-cheveux	0.1 μ T à 30 cm
	30 μ T à 615 cm
Fer à repasser	0.1 μ T à 30 cm
	0.8 μ T à 15 cm
Ecran de micro-ordinateur	0.5 μ T à 30 cm
	1.4 μ T à 15 cm

Tableau 1. 2 : Niveaux de champs électromagnétiques rayonnés par des appareils domestiques

I.3 Contexte normatif

Les premières recommandations visant à limiter l'exposition humaine aux rayonnements électromagnétiques non ionisants remontent aux années 1950. En 1953, aux États-Unis, une première limite a été fixée, imposant une densité de puissance maximale de 10 mW/cm² pour les champs électromagnétiques dans la bande haute fréquence (HF), soit entre 10 MHz et 10 GHz.

À la même époque, l'URSS adopta une approche bien plus restrictive, en fixant cette limite à 10 μ W/cm², soit 1000 fois moins que la norme américaine. Cette différence traduisait une divergence d'approche entre les deux pays :

Les Américains se basaient sur un modèle thermique (effets dus à l'échauffement des tissus),

Tandis que les Soviétiques adoptaient une approche non thermique, prenant en compte d'autres effets biologiques.

En 1966, le premier standard officiel, ANSI C95.1-1966, fut élaboré par la U.S. Navy en collaboration avec l'IEEE, sur la base des recommandations de 1953. Les années suivantes ont vu une évolution progressive de ce cadre normatif :

- 1971 : introduction de limites supplémentaires,
- 1982 : intégration de la notion de taux d'absorption spécifique (SAR),
- 1991 (IEEE C95.1-1991) : prise en compte des courants induits,
- 1999 : publication du standard IEEE C95.1-1999 pour les bandes 3 kHz à 300 GHz,
- 2002 : publication du standard IEEE C95.6-2002 pour les basses fréquences (0 à 3 kHz),
- 2005 : dernière version majeure avec le standard IEEE C95.1-2005, fixant des limites pour les champs de radiofréquences de 3 kHz à 300 GHz.

En Europe, les premières initiatives datent de 1974, avec la création d'un groupe de travail sur les radiations non ionisantes au sein de l'Association Internationale pour la Protection contre les Radiations (IRPA). Ce groupe est devenu en 1977 l'INIRC, puis en 1992, la Commission Internationale de Protection contre les Radiations Non Ionisantes (ICNIRP).

Cette commission a publié plusieurs recommandations :

- 1988, 1990 et 1998 : sur l'exposition aux champs variables dans le temps,
- 1994 : sur l'exposition aux champs statiques.

Parmi les autres acteurs européens importants, on peut citer :

- Le projet COST 244 bis,
- Le National Radiological Protection Board (NRPB) au Royaume-Uni,
- Le programme de recherche sur les champs électromagnétiques de l'Organisation Mondiale de la Santé (OMS).

I.3.1 Normes sur les champs électromagnétiques de basses fréquences

Les valeurs limites d'exposition aux champs électromagnétiques adoptées par le Conseil de l'Union européenne en 1999 sont le fruit d'un long processus fondé sur des travaux d'experts. Ces recommandations s'appuient sur les analyses de comités scientifiques composés de chercheurs issus du milieu universitaire, industriel et gouvernemental.

Parmi les références les plus reconnues figurent :

- L'Organisation Mondiale de la Santé (OMS),
- L'IEEE (1991),
- l'ICNIRP (1998).

Les risques liés à l'exposition aux champs électromagnétiques, notamment en basses fréquences (50–60 Hz), sont évalués à partir d'une revue exhaustive de la littérature scientifique portant sur leurs effets à court terme avérés. Sur cette base, des valeurs limites d'exposition sont établies en tenant compte :

Des effets jugés les plus sensibles, c'est-à-dire ceux qui apparaissent à des niveaux d'exposition faibles,

De coefficients de sécurité appelés coefficients d'abattement, qui introduisent une marge de sécurité pour couvrir les incertitudes scientifiques et interindividuelles.

Ce corpus de connaissances fait régulièrement l'objet de réévaluations, afin d'ajuster les recommandations aux avancées scientifiques.

I.3.1.1 Le standard IEEE C95.1-1999

Le standard IEEE C95.1-1999 concerne la bande de fréquence 3 kHz à 300 GHz. La section qui nous intéresse ici se limite aux basses fréquences, en particulier la plage 3 kHz à 1 MHz.

Ce standard distingue deux types d'environnements :

Environnement contrôlé : exposition dans des lieux où les individus sont informés et formés, notamment les milieux professionnels.

Environnement non contrôlé : lieux publics ou privés sans surveillance particulière des expositions.

Tous les autres endroits sont considérés non contrôlés. Les grandeurs électriques prises en considération sont:

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

Le tableau I-3 présente les limites d'exposition maximales pour le champ électrique, le champ magnétique, et le courant électrique.

Fréquence [MHz]	Champ électrique [Vm^{-1}]	Champ magnétique [Am^{-1}]
0.003-0.1	614	163
0.1-3.0	614	16.3/ f
Courant [mA]		
0.003-0.1	1000 f	
0.1-100	100	

Tableau I-3: Limites d'expositions maximales (IEEE C95.1-1999)

I.3. 1.2 Les recommandations ICNIRP

Les recommandations du comité international de protection contre les rayonnements non ionisants portent sur la bande de fréquence 1Hz-300GHz. Une distinction est faite entre l'exposition dans un cadre professionnel et le grand public.

Les valeurs limites reportées dans le Tab (I-4), sont à comparer avec des grandeurs moyennées. Dans le cas du SAR, il faut considérer la valeur moyennée dans le temps sur 6 min, et dans l'espace sur une masse de 10g de tissu. Pour la densité de courant, il faut d'abord moyenner sur une surface de 1 cm² normale à la densité et ensuite considérer la valeur quadratique moyenne sur un temps de 6 min.

Fréquence [Hz]	SAR [Wkg ⁻¹]	Densité de courant [mA·m ⁻²]
0-1 Hz	-	40
1-4 Hz		40/ f
4 Hz - 1kHz		10
1-100 kHz	-	f/100
	0.4 Globale	
0.1 – 10 MHz	10 tête, thorax et ventre	f/100
	20 bras, jambes	

Tableau I. 4: Restrictions de base

I.4 Conclusion

Dans ce premier chapitre, nous avons présenté un état de l'art concernant les champs électromagnétiques à basse fréquence. Une étude bibliographique a été réalisée sur les effets de ces champs sur la santé. Cette étude nous a permis de mieux comprendre les différents types de rayonnements électromagnétiques basse fréquence, qu'ils soient d'origine naturelle ou artificielle, ainsi que le cadre normatif associé. Nous avons également passé en revue la littérature existante sur le thème des champs électromagnétiques basse fréquence et leur impact sur l'environnement.

Chapitre II

Compatibilité électromagnétique des lignes hautes tension

Introduction

Le transport de l'énergie électrique, souvent relégué au second plan derrière sa production et sa consommation, constitue pourtant un maillon fondamental du système énergétique moderne. Véritable colonne vertébrale des réseaux, il relie les centres de production aux pôles de consommation à travers une infrastructure complexe et évolutive. Depuis la fin du XIX^e siècle, les réseaux électriques n'ont cessé de croître en interconnexion, formant un maillage dense permettant un approvisionnement fiable, économique et équilibré sur l'ensemble du territoire.

La spécificité de l'énergie électrique réside dans son impossibilité d'être stockée sous forme naturelle, nécessitant une adaptation constante de la production à la demande. Ce besoin d'équilibre dynamique a mené à la structuration de vastes réseaux à haute et très haute tension (HT/THT), intégrant nœuds, sous-stations et interconnexions capables de rediriger les flux en temps réel. En Algérie, cette logique s'est traduite par l'introduction progressive de paliers de tension allant jusqu'à 400 kV pour répondre aux exigences croissantes du développement national.

Cependant, la présence de lignes HT/THT dans l'environnement engendre un ensemble de phénomènes électromagnétiques non négligeables. Couplages inductifs et capacitifs, effet de couronne, effet de peau et ionisation de l'air ambiant figurent parmi les interactions physiques observées au voisinage des conducteurs. Ces effets, souvent discrets mais potentiellement perturbateurs, doivent être soigneusement pris en compte dans le dimensionnement et l'implantation des ouvrages.

Les normes internationales, telles que celles édictées par l'Union Internationale des Télécommunications (UIT), imposent des limites strictes en matière de tension induite, en particulier pour les infrastructures critiques. Ainsi, la planification de toute nouvelle ligne HT/THT requiert une attention rigoureuse aux distances de sécurité, aux contraintes d'exploitation future et au respect des servitudes. Il en va non seulement de la fiabilité du réseau, mais aussi de la sécurité des personnes, des biens et des équipements avoisinants.

II.1 Lignes électriques aériennes

Les lignes à haute tension représentent l'un des éléments structurants les plus essentiels des grandes infrastructures énergétiques. Elles forment la colonne vertébrale des réseaux de transport d'électricité à grande échelle, assurant l'acheminement de l'énergie depuis les centres de production jusqu'aux zones de consommation. Bien que le terme « ligne à haute

tension » puisse désigner des liaisons souterraines ou sous-marines, il est couramment réservé, dans le langage professionnel, aux installations aériennes.

Ces lignes sont constituées principalement de conducteurs métalliques, souvent en alliage d'aluminium, suspendus à des structures de soutien telles que des pylônes ou poteaux. Leur rôle premier est d'assurer la continuité électrique entre deux points du réseau, appelés nœuds. Ce type de liaison est indispensable pour maintenir la stabilité du réseau et répondre aux besoins croissants en électricité.

Aujourd'hui, certaines lignes aériennes fonctionnent de manière courante à des niveaux de tension dépassant les 400 kV, illustrant l'évolution des exigences techniques du secteur. En fonction de leur rôle dans l'architecture globale du réseau, ces lignes peuvent être classées selon différentes fonctions, ce qui permet d'optimiser leur gestion et leur exploitation au sein du système électrique national.

II.1.1 Lignes de grand transport

Les lignes de grand transport jouent un rôle central dans l'acheminement de l'électricité sur de longues distances. Elles relient directement les centres de production aux zones de forte consommation ou aux grands nœuds d'interconnexion du réseau. Leur importance réside dans leur capacité à transporter d'importants volumes d'énergie tout en assurant la stabilité globale du système électrique.

II.1.2 Lignes d'interconnexion

Ces lignes permettent l'intégration et la mutualisation des capacités de production entre différentes régions, voire entre plusieurs pays. Elles forment un réseau maillé favorisant la solidarité énergétique, en particulier lors de pannes majeures ou de déséquilibres soudains entre l'offre et la demande. Les lignes d'interconnexion assurent ainsi une meilleure résilience du réseau électrique.

II.1.3 Lignes de répartition

Les lignes de répartition ont pour fonction de transférer l'électricité depuis les grands postes d'interconnexion vers des postes intermédiaires. Ces derniers alimentent soit les réseaux de distribution locaux, soit les installations de grands consommateurs industriels. Elles représentent un maillon intermédiaire entre le transport longue distance et la distribution finale.

II.1.4 Lignes de distribution

Ce sont les lignes qui délivrent directement l'électricité aux utilisateurs finaux. Elles se divisent en deux grandes catégories :

Les lignes d'ossature, qui utilisent des conducteurs de forte section pour transporter l'énergie principale,

Les lignes d'écarts, à structure plus légère, souvent radiales, qui alimentent les zones secondaires ou isolées.

II.2 Éléments constitutifs des lignes aériennes

Les lignes électriques aériennes assurent le transport de l'énergie sur de vastes distances à travers des infrastructures robustes. Elles se composent généralement de trois phases, chacune pouvant intégrer un faisceau de un à quatre conducteurs espacés de quelques centimètres. Cette configuration en faisceau vise principalement à réduire l'effet couronne, un phénomène à l'origine de pertes spécifiques différentes des pertes Joule classiques. L'ensemble de ces trois phases constitue ce que l'on appelle un *terne*.

La conception physique de la ligne, incluant la forme, la taille et le type de pylônes utilisés, influence fortement les champs électromagnétiques générés une fois la ligne mise en service. En effet, contrairement aux autres composants qui répondent à des normes techniques rigides, le choix du pylône reste un levier de conception déterminant. C'est pourquoi une attention particulière est accordée à cet élément dans l'approche théorique.

Les pylônes, quant à eux, sont systématiquement reliés à un réseau de mise à la terre performant, assurant la sécurité de l'installation. Ils supportent les conducteurs à l'aide d'isolateurs en verre ou en porcelaine, conçus pour résister aux hautes tensions. La longueur des isolateurs est proportionnelle au niveau de tension de la ligne. Pour prévenir les dégâts causés par les surtensions, ces isolateurs sont équipés d'éclateurs, dispositifs composés de deux pointes métalliques opposées. En cas de foudre, un arc électrique se forme entre les pointes, permettant de dériver la surtension et d'éviter la destruction de l'isolateur.

Une ligne aérienne est donc constituée principalement des éléments suivants :

Conducteurs (câbles transportant le courant),

Pylônes (structures porteuses),

Isolateurs (éléments d'isolation et de suspension),

Fils de garde (fils de protection contre la foudre).

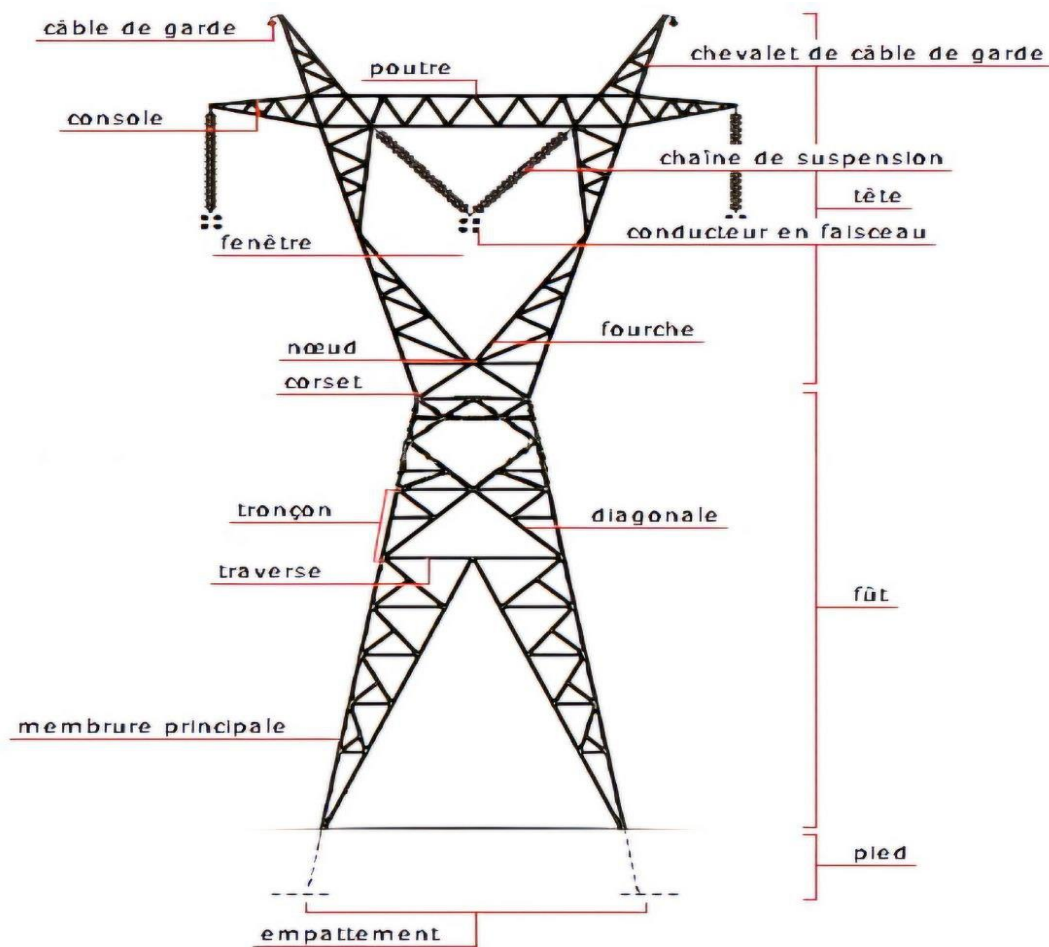


Figure II.1 Éléments constitutifs des lignes électriques aériennes

II.2.1 Pylônes

Pour permettre l'acheminement de l'électricité sur de longues distances, les conducteurs doivent être soutenus par des structures adaptées appelées pylônes. Leur fonction principale est de maintenir les câbles à une hauteur de sécurité suffisante, protégeant ainsi les personnes et les infrastructures environnantes. Le choix du type de pylône dépend de plusieurs critères, tels que :

- Le type de ligne à planter,
- Les caractéristiques du terrain,
- Les contraintes climatiques.

Pour les lignes à très haute tension, on privilégie des pylônes métalliques en treillis ou tubulaires, plus robustes et adaptés aux grandes hauteurs requises.

II.2.1.1 supports métalliques

On regroupe sous le terme support les structures telles que pylônes, poteaux et portiques.

- Les pylônes désignent des supports à plusieurs pieds (multipodes),
- Les poteaux sont des supports à un seul pied (monopodes).
- Les éléments clés d'un support sont :
 - Le fût : structure principale en segments,
 - Les consoles : points d'accrochage des conducteurs,
 - Les chevalets : pour les câbles de garde,
 - Les embases : liaison avec les fondations.

II.2.1.2 Familles de supports

Pour standardiser leur fabrication, les supports sont regroupés en familles selon leur forme, résistance et hauteur. Les principales familles sont :

- Supports métalliques en treillis : assemblés à partir de profilés en acier boulonnés,
- Supports monopodes métalliques : en acier tubulaire emboîté,
- Supports en béton : avec fût et consoles en béton armé ou précontraint.

Il existe aussi des supports mixtes aéro-souterrains, dérivés des familles principales.

La géométrie du support résulte d'un compromis entre la stabilité mécanique, l'encombrement au sol et l'agencement des câbles. On distingue plusieurs configurations d'accrochage :

Type "*chat*" : disposition horizontale simple, idéale pour éviter le croisement des phases,

Double drapeau : configuration verticale à double circuit, plus compacte en largeur mais plus haute,

Type triangle : agencement compact à une seule nappe de conducteurs, interdit le double circuit.

*. Disposition de l'armement

L'armement désigne l'agencement géométrique des conducteurs (et câbles de garde) sur le support. On en distingue principalement deux grandes catégories, adaptées selon le type de ligne, la tension et l'environnement.

- **Conducteur disposé à des étages différents**

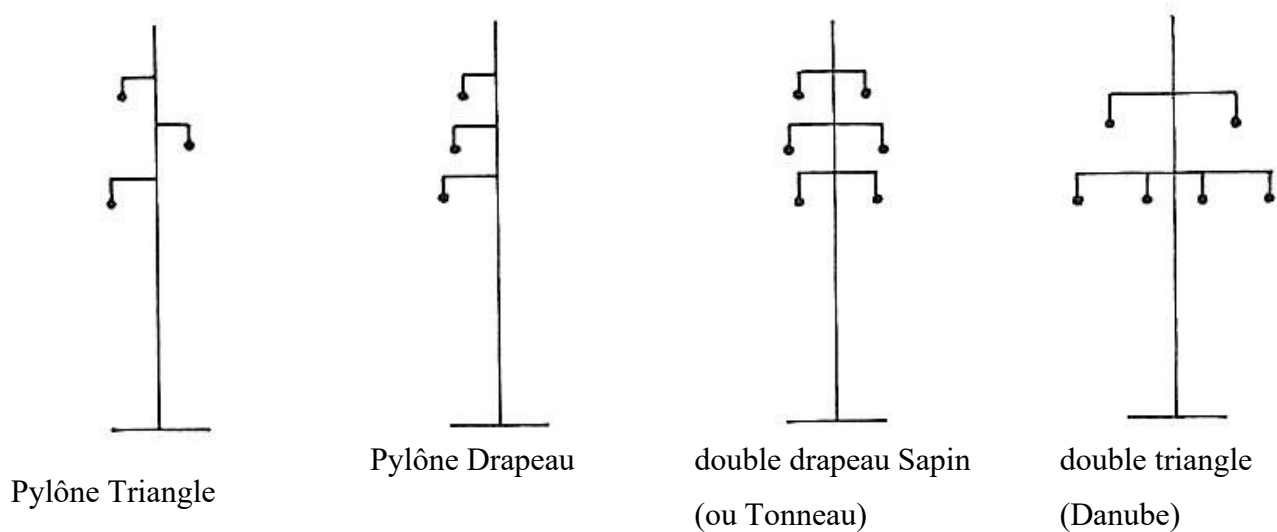


Figure II.2 Types de supports à phases étagées

- **Conducteurs disposés au même niveau ou à des niveaux peu différents**

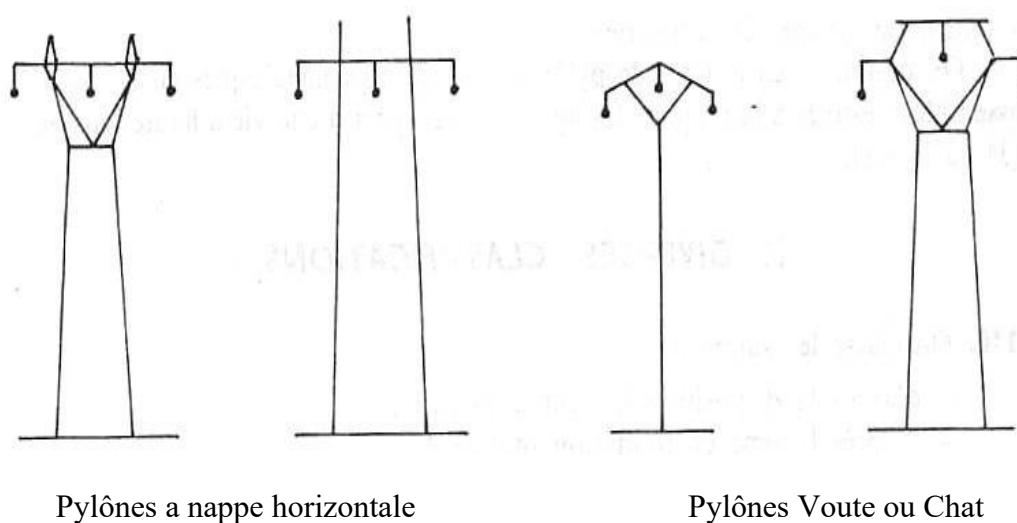


Figure II.3 Pylônes ou portiques à armement nappe ou nappe-voute

Pour les lignes hautes et extra haute tension, des configurations variées sont conçues selon le nombre de circuit alternatifs et les conditions locales [63].

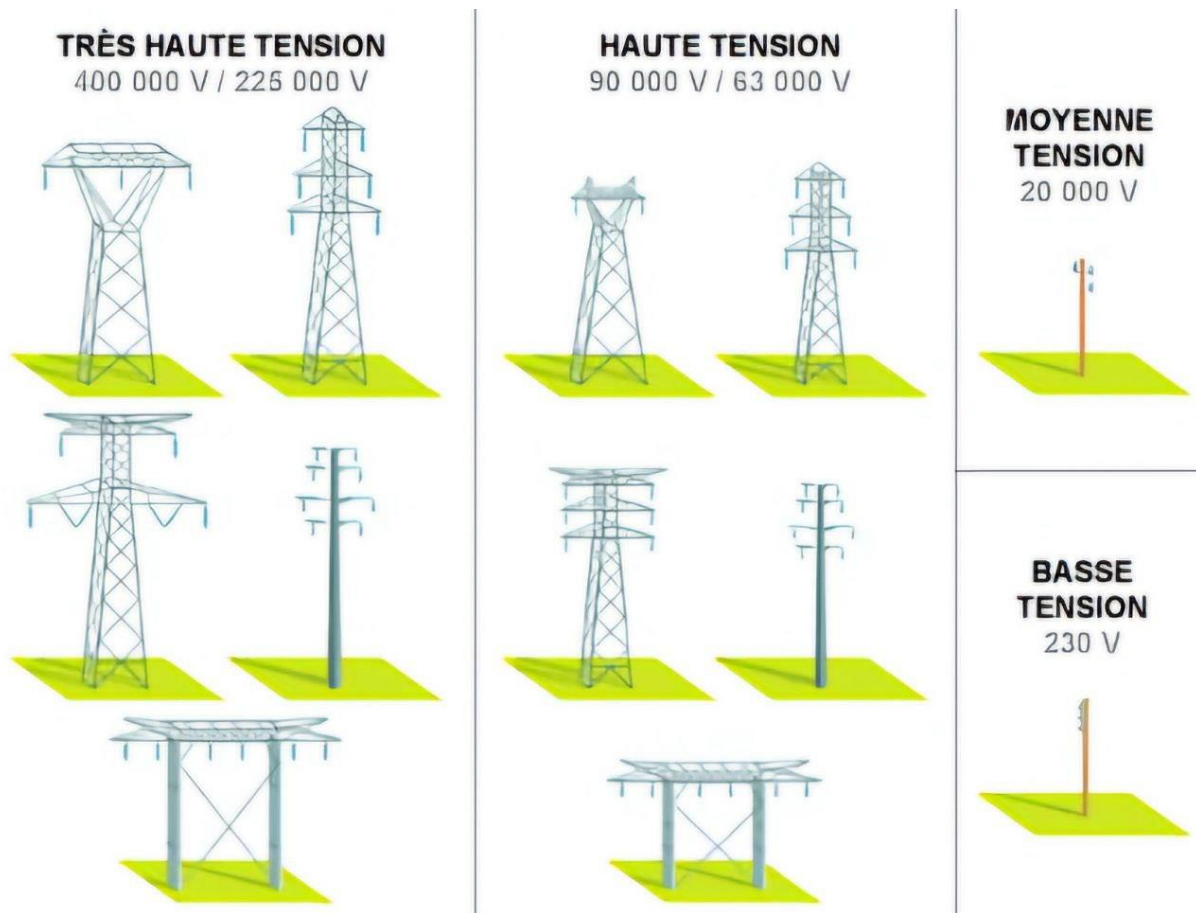


Figure II.4 Configurations typiques des pylônes pour les lignes HT/THT

II.2.1.3 Matériaux

Les matériaux utilisés dans la fabrication des supports doivent répondre à deux impératifs : la robustesse mécanique exigée par l'exploitation et la résistance aux conditions environnementales, conformément aux réglementations en vigueur. Les aciers utilisés, en particulier ceux formés à froid, ainsi que les éléments d'assemblage (boulons, écrous, rondelles), doivent respecter la norme EN 50341. Par ailleurs, leur aptitude à la galvanisation à chaud, suivant la norme NF A 35-503, est un critère fondamental pour garantir la durabilité face à la corrosion.

II.2.1.4 Dimensionnement mécanique et charges appliquées

Les supports sont conçus selon un cahier des charges rigoureux. Les efforts mécaniques à prendre en compte sont classés en quatre catégories principales :

II.2.1.4.1 Charges permanentes

Ce sont les charges issues du poids propre du support, indépendamment des conducteurs ou câbles de garde.

II.2.1.4.2 Charges dues aux conducteurs et câbles de garde

Elles varient selon le type de support et les conditions climatiques supposées, et sont appliquées aux points d'ancrage.

II.2.1.4.3 Charges climatiques

Elles incluent les effets du vent, du givre ou de la neige sur les supports et conducteurs.

II.2.1.4.4 Charges liées aux opérations

Elles comprennent les efforts engendrés par les activités d'installation, d'entretien ou en cas d'incident (ex. rupture de câble, présence de monteurs, déroulage...).

II.2.1.5 Dimensionnement géométrique

Le support doit respecter des contraintes géométriques relatives :

A l'isolation diélectrique (distances de sécurité),

A l'accessibilité pour la maintenance,

A l'espacement entre câbles et conducteurs.

II.2.1.5.1 Durabilité

Un support doit rester fonctionnel pendant au moins 50 ans, avec un entretien périodique tous les 10 ans environ. Sa conception doit anticiper les conditions environnementales, garantissant qu'aucune dégradation majeure n'apparaisse, ni sur le plan esthétique ni mécanique.

Les niveaux de champ électrique et magnétique autour des ouvrages doivent respecter les seuils de sécurité :

Champ électrique $< 5 \text{ kV/m}$

Champ magnétique $< 100 \text{ } \mu\text{T}$

Ces critères s'appliquent principalement aux ouvrages 400 kV, et nécessitent une analyse approfondie de la topologie de la ligne, sa position dans le réseau, et les puissances transitant au moment de l'évaluation.

II.2.2 Conducteurs

Chaque ligne aérienne comporte au moins trois conducteurs, souvent réalisés en alliage d'aluminium, parfois renforcés par une âme en acier pour les versions plus anciennes. Ces

conducteurs sont nus, c'est-à-dire dépourvus d'isolant, et leur conception vise à assurer une résistance mécanique et une conductivité thermique optimales.

La capacité de transport d'une ligne dépend du type de conducteur utilisé et des conditions météorologiques locales. Il faut veiller à ce que la flèche thermique des conducteurs – due à l'échauffement par effet Joule – ne les rapproche pas du sol ou de la végétation, ce qui compromettrait la sécurité.

Les lignes haute tension peuvent être aériennes, souterraines, voire sous-marines, en fonction des contraintes géographiques.

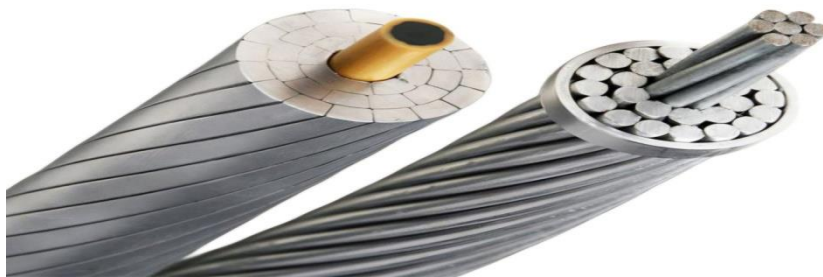
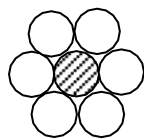
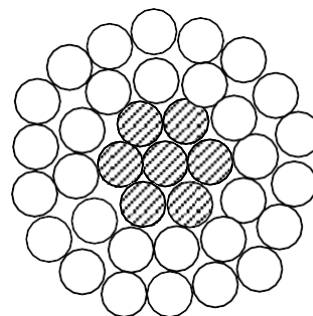


Figure II.5 Conducteur conventionnel sur la gauche et à âme en fibre composite à droite

L'âme au centre assure les propriétés mécaniques, l'aluminium à l'extérieur assure les propriétés électriques du conducteur



conducteurs à fils d'acier et six fils d'Alu



conducteur à 7 fils d'acier et 30 fils d'Alu

Figure II.6 Conducteur en âme d'acier

II.2.2.1 Caractéristiques et contraintes des conducteurs aériens

Les conducteurs aériens sont constamment exposés aux conditions climatiques telles que le vent, la pluie, le verglas ou les variations de température. Ces éléments influencent directement la conception d'une ligne à haute tension, notamment en ce qui concerne :

- Le type de conducteur (matériau et géométrie),
- La hauteur et l'espacement des pylônes,

La tension mécanique maximale supportée par les câbles afin de garantir une garde au sol adéquate.

Ces choix techniques ont un impact notable sur les coûts de construction et de maintenance, mais aussi sur la fiabilité et la durée de vie de l'installation.

Par ailleurs, la position spatiale des conducteurs joue un rôle dans la distribution et l'intensité du champ magnétique généré par la ligne, ce qui en fait un facteur clé dans les études d'impact électromagnétique.

Pour être conformes aux exigences opérationnelles, les conducteurs doivent présenter les propriétés suivantes :

- Faible résistance électrique, pour assurer une bonne conductivité et limiter les pertes,
- Résistance mécanique élevée, capable de supporter les efforts liés à leur mise en tension,
- Légèreté, afin de minimiser le poids total supporté par les structures,
- Durabilité et sécurité, assurant un fonctionnement fiable à long terme.

Les calculs de résistance doivent suivre les normes internationales en vigueur. De plus, l'analyse des effets climatiques comme le givre, la température ambiante ou la force du vent est essentielle dans le dimensionnement. Du point de vue électrique, les conducteurs étant constitués de torons et non pleins, on utilise un paramètre appelé Rayon Moyen Géométrique (RMG) pour représenter leur rayon effectif. Dans le cas des faisceaux de conducteurs, un rayon fictif équivalent est utilisé pour les calculs électromagnétiques.

II.2.2.2 Rayon moyen géométrique des conducteurs toronnés

Dans le cas des conducteurs composés de brins toronnés, le calcul du Rayon Moyen Géométrique (RMG) s'effectue en fonction de deux paramètres essentiels : la section efficace (S) du conducteur et le nombre total de brins qui le constituent. Ce rayon représente une valeur équivalente du point de vue électrique, utilisée pour l'évaluation des effets électromagnétiques autour des câbles, en particulier pour les configurations en faisceaux.

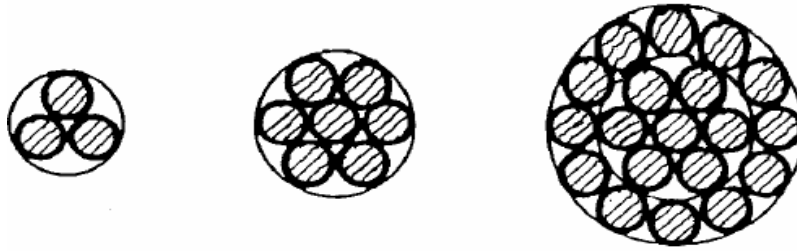


Figure II.7 Conducteurs toronnés

Désignation	Rayon moyen géométrique RMG g11
Conducteur de section circulaire pleine	$0.4394S^{1/2}$
Corde circulaire à 7 brins	$0.4642S^{1/2}$
Corde à 3 brins sans âme centrale	$0.4750S^{1/2}$
Corde circulaire à 19 brins	$0.4902S^{1/2}$
Corde circulaire à 37 brins	$0.4982S^{1/2}$
Corde circulaire à 61 brins	$0.5020S^{1/2}$
Corde circulaire à 91 brins	$0.5038S^{1/2}$
Corde circulaire à 127 brins	$0.5046S^{1/2}$

Tableau II.1 Rayon moyen géométrique des conducteurs toronnés

II.2.2.3 Rayon moyen géométrique des conducteurs en faisceaux

Lorsqu'une phase est composée d'un faisceau de deux conducteurs ou plus, ceux-ci sont disposés de manière symétrique autour d'un axe central, tous de même diamètre. Cette configuration permet de réduire l'effet de couronne et d'améliorer les performances électromagnétiques. Le rayon moyen géométrique (RMG) utilisé dans les calculs dépend alors de la géométrie du faisceau, comme illustré dans le tableau suivant.

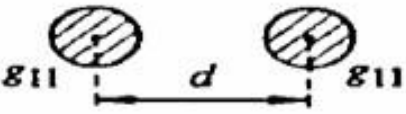
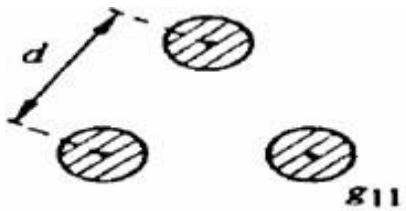
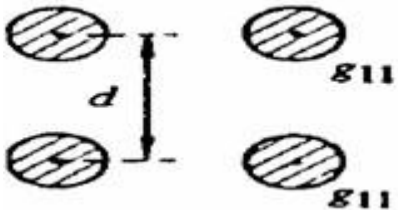
Disposition des conducteurs de phases	Rayon moyen géométrique G ₁₁
	$G_{11} = (g_{11} \cdot d)^{1/2}$
	$G_{11} = g_{11}^{1/3} \cdot d^{2/3}$
	$G_{11} = 2^{1/8} \cdot g_{11}^{1/4} \cdot d^{3/4}$

Tableau II.2 Rayon moyen géométrique des conducteurs en faisceaux

II.2.3 Isolateurs

Les isolateurs jouent un rôle double et essentiel dans les lignes aériennes : ils assurent à la fois le maintien mécanique des conducteurs sur les pylônes et l'isolation électrique entre ces deux composants. Leur conception doit permettre de résister durablement aux contraintes mécaniques, climatiques et électriques sur plusieurs décennies sans perte de performance.

Sur le plan électrique, un isolateur efficace doit présenter une résistance d'isolement élevée, empêchant toute décharge de contournement en surface ou perforation interne due aux fortes tensions qu'il supporte. Pour optimiser cette protection, les isolateurs sont souvent moulés en forme de jupe, ce qui augmente leur chemin de fuite et renforce leur tenue aux surtensions.

Ils sont fabriqués principalement en verre, porcelaine ou céramique, et prennent généralement la forme de disques (ou assiettes). Ces disques sont ensuite assemblés en chaîne, formant des isolateurs adaptés aux niveaux de tension requis.

II.2.4 Câbles de garde

Les câbles de garde, installés au-dessus des conducteurs de ligne, ne sont pas destinés à transporter du courant électrique. Leur rôle principal est de servir de protection contre la foudre : en captant les décharges électriques atmosphériques, ils évitent que celles-ci n'atteignent directement les conducteurs, réduisant ainsi le risque de surtension ou de perturbation de tension susceptible d'affecter les utilisateurs.

Ces câbles sont généralement fabriqués à partir d'un alliage alu-méc-acier, combinant résistance mécanique et conductivité. Dans certains cas, on intègre au cœur du câble un faisceau de fibre optique, utilisé pour la transmission de données par l'opérateur : on parle alors de câble de garde à fibre optique (OPGW). Lorsqu'il s'agit d'ajouter une fibre à un câble de garde existant, une technique dite « LASHED » est employée, consistant à enrouler la fibre optique en spirale autour du câble à l'aide d'un robot spécialisé.

II.3 Avantages et inconvénients des lignes électriques aériennes

II.3.1 Avantages

Les lignes aériennes présentent plusieurs atouts notables, notamment :

Un coût réduit comparé aux lignes souterraines, tant pour l'installation que pour les réparations éventuelles,

Une accessibilité visuelle, facilitant la détection rapide des défauts ou anomalies,

Une intervention rapide possible en cas de panne ou de dommage,

Une capacité à supporter des surcharges temporaires de courant sans risque immédiat majeur.

II.3.2 Inconvénients

Malgré leurs avantages, ces lignes comportent également plusieurs limites :

Sensibilité aux surtensions atmosphériques, notamment dues à la foudre,

Contraintes foncières, car leur tracé peut susciter des conflits avec les propriétaires des terrains traversés,

Impact visuel et esthétique, qui peut nuire à l'intégration paysagère,

Risques d'interférences électromagnétiques, pouvant perturber les circuits de télécommunications,

Émissions radioélectriques, affectant la qualité de réception des signaux de radio et de télévision,

Risque pour la sécurité, en cas de rupture accidentelle des conducteurs.

II.4 Tensions de fonctionnement

Le réseau électrique algérien utilise une hiérarchie de niveaux de tension adaptée aux différents usages :

Niveau de tension	Different usage
Basse tension (BT) 220 et 380 V	Destinée aux habitations, petits commerces et usages utilitaires,
Haute tension classe A (HTA) 10 et 30 KV	Utilisée pour alimenter les zones urbaines et rurales
Haute tension classe B (HTB) : 60 kV, 90 kV, 150 kV, 220 kV, 400 kV	Réservée au transport régional de grandes quantités d'énergie,
Très haute tension (THT) 400 KV \geq	utilisée pour les liaisons longues distances et l'interconnexion à grande échelle du réseau électrique national.

Tableau II.3 les niveaux de tension et leur usage dans le réseau électrique Algérien

II.5 Interférence des lignes électrique HT avec l'environnement

II.5.1 Couplage inductif

Le phénomène d'induction résulte du passage de courants électriques dans les conducteurs d'un ouvrage voisin, appelé inducteur, générant autour de lui un champ magnétique variable. Ce champ, à son tour, induit une force électromotrice (fem) dans un autre conducteur situé à proximité, qualifié de conducteur perturbé. Tant que le courant circule dans la ligne inductrice, l'induction magnétique persiste, agissant ainsi comme une source de tension continue.

Dans ce contexte, le conducteur soumis à l'induction peut être comparé à l'enroulement secondaire d'un transformateur, alors que la ligne haute tension joue le rôle de l'enroulement primaire (voir figure II.8)

Lorsque ce conducteur perturbé est relié à la terre en un point donné, ce point fixe son potentiel au niveau de la terre. Toutefois, cette mise à la terre entraîne l'apparition d'un courant continu d'induction, généré par le couplage magnétique avec la ligne inductrice. Plus on s'éloigne de ce point de mise à la terre, plus la tension induite augmente.

L'ajout d'un second point de mise à la terre transforme le conducteur en une boucle fermée, parcourue par un courant résultant de l'induction. Chaque mise à la terre supplémentaire modifie la distribution du potentiel électrique le long du conducteur, influençant ainsi l'amplitude et la direction du courant induit.

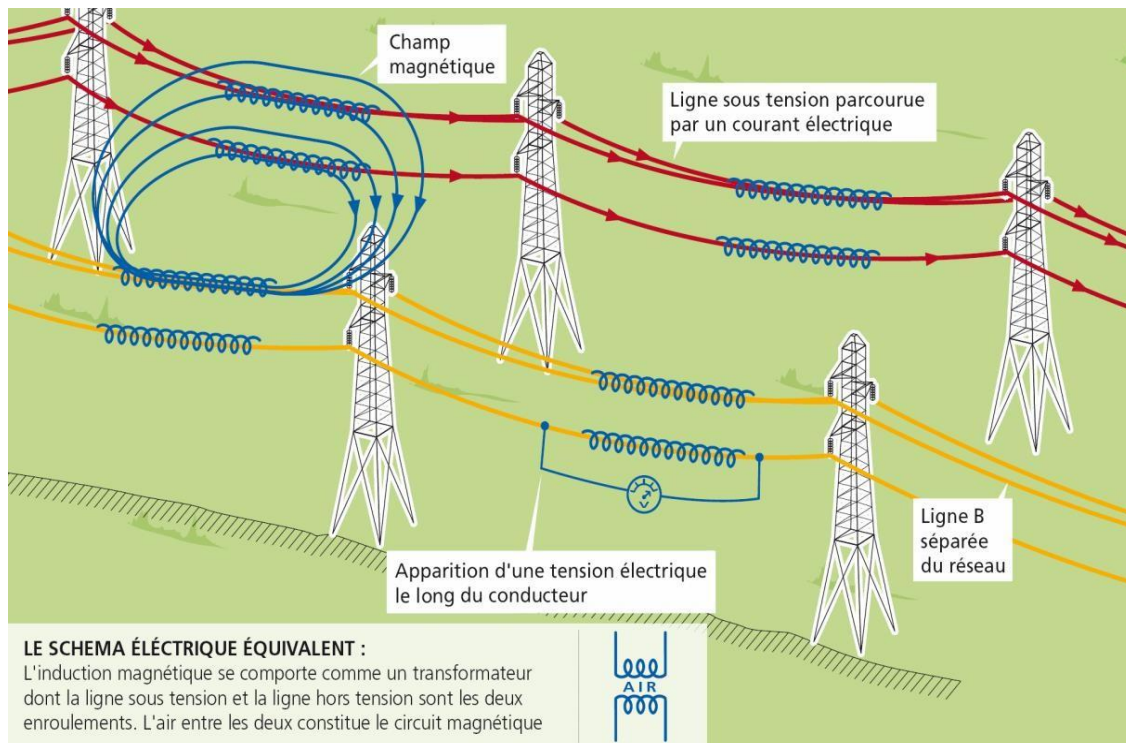


Figure II.8 Couplage Inductif à proximité des ouvrages HT/THT

II.5.2 Couplage capacitif

Le couplage capacitif se manifeste par l'apparition d'une tension électrique entre un conducteur et les masses environnantes (comme les pylônes, équipements, engins, ou le sol), ou entre deux conducteurs proches. Ce phénomène se produit simplement par la proximité d'un ou de plusieurs ouvrages sous tension, même si le conducteur concerné n'est pas connecté électriquement au réseau.

La tension induite est en général uniformément répartie sur toute la longueur du conducteur soumis à ce couplage.

Le couplage capacitif demeure actif de manière continue, tant que le conducteur est isolé électriquement du réseau et que des ouvrages voisins restent sous tension. Dans cette configuration, le

phénomène agit comme un véritable générateur de courant, injectant un courant capacitif dans les éléments exposés à ce champ électrique environnant.

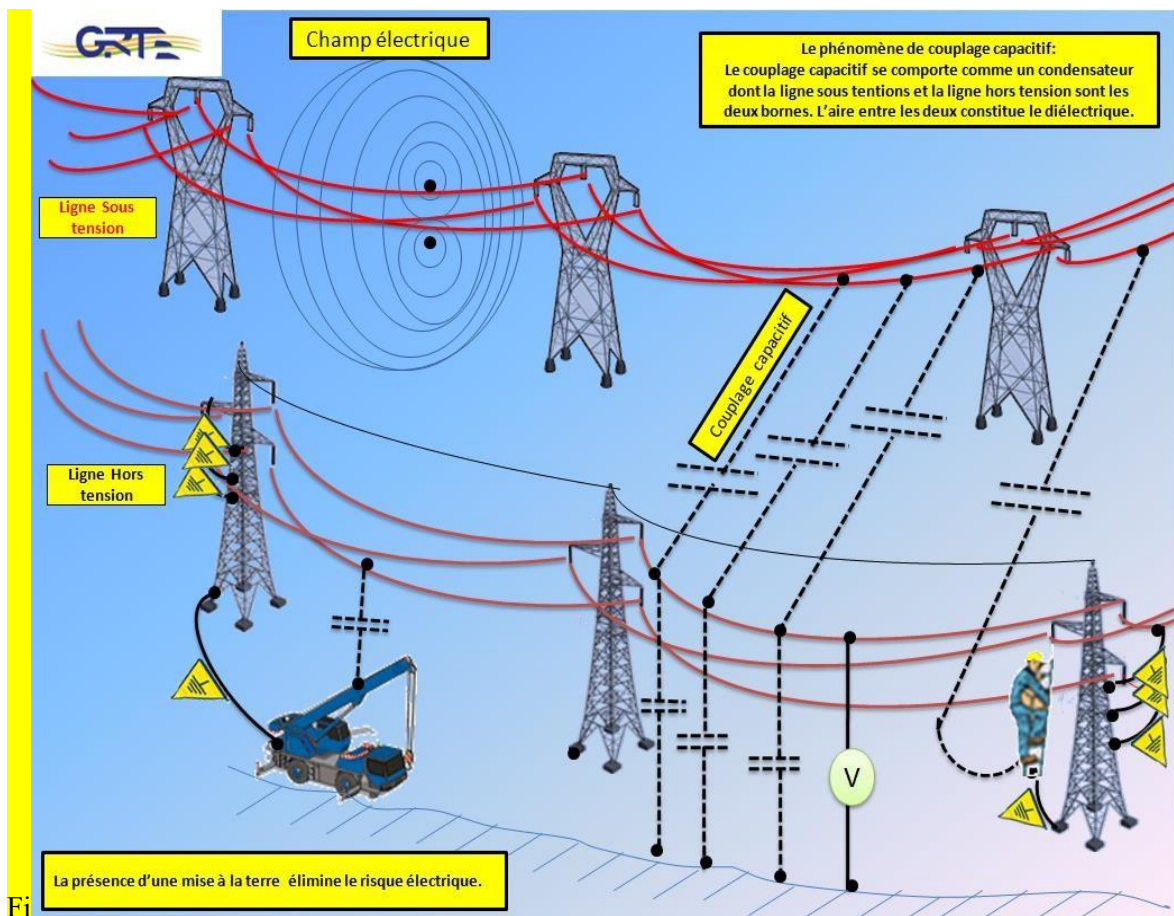


Figure II.9 Couplage Capacitif à proximité des ouvrages HT/THT

II.6 Contraintes de proximité – Induction magnétique et capacitive – Conduction

Lors de l'implantation ou de l'exploitation de lignes HT/THT, plusieurs contraintes liées à l'environnement proche doivent être soigneusement prises en compte, notamment celles résultant de l'induction électromagnétique (magnétique et capacitive) ainsi que du courant de conduction.

- Ces contraintes sont particulièrement critiques dans les cas suivants :
- Présence à proximité de réseaux électriques de tension plus faible (BT/MT),
- Voisinage de réseaux de télécommunications,
- Proximité d'infrastructures ferroviaires,
- Présence de canalisations de transport de fluides (eau, gaz, pétrole...),

- Proximité de zones de stockage de produits inflammables, qu'ils soient liquides ou gazeux,
- Alignement parallèle avec ouvrages linéaires tels que clôtures ou glissières d'autoroute,
- Présence de remonte-pentes ou téléphériques,
- Enfin, la protection des personnes et des équipements tiers contre les risques électriques potentiels.

Une analyse approfondie des interactions entre les réseaux coexistants est impérative, en conformité avec la législation en vigueur et les accords interinstitutionnels existants. Il est également fondamental d'informer toutes les parties concernées des perturbations possibles et de valider avec elles les mesures techniques envisagées pour en limiter les effets.

II.6.1 Proximité avec des réseaux MT/BT

Lorsqu'un pylône d'une ligne HT/THT se trouve à proximité d'un support d'une ligne moyenne ou basse tension (MT/BT) équipé d'un système de mise à la terre, il est essentiel d'appliquer des mesures de sécurité.

En cas de défaut à la terre sur la ligne HT/THT, il faut s'assurer que la tension induite dans le neutre du réseau MT/BT ne dépasse pas 1500 V [66, 67] .

Dans le cas où les lignes HT/THT et MT/BT partagent une même infrastructure physique, ou reposent sur un support commun, l'installation doit impérativement respecter les règles définies par le Règlement Technique [67] .

II.6.2 Proximité avec les réseaux de télécommunications

Les réseaux de télécommunications assurent uniquement la transmission de signaux ou d'informations (voix, données, commandes à courant faible...). Cela inclut :

Les lignes téléphoniques et télégraphiques.

Les réseaux de télédistribution.

Les lignes de télécommande industrielles.

Ces infrastructures sont gérées par différents opérateurs : entreprises de télécoms, la SNTF (chemin de fer), sociétés autoroutières, exploitants énergétiques, ou industriels [66, 67] .

La cohabitation entre une ligne électrique HT/THT et un réseau de télécommunications doit être soigneusement encadrée pour que :

- Les effets d'induction électromagnétique
- Les influences capacitatives
- Et les éventuelles élévations de potentiel accidentelles ou permanentes

Ne présentent aucun danger pour les personnes, ni de dommages sur les équipements de télécommunications. De plus, les signaux transmis doivent rester intacts même lorsque la ligne électrique fonctionne normalement.

Pour les calculs d'interférence et la mise en œuvre des mesures correctives, il faut se référer à :

- La section IV du Règlement Technique « voisinage des lignes aériennes de télécoms »
- Les recommandations CCITT (édition 1989),
- Et les normes UIT-T, en plus de tout accord bilatéral applicable.

II.6.3 Proximité des exploitations agricoles et d'élevages

Il est tout à fait possible de pratiquer des activités agricoles sous les lignes haute ou très haute tension (HT/THT), à condition de sélectionner des cultures adaptées aux contraintes imposées par la présence des infrastructures électriques. Il faut notamment considérer :

- L'emplacement des pylônes, qui engendrent la création de zones non exploitables (enclaves),
- Le mode d'irrigation, en privilégiant des systèmes autres que l'aspersion,
- Le respect des distances de sécurité lors de l'utilisation de matériels agricoles (tracteurs, pulvérisateurs, etc.).

Concernant les exploitations d'élevage, il convient de tenir compte :

- Des distances réglementaires pour l'implantation des bâtiments d'élevage et leurs annexes,
- Des exigences normatives liées à la mise en place de liaisons équipotentiellles, avec une mise à la terre efficace de toutes les structures métalliques.
- L'impact de l'installation de supports électriques sur des terrains agricoles peut se traduire essentiellement par :
 - Des pertes de temps lors des manœuvres agricoles,
 - Une réduction des rendements liée à l'occupation de surface,
 - Des coûts supplémentaires d'entretien, notamment pour le désherbage autour des installations.

L'ampleur de ces désagréments varie principalement selon :

- Les dimensions des supports,
- Leur positionnement sur la parcelle
- Le type de culture pratiquée

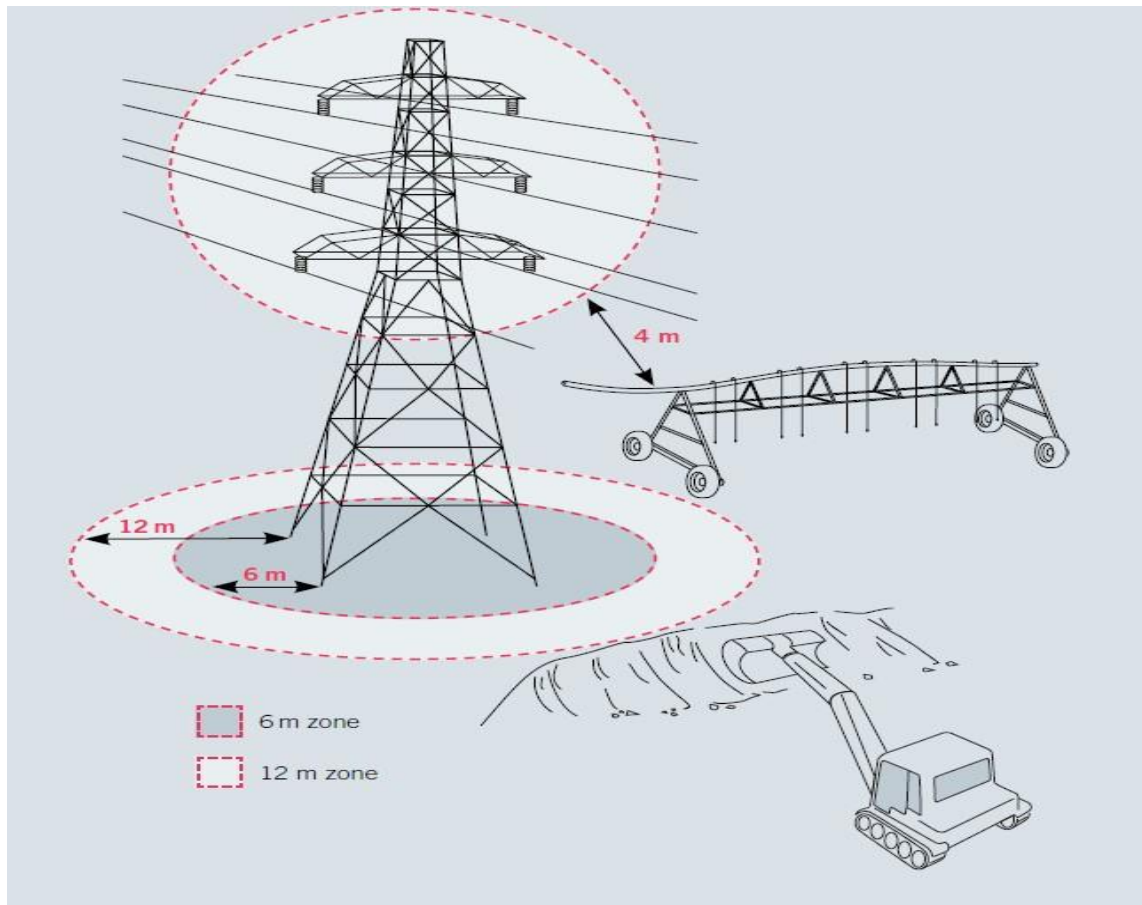


Figure II.10 Distances d'approches dans une exploitation agricole

II.6.4 Proximité des ouvrages linéaires de type clôture, glissière d'autoroutes

Les structures métalliques linéaires, telles que les clôtures ou les glissières de sécurité routière, lorsqu'elles sont parallèles à une ligne HT/THT et reliées électriquement au sol à un ou plusieurs points, peuvent former des boucles conductrices propices aux courants induits.

Pour limiter la taille de ces boucles et en réduire les effets électromagnétiques :

Il est recommandé de raccorder ces structures à la terre à intervalles réguliers,

Ou de les interrompre par des sections isolantes.

Toute installation de ce type à proximité d'une ligne haute tension nécessite une étude spécifique visant à garantir la sécurité des personnes [67, 68] .

II.6.5 Proximité des canalisations de transport de fluide

En conformité avec les réglementations techniques en vigueur, des précautions particulières doivent être prises lorsqu'une canalisation de transport de fluide (telle qu'une conduite d'eau, de gaz ou d'hydrocarbures) se trouve à proximité d'une ligne HT/THT.

- Ces mesures ont pour but de prévenir :
- La dégradation de la gaine isolante de la canalisation,
- Le franchissement des joints isolants, notamment en cas de court-circuit monophasé à la terre.

Il est impératif de respecter une distance minimale de 2 mètres entre la canalisation et le système de mise à la terre du pylône, incluant tous les composants améliorant l'efficacité de l'ancrage au sol.

Lors d'un défaut, il faut vérifier que la tension totale appliquée à la canalisation — résultant à la fois du courant de court-circuit circulant dans la terre et de l'induction magnétique engendrée par la ligne —

Ne dépasse pas 4000 à 5000 volts. Cette limite doit être confirmée avec le gestionnaire de la canalisation concernée.

D'un point de vue pratique, on considère que la contrainte électrique maximale sur l'isolant de la conduite est équivalente à la somme arithmétique des tensions efficaces générées par :

L'induction magnétique, qui élève le potentiel de la canalisation par rapport au sol et la conduction électrique, due au courant de défaut circulant dans la prise de terre du pylône, qui modifie localement le potentiel du sol autour de la conduite par rapport au métal.

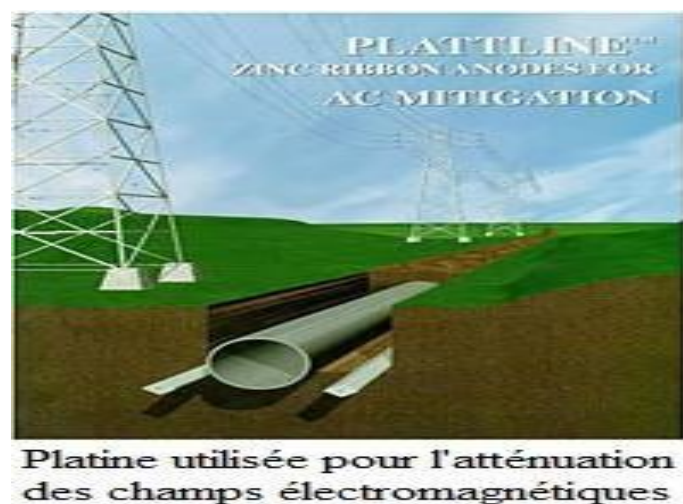


Figure II.11 Proximité des canalisations de transport de fluid

II.7 Effet de peau

L'effet de peau ou effet pelliculaire est un phénomène électromagnétique qui fait qu'à fréquence élevée, le courant a tendance à ne circuler qu'en surface des conducteurs.

Ce phénomène d'origine électromagnétique existe pour tous les conducteurs parcourus par des courants alternatifs, il provoque la décroissance de la densité de courant à mesure que l'on s'éloigne de la périphérie du conducteur. Il en résulte une augmentation de la résistance du conducteur, ce qui conduit à des pertes par effet joule plus importantes [49, 70, 71].

Cet effet peut être utilisé pour alléger le poids des lignes de transmission à haute fréquence en utilisant des conducteurs tubulaires, ou même des tuyaux, sans perte de courant. Il sert aussi dans le blindage électromagnétique des fils coaxiaux en les entourant d'un mince étui métallique qui garde les courants induits par les hautes fréquences ambiantes sur l'extérieur du câble [70]. L'effet de peau consiste en une circulation du champ électromagnétique, qu'au voisinage de la surface du conducteur, sur une épaisseur :

$$\delta = \frac{2}{\omega \cdot \mu \cdot \sigma}$$

Avec :

ω : pulsation [rad/s]

μ : perméabilité magnétique

σ : conductivité électrique.

En hautes fréquences, le courant tend à être confiné en surface du conducteur.



Figure II.12 Effet de peau

II.8 Effet couronne : bruits radioélectriques et acoustiques :

L'**effet couronne** désigne l'ensemble des phénomènes physiques qui apparaissent lorsqu'un **gaz environnant un conducteur sous très haute tension** devient partiellement conducteur. Ce phénomène est induit par un **champ électrique intense** au voisinage immédiat du conducteur, suffisant pour **ioniser l'air**.

Lorsque la **valeur du champ électrique** à la surface du conducteur dépasse le **seuil d'ionisation de l'air** (environ 30 kV/cm), des **décharges localisées** se forment sous forme de **crépitements**, accompagnés de **lueurs bleutées** et de **petites aigrettes lumineuses** visibles principalement **la nuit**, notamment sur les **lignes THT (≥ 400 kV)**.

Si cet effet est généralement **redouté** pour ses **inconvenients techniques**, tels que :

- les **pertes d'énergie par couronne**, qui augmentent avec la tension,
- les **interférences radioélectriques** nuisibles aux communications,
- le **bruit acoustique** et les **vibrations mécaniques** des conducteurs, il est également **exploité favorablement** dans plusieurs domaines industriels, comme :
 - les **filtres électrostatiques**,
 - les **séparateurs d'ions**,
 - ou encore les **systèmes de photocopie**.

Ce phénomène ne se limite pas aux seuls conducteurs de ligne : il peut aussi se manifester sur **les structures métalliques des pylônes**, telles que les **bras de support**, ainsi que sur **les isolateurs**, notamment en **conditions humides** où la permittivité de l'air est plus propice à l'ionisation [48, 70, 71] .



Figure II.13 Effet de couronne avec présence de petites saillies à la surface des conducteurs

II.9 Conclusion

Les lignes électriques, notamment celles à haute et très haute tension (HT/THT), font encore aujourd'hui l'objet de réticences et d'oppositions de la part du public, en particulier des riverains, souvent peu sensibilisés à leur utilité, leur valeur technique et leur rôle fondamental dans l'architecture énergétique moderne. Ce rejet, bien qu'instinctif face à toute altération du paysage familier, tend à s'atténuer dès que les avantages tangibles de ces ouvrages deviennent visibles au quotidien.

Dans un contexte de croissance continue de la consommation énergétique, le développement et l'extension des réseaux de transport d'électricité s'imposent comme une nécessité incontournable. Les lignes aériennes demeurent, en l'état actuel des technologies, la seule solution économiquement et techniquement viable, les alternatives souterraines étant encore limitées malgré les efforts de recherche menés à l'échelle internationale.

Si leur apparente simplicité peut induire en erreur le non-initié, les lignes aériennes sont en réalité des systèmes complexes soumis à des contraintes multiples électriques, thermiques, mécaniques, climatiques et environnementales qui exigent une expertise approfondie et une maîtrise rigoureuse des phénomènes physiques en jeu, ainsi que de leurs impacts sur l'environnement immédiat.

Dans cette optique, le présent chapitre a permis d'explorer en détail les différents phénomènes associés au voisinage des lignes HT/THT, notamment leurs effets électromagnétiques et acoustiques, tels que l'effet couronne, l'effet de peau.....

Ces effets nécessitent la mise en œuvre de réglementations techniques précises afin d'en limiter les conséquences dans des marges acceptables.

Par ailleurs, l'analyse des éléments constitutifs des lignes forme des pylônes, nature des conducteurs, tension de service, courant circulant permet d'évaluer avec précision le champ magnétique généré par les lignes HT/THT. Cette étude a été appliquée concrètement à des lignes de 60 kV, 220 kV et 400 kV du réseau de transport national algérien, fournissant ainsi une base technique solide pour comprendre et maîtriser les impacts des infrastructures de transport d'électricité sur leur environnement.

Chapitre III

Analyse de l'environnement électromagnétique au voisinage des lignes de transmission

Introduction

Ce chapitre propose une étude approfondie et progressive des méthodes de réduction des champs électriques et magnétiques dans l'environnement immédiat d'une ligne de transport à très haute tension (THT) de 400 kV.

Dans un premier temps, nous analysons le comportement des champs électromagnétiques émis par la ligne, en fonction des modifications apportées à sa configuration, ainsi qu'à ses paramètres géométriques et électriques.

Dans un second temps, en conservant le même modèle de ligne, l'étude se focalise sur l'atténuation des champs électromagnétiques à l'aide de câbles de blindage passifs placés sous les conducteurs. L'impact des caractéristiques géométriques de ces câbles sur la nouvelle distribution du champ est également examiné.

III.1 Méthodes géométrique et électrique pour la réduction du champ électromagnétique

Différentes méthodes sont utilisées pour atténuer l'intensité du champ électrique à proximité des lignes électriques. Ces méthodes peuvent être électriques ou mécaniques. Les méthodes mécaniques reposent sur le changement de position des conducteurs de manière à minimiser le champ magnétique. L'une de ces méthodes est la transposition des lignes aériennes, permettant d'obtenir les valeurs souhaitées pour l'atténuation des champs électrique et magnétique. Cependant, cette méthode nécessite plus d'une ligne pour trouver la solution optimale, en plus du fait que la meilleure solution est limitée à des valeurs discrètes du champ.

Une autre méthode mécanique, adaptée à une seule ligne, consiste à ajuster les paramètres géométriques de la ligne afin de réduire au minimum l'intensité du champ électrique et du champ magnétique de la ligne. Les principaux inconvénients de cette méthode sont son coût élevé et le fait que la solution est limitée par la rigidité diélectrique entre les phases.

Par ailleurs, des fils de garde actifs et passifs sont utilisés comme méthode électrique pour atténuer le champ électrique. Le champ électrique au niveau du sol diminue progressivement avec l'augmentation de l'espacement entre les fils de garde. Le principal inconvénient de cette méthode est qu'elle n'a pas un grand effet autour de la ligne ; son effet se manifeste principalement directement sous la ligne.

III.2 Effet de la géométrie de la ligne sur la réduction du champ électromagnétique rayonné

L'influence des champs électromagnétiques produits par les lignes à haute tension (HT) sur l'environnement est un sujet largement étudié et documenté dans la littérature spécialisée. Parmi ces impacts, les effets nuisibles des champs électrique et magnétique sur la santé humaine ont suscité un intérêt scientifique particulier.

Afin de limiter ces effets indésirables, plusieurs approches consistent à réduire l'intensité des champs électromagnétiques au voisinage des lignes. Cela se fait par l'optimisation de la configuration géométrique des lignes et par l'ajustement de leurs paramètres électriques.

Ces méthodes jouent un rôle essentiel non seulement dans la réduction de la pollution électromagnétique, mais également dans l'amélioration des performances globales du réseau.

Le tableau III.1 présente une vue d'ensemble des effets des paramètres géométriques sur les niveaux de champ rayonné par les lignes aériennes.

Paramètres	CE	CM	RI	AN
Espacement entre phases ↑	↑	↑	↘	↓
Hauteur de la phase/au sol ↑	↓	↓	↘	↘
Nombre de conducteurs du faisceau ↑	↑	=	↓	↓
Espacement entre les conducteurs subdivisés ↑	↗	=	↗	↗
Section des conducteurs équivalents ↑	↗	=	↘	↘

Tableau III.1 : influence des paramètres géométriques sur les champs électrique et magnétique d'une ligne HT (↑ augmentation, ↓ diminution, ↗ léger augmentation, ↘ léger diminution, = aucun effet)

III.2.1 Modèle étudié

Le modèle examiné dans cette étude correspond à une ligne électrique aérienne triphasée à haute tension, dont l'agencement spatial et les coordonnées géométriques sont définis par rapport à un pylône de suspension, tel qu'illustré à la figure (III.1).

Chaque phase de la ligne (L1, L2, L3) est constituée d'un faisceau de trois conducteurs espacés de 45 cm les uns des autres. Le rayon de chaque conducteur est de 0,0153 m. La présence du câble de garde et du sol est également prise en compte dans le modèle représenté.

La ligne fonctionne sous une tension phase-terre de 400 kV, avec une fréquence nominale de 50 Hz. Le système triphasé est supposé symétrique avec une succession directe des phases (positive).

Les espacements spécifiques des sous-conducteurs sont définis comme suit :

$$D1 = 0,47 \text{ m} \quad D2 = 0,45 \text{ m} \quad D3 = 0,45 \text{ m}$$

La hauteur du pylône est de 19,1 mètres, tandis que la distance entre les phases principales est de 12 mètres.

Enfin, les charges de simulation sont réparties autour d'un cylindre de rayon équivalent à $0,05 \times r_c$, servant de zone d'étude pour le calcul du champ électromagnétique.

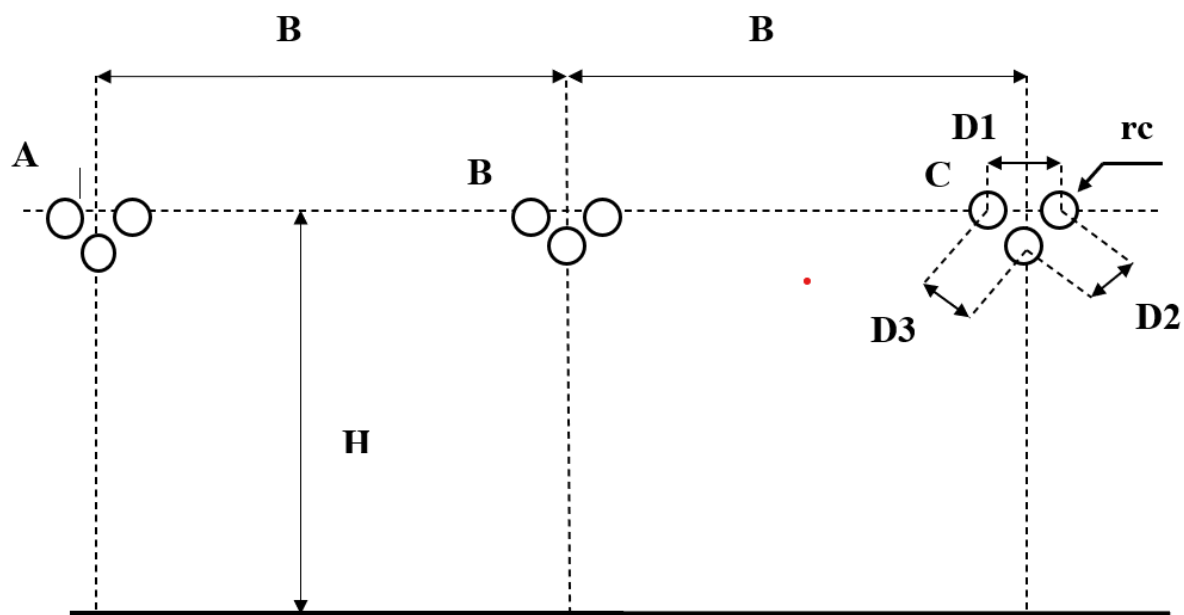


Figure III.1 modèle étudié de la ligne de transmission 400kV

III.2.2 Réduction du champ électrique par la méthode géométrique

Des modifications ciblées dans la conception géométrique d'une ligne électrique peuvent avoir un impact significatif sur les intensités des champs électrique et magnétique dans son environnement proche — avec des effets qui diffèrent selon qu'ils soient mesurés sous les conducteurs ou à proximité latérale.

Parmi les paramètres géométriques les plus influents, on distingue :

- La configuration spatiale des conducteurs
- La hauteur de suspension
-
- Les dimensions des conducteurs
- Et l'espacement entre les phases.

L'objectif est de déterminer les niveaux maximaux du champ en fonction de ces paramètres, considérés ici sous forme adimensionnelle afin d'en faciliter l'analyse comparative.

Dans ce cadre, un programme de calcul a été développé sous l'environnement MATLAB afin d'explorer différentes stratégies de réduction du champ électrique, telles qu'illustrées à la figure (III.2).

A. Programme de modélisation analytique

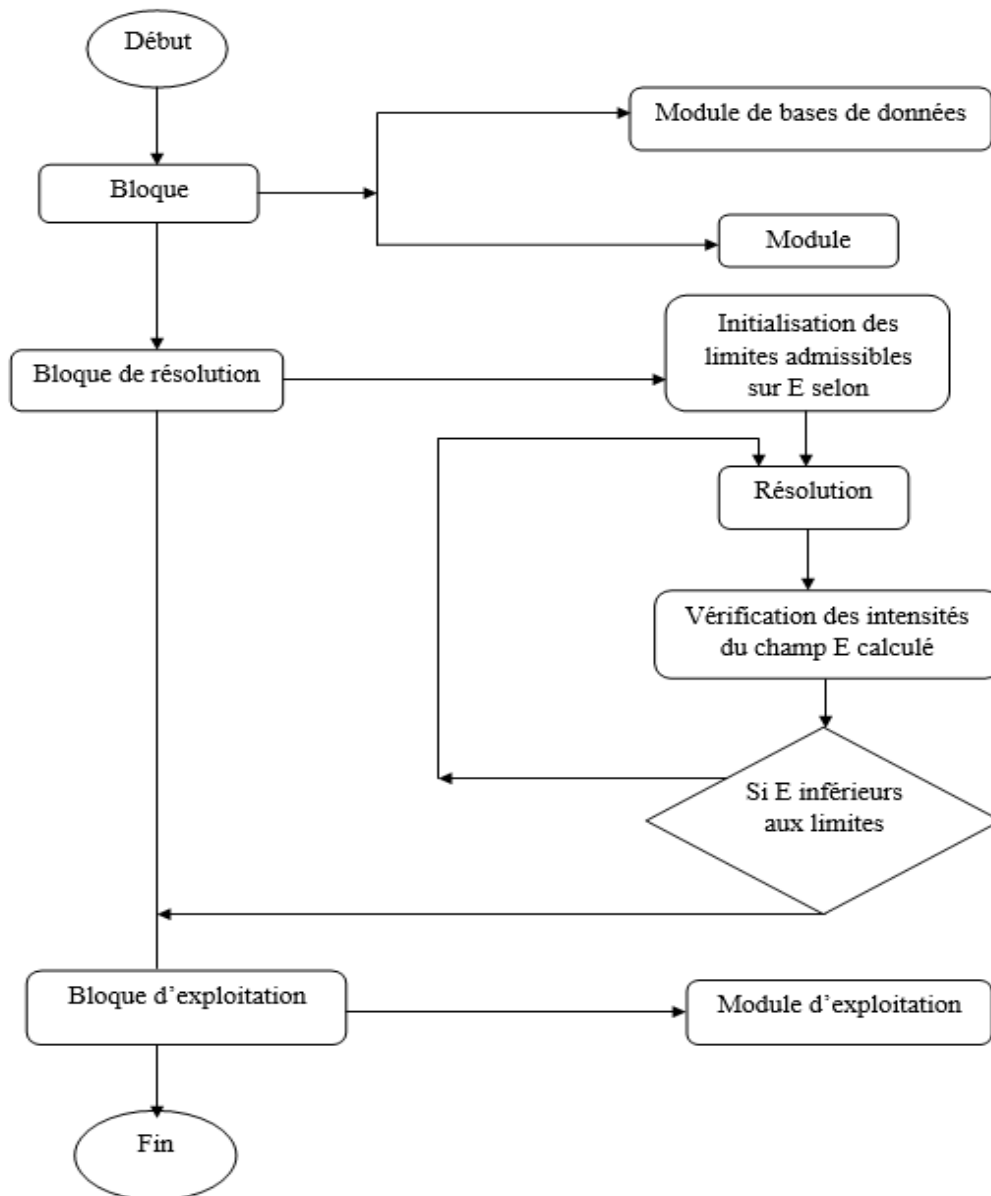


Figure. III.2 Algorithme de réduction du champ électrique au voisinage des lignes THT

B. Influence de la configuration de la ligne

La configuration géométrique des conducteurs joue un rôle essentiel dans la distribution des charges électriques et magnétiques autour d'une ligne à très haute tension. Cette influence a été étudiée à travers l'exemple d'une ligne simple de 400 kV, équipée d'un faisceau de trois conducteurs par phase, chacun ayant un rayon de 3,3 cm et espacés de 45 cm.

L'analyse porte sur trois configurations distinctes des conducteurs :

- Disposition horizontale
- Disposition verticale
- Disposition triangulaire

Les conditions de simulation sont les mêmes pour les trois cas : la distance entre les phases est fixée à $S = 10$ m, et la hauteur des conducteurs par rapport au sol est de $H = 10,6$ m.

La figure III.3 illustre les profils du champ électrique obtenus pour chaque configuration, en utilisant le programme de calcul développé précédemment. Toutes les caractéristiques électriques et géométriques sont conservées identiques, à l'exception de la géométrie d'arrangement.

Les résultats montrent que :

- La configuration triangulaire génère le champ électrique maximal le plus faible parmi les trois.
- En comparaison, les configurations horizontale et verticale produisent des intensités plus élevées au voisinage immédiat des conducteurs.

À mesure que l'on s'éloigne latéralement de la ligne, l'impact de la configuration devient moins marqué, bien que le profil du champ reste plus atténué dans le cas de la nappe verticale. Cela peut s'expliquer par la hauteur plus importante des pylônes dans cette configuration, ce qui augmente la garde au sol et diminue l'effet du champ au niveau du sol.

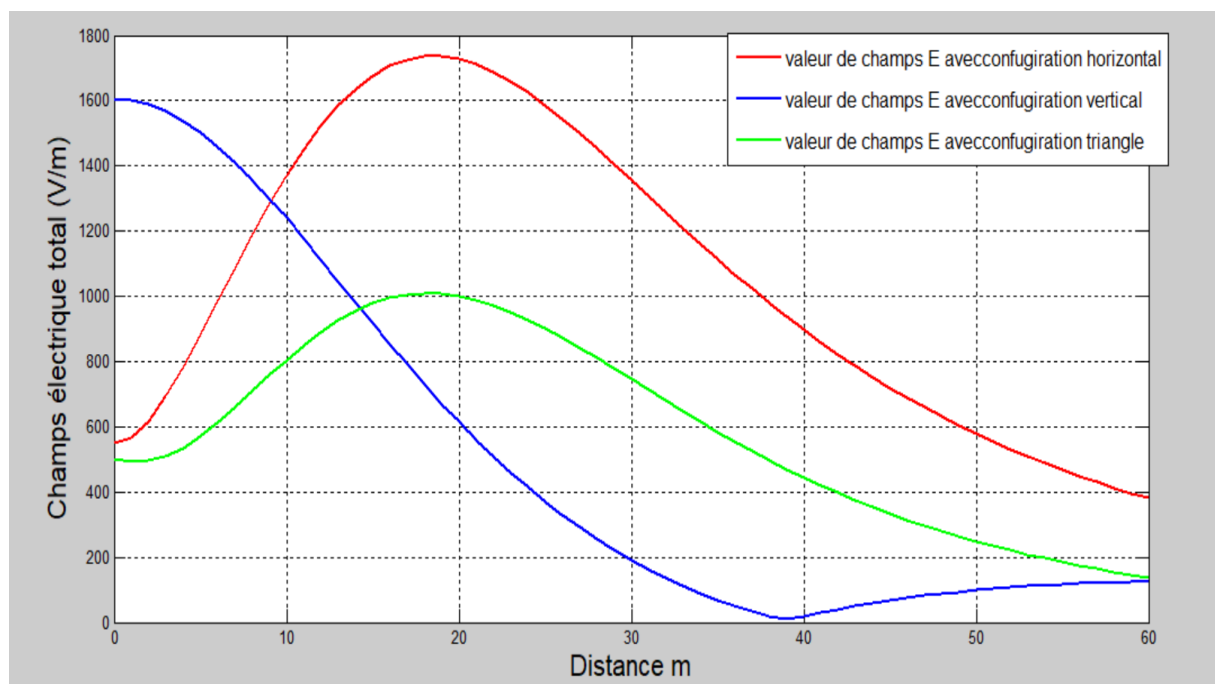


Figure III.3 Champ électrique pour les trois configurations de lignes

Discussion de graph

Courbe rouge : Configuration horizontale

Description :

- Les conducteurs sont alignés **horizontalement** sur la traverse du pylône (un à côté de l'autre à la même hauteur).

- Le champ électrique augmente progressivement, atteint un **maximum** à une certaine distance (~ 20 m), puis **diminue** avec la distance.

Explication :

- À cause de l'**alignement horizontal**, les conducteurs sont **plus proches du sol** dans la zone centrale du champ.
- Cela crée une **sommation plus constructive** des champs électriques émis par chaque phase dans certaines zones latérales.
- Le **champ résultant est plus intense à une certaine distance latérale**, où les contributions des différentes phases se superposent efficacement.

Courbe bleue : Configuration verticale

Description :

- Les conducteurs sont **empilés verticalement**, un au-dessus de l'autre sur le pylône.

Explication :

- Dans cette configuration, les phases sont **plus proches en projection verticale**, donc les champs électriques **s'annulent davantage** à mesure qu'on s'éloigne latéralement.
- Cependant, **directement sous la ligne**, la superposition est maximale, donnant une **valeur très élevée du champ électrique au sol**.
- À partir de ~ 10 m, le champ diminue très rapidement car les contributions opposées des phases **se compensent**.

Courbe verte : Configuration en triangle

Description :

- Les conducteurs sont disposés en **triangle** deux en bas, un au-dessus, souvent utilisée pour équilibrer les effets électromagnétiques.

Explication :

- Cette disposition permet une **meilleure symétrie** des champs, ce qui diminue le champ total au sol comparé à la configuration horizontale.
- Le pic est moins intense que celui de la configuration horizontale, mais plus réparti que dans la verticale.
- Moins de superposition maximale = **champ modéré**, mais bien **réparti spatialement**.

C. Effet de la hauteur

Parmi les différentes modifications géométriques possibles, l'élévation de la hauteur des conducteurs constitue l'une des méthodes les plus efficaces pour réduire l'intensité du champ électrique dans l'environnement immédiat d'une ligne à très haute tension.

La relation entre la hauteur de la ligne (H) et l'intensité maximale du champ électrique E peut être décrite par une formule empirique :

$$\left(\frac{E_1}{E_2}\right) = \left(\frac{H_1}{H_2}\right)^m \dots\dots\dots(III.1)$$

Où :

E1 et E2 sont les intensités maximales du champ électrique pour deux hauteurs H1 et H2 respectives et m est un coefficient d'ajustement dépendant de la configuration géométrique de la ligne.

Pour une disposition horizontale, on considère généralement. $m = -1.4$

La figure (III.4) montre l'évolution du profil latéral du champ électrique pour le modèle étudié, en considérant trois hauteurs différentes des conducteurs, et L'analyse de cette figure permet de constater que l'augmentation de la hauteur entraîne une réduction significative du champ électrique, jusqu'à une certaine distance critique, notée LC (longueur critique), mesurée depuis l'axe central de la ligne.

Au-delà de cette distance LC, l'effet bénéfique de l'élévation diminue, et l'intensité du champ n'est plus directement réduite par la hauteur.

Cette distance critique LC dépend des paramètres géométriques de la ligne et peut être déduite graphiquement à partir des profils représentés sur la figure (III.4).

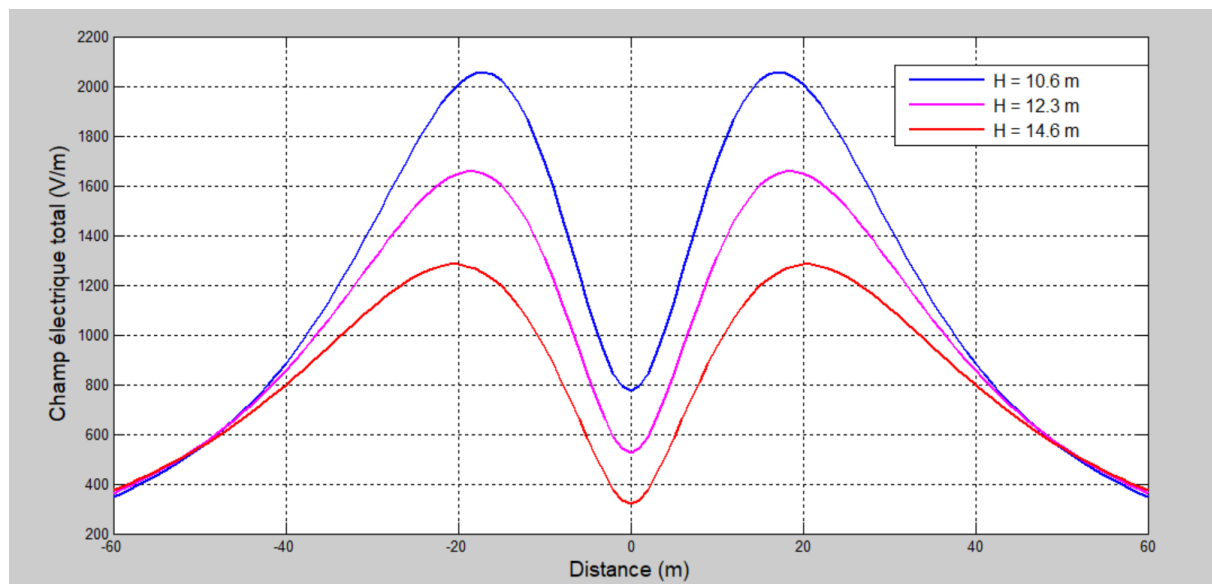


Fig. III.4 Champ électrique pour différentes gardes au sol

D. Effet de la distance entre phases

La réduction de l'espacement entre les phases, également connue sous le nom de compaction des lignes, constitue une stratégie couramment employée pour diminuer l'intensité du champ électrique généré à proximité des lignes à haute tension.

Les lignes compactes, caractérisées par des phases rapprochées, sont généralement associées à des niveaux de champ électrique plus faibles, ce qui en fait une solution privilégiée dans les environnements sensibles.

La figure (III.5) illustre cet effet en représentant la distribution du champ électrique pour une ligne 400 kV configurée en nappe horizontale, avec trois espacements inter-phases différents : 6 m, 10 m et 14 m.

Les résultats démontrent que plus les phases sont rapprochées, plus l'intensité maximale du champ diminue au voisinage immédiat de la ligne.

Toutefois, cette technique implique souvent le recours à des conducteurs de plus grande section, non seulement pour des raisons électriques, mais également pour réduire les nuisances sonores associées, notamment le bruit acoustique généré par l'effet couronne.

Ainsi, la compaction des lignes s'avère être une approche efficace et attrayante, combinant efficacité électromagnétique et meilleure intégration environnementale.

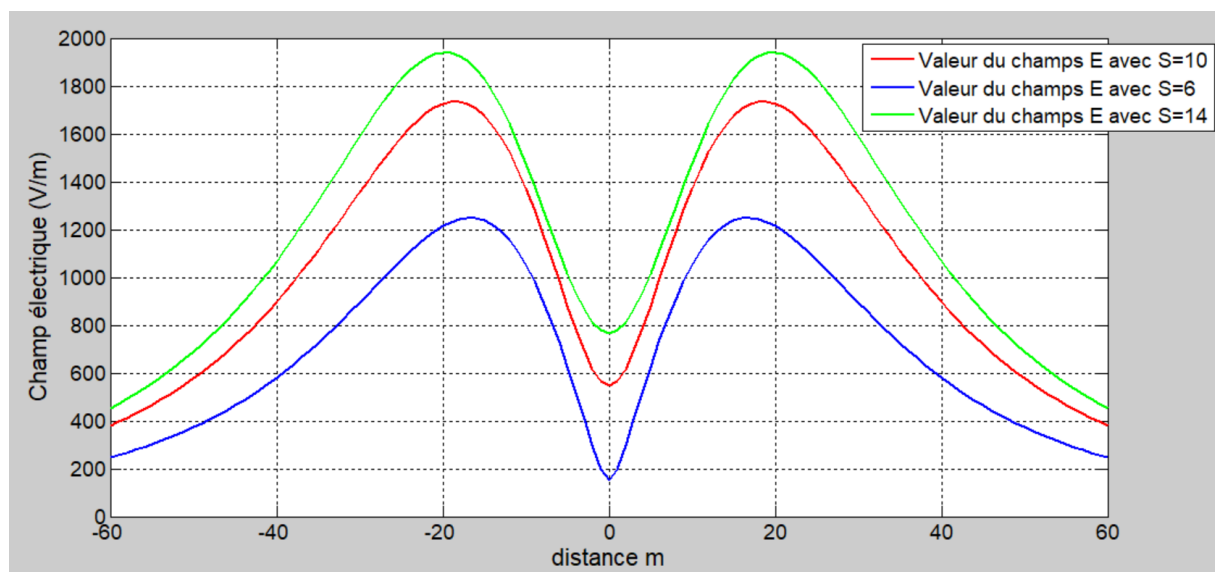


Figure.III.5 Effet de la distance entre phases sur le profil du champ électrique

Discussion de graphe

Superposition des champs électriques

Chaque conducteur de phase émet un champ électrique radial. Lorsque les conducteurs sont **plus rapprochés**, leurs champs respectifs **se chevauchent davantage**, et cela entraîne :

- Une **annulation partielle** des composantes horizontales du champ électrique.
- Une **répartition plus homogène** du champ autour de la ligne.

Résultat : le champ total au sol devient moins intense.

E. Influence du nombre de conducteurs par phase

L'un des paramètres clés dans la réduction du champ électrique émis par une ligne à haute tension est le nombre de conducteurs par phase, ainsi que leurs dimensions.

Pour évaluer cet effet, on utilise le diamètre équivalent d'un faisceau de conducteurs, noté d_{eq} , défini par la relation :

$$d_{eq} = D \cdot \sqrt[n]{\frac{nd}{D}} \quad \text{.....(III.2)}$$

Où :

D, représente la distance entre les sous-conducteurs du faisceau,

n, est le nombre de conducteurs dans le faisceau,

d, et le diamètre individuel d'un conducteur.

Ce diamètre équivalent correspond à celui d'un conducteur unique équivalent, capable de transporter la même quantité de charge électrique par unité de longueur que le faisceau, tout en produisant une intensité de champ équivalente.

En règle générale, les dimensions des conducteurs influencent de manière similaire la distribution du champ électrique, aussi bien sous les conducteurs qu'à l'extérieur. La variation du champ en tout point est proportionnelle à la charge transportée, et peut être estimée à l'aide de la formule empirique :

$$\frac{E_1}{E_2} = \ln\left(\frac{2S}{D_2}\right) / \ln\left(\frac{2S}{D_1}\right) \quad \text{..... (III.3)}$$

Où :

E1 et E2 sont les intensités du champ électrique générées par deux lignes de même espacement entre phases, avec des diamètres de conducteurs D1 et D2 respectifs et ainsi, toute modification significative des dimensions des conducteurs a un impact non négligeable sur le profil du champ électrique. Toutefois, l'augmentation du nombre ou du diamètre des conducteurs n'est pas toujours privilégiée, en raison de contraintes économiques et techniques, notamment liées au poids, au coût des matériaux et à la complexité de mise en œuvre.

III.2.3 Réduction du champ magnétique par la méthode géométrique

La diminution de l'intensité du champ magnétique généré par une ligne à haute tension dans son environnement immédiat peut être obtenue par différentes stratégies géométriques ou techniques, dont les principales sont détaillées ci-dessous :

1. Éloignement des zones habitées

L'augmentation de la distance entre la ligne électrique et les populations constitue une mesure préventive courante. En général, les lignes haute tension sont installées dans des couloirs de sécurité d'une largeur maximale de 45 mètres, au sein desquels la construction de bâtiments est strictement réglementée et soumise à autorisation préalable. Cette méthode ne réduit pas directement le champ magnétique, mais atténue son effet sur les individus en maintenant une distance de sécurité.

2. Réduction du courant dans les conducteurs

Le champ magnétique est proportionnel à l'intensité du courant circulant dans les lignes. Ainsi, réduire ce courant, notamment en augmentant la tension de transport, permet de limiter le champ généré.

3. Utilisation de boucles de blindage passif

Une technique efficace consiste à insérer des conducteurs auxiliaires (légèrement isolés des conducteurs principaux) entre la ligne et la zone à protéger. Ces conducteurs, connectés en boucle aux extrémités, subissent une tension induite par le champ magnétique, ce qui génère à son tour un courant opposé. Ce courant produit un champ magnétique contraire, capable de partiellement neutraliser celui de la ligne d'origine.

4. Annulation de phase

Étant donné que les champs magnétiques alternatifs de fréquence 50 Hz changent de direction 50 fois par seconde, il est possible de superposer deux champs de même amplitude et de sens opposé pour obtenir une annulation partielle. Cette méthode repose sur une configuration symétrique des conducteurs.

5. Optimisation de la conception géométrique des lignes

Certaines configurations structurelles permettent de réduire significativement le champ magnétique :

- **Compaction des phases:** Cette approche consiste à réduire l'espacement entre les phases tout en augmentant la hauteur des conducteurs extérieurs. Cela se fait souvent à l'aide d'isolateurs interphases. Bien qu'efficace, cette méthode peut intensifier l'effet couronne et n'est pas applicable à toutes les configurations de lignes.
- **Ligne à phases dédoublées (split phase) :** Cette technique consiste à fractionner chaque phase en plusieurs sous-phases, ce qui permet une réduction du champ magnétique proportionnelle au cube de la distance. Comme pour la compaction, elle peut cependant entraîner une augmentation du bruit acoustique lié à l'effet couronne.

III.2.3.1 Effets du changement de la géométrie de la ligne

A. Influence de la configuration de la ligne

La figure (III.6) présente le profil du champ magnétique généré par une ligne 400 kV selon trois configurations géométriques différentes : horizontale, verticale et en triangle.

L'analyse de cette figure montre que la configuration verticale engendre une intensité maximale du champ magnétique plus élevée que celles observées dans les configurations horizontale et triangulaire, et ce, quelle que soit la distance par rapport à la ligne. Ce phénomène s'explique principalement par l'utilisation de pylônes plus élevés, ce qui augmente la garde au sol et modifie la distribution du champ magnétique.

À mesure que l'on s'éloigne latéralement des conducteurs, les différences entre configurations deviennent plus marquées. Le champ magnétique diminue plus rapidement dans le cas de la nappe horizontale, comparativement à celui de la configuration triangulaire.

Ces résultats confirment que le choix de la géométrie de la ligne influe fortement sur le comportement spatial du champ magnétique et constitue ainsi un levier d'optimisation dans les zones sensibles.

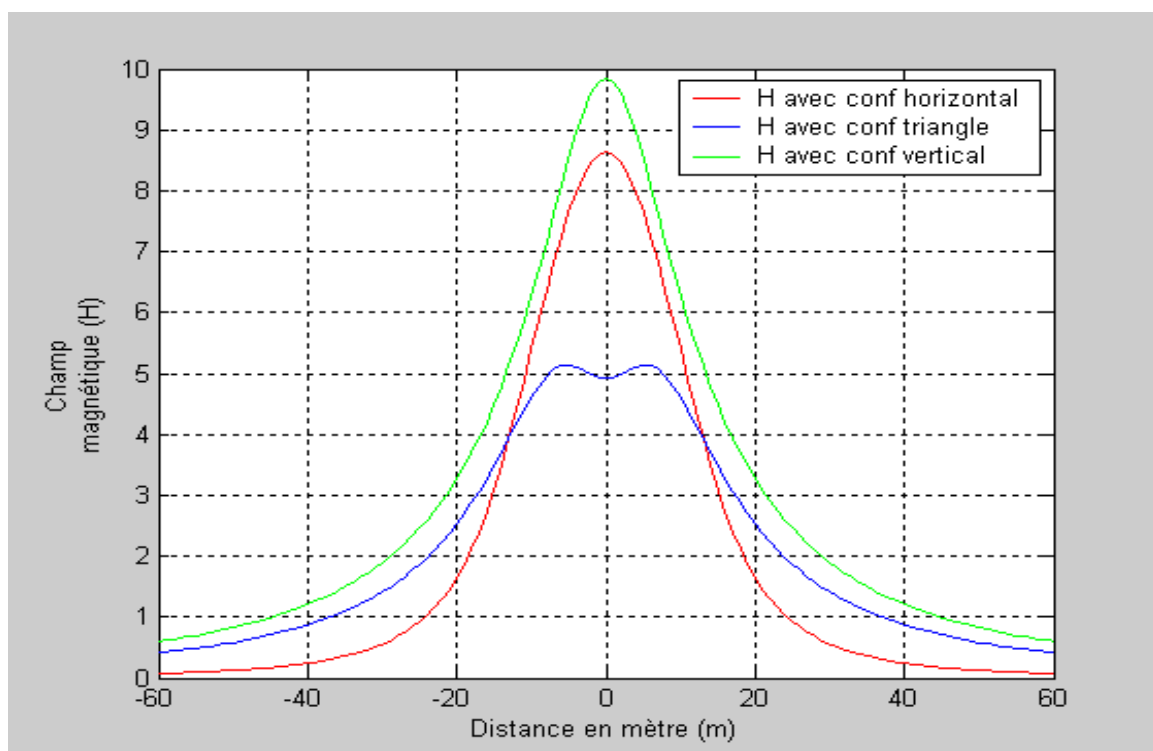


Figure. III.6 Champ magnétique pour les trois configurations de lignes

Discussion de graphe

Configuration horizontale (Rouge)

- Le champ magnétique est le **plus étalé** latéralement et atteint une valeur **modérée** au centre.
- Cette configuration **sépare largement les phases** → les courants de phase opposée s'annulent **moins efficacement** au centre.
- Cela entraîne une **intensité modérée** au centre, mais un **champ plus faible en périphérie**.

Configuration triangulaire (Bleu)

- Produit un **champ magnétique plus concentré** autour de l'axe central avec un **double pic légèrement séparé**.
- Cela est dû à la disposition **asymétrique** des conducteurs autour de l'axe : le champ ne s'annule pas complètement au centre.
- Bonne **compromis** entre réduction du champ magnétique et stabilité mécanique.

Configuration verticale (Vert)

- Donne le **champ magnétique maximal au centre**.
- Les conducteurs sont **superposés verticalement**, ce qui **concentre les champs magnétiques** sur l'axe médian ($x = 0$ m).
- Les courants s'additionnent localement → champ **plus intense** mais **symétrique et concentré**.

B. Influence de la hauteur sur le champ magnétique

La figure (III.7) illustre la distribution de la densité du champ magnétique calculée pour une configuration horizontale du modèle de ligne 400 kV étudié.

Les résultats révèlent une tendance claire : la densité du champ magnétique augmente à mesure que la garde au sol diminue. Autrement dit, plus les conducteurs sont proches du sol, plus l'intensité du champ est élevée dans la zone située sous la ligne.

Toujours selon la figure, le maximum d'intensité du champ magnétique est observé directement sous l'axe central du pylône. Cette intensité décroît de manière marquée lorsque la hauteur géométrique des conducteurs augmente, suivant une loi inversement proportionnelle au cube de la hauteur.

Cela démontre que rehausser la ligne constitue une méthode géométrique efficace pour réduire l'exposition au champ magnétique, particulièrement dans les zones fréquentées ou sensibles.

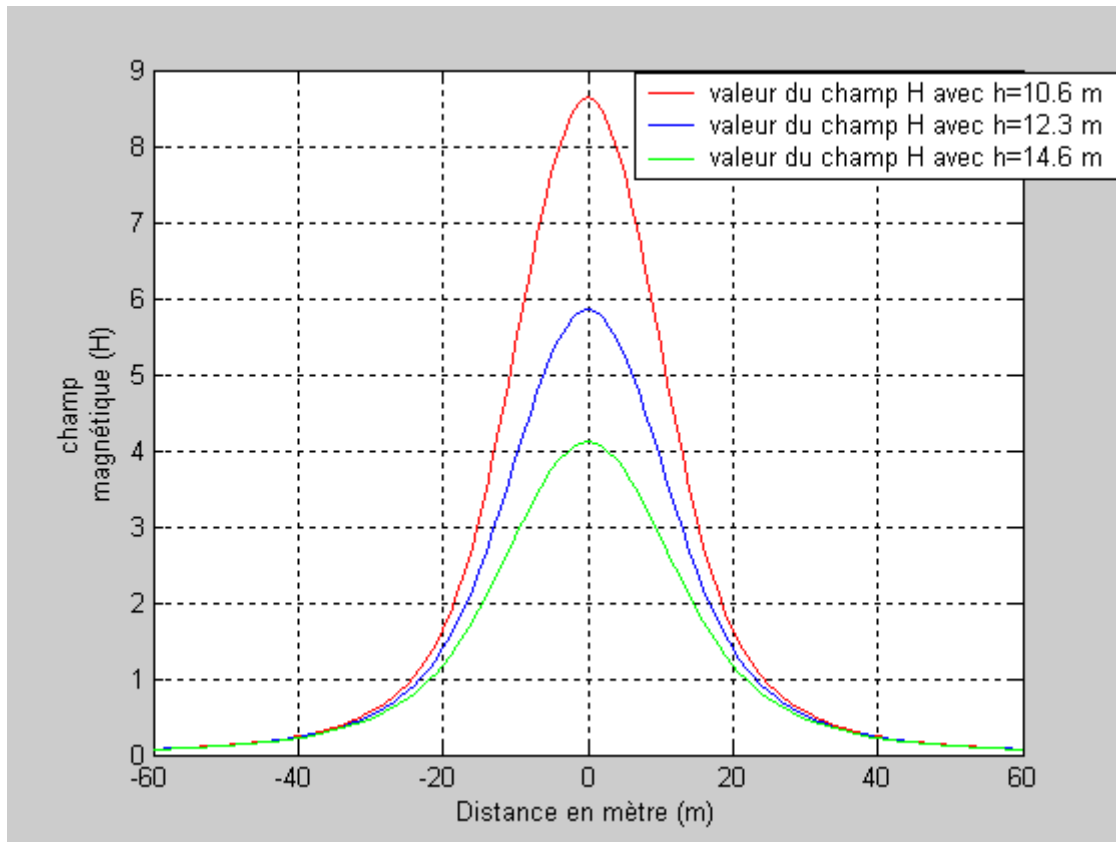


Figure. III.7 Champ magnétique calculé pour différentes hauteurs

DISCUSSION DES RESULTATS

Le champ magnétique H est lié au courant transporté et à la distance d'observation

$$H \propto \frac{I}{r} \quad \text{avec :}$$

- I: courant
- r: distance entre le point d'observation et le conducteur

C. Influence de la distance entre phases

L'espacement entre les phases influence de manière significative l'intensité du champ magnétique émis par une ligne haute tension, d'une manière similaire à celle observée pour le champ électrique.

La figure (III.8) montre que l'augmentation de la distance entre les phases entraîne une hausse de l'intensité du champ magnétique, généré par le modèle de ligne étudié. Comme dans les cas précédents, le maximum d'intensité est observé à la verticale de l'axe du pylône, c'est-à-dire au point situé directement sous la ligne.

En revanche, lorsque les phases sont rapprochées – une technique connue sous le nom de compaction des lignes – il est possible de réduire efficacement la densité du champ magnétique dans l'environnement immédiat.

Cette approche reste ainsi l'une des méthodes les plus couramment adoptées pour limiter les effets des champs magnétiques dans les zones habitées ou sensibles

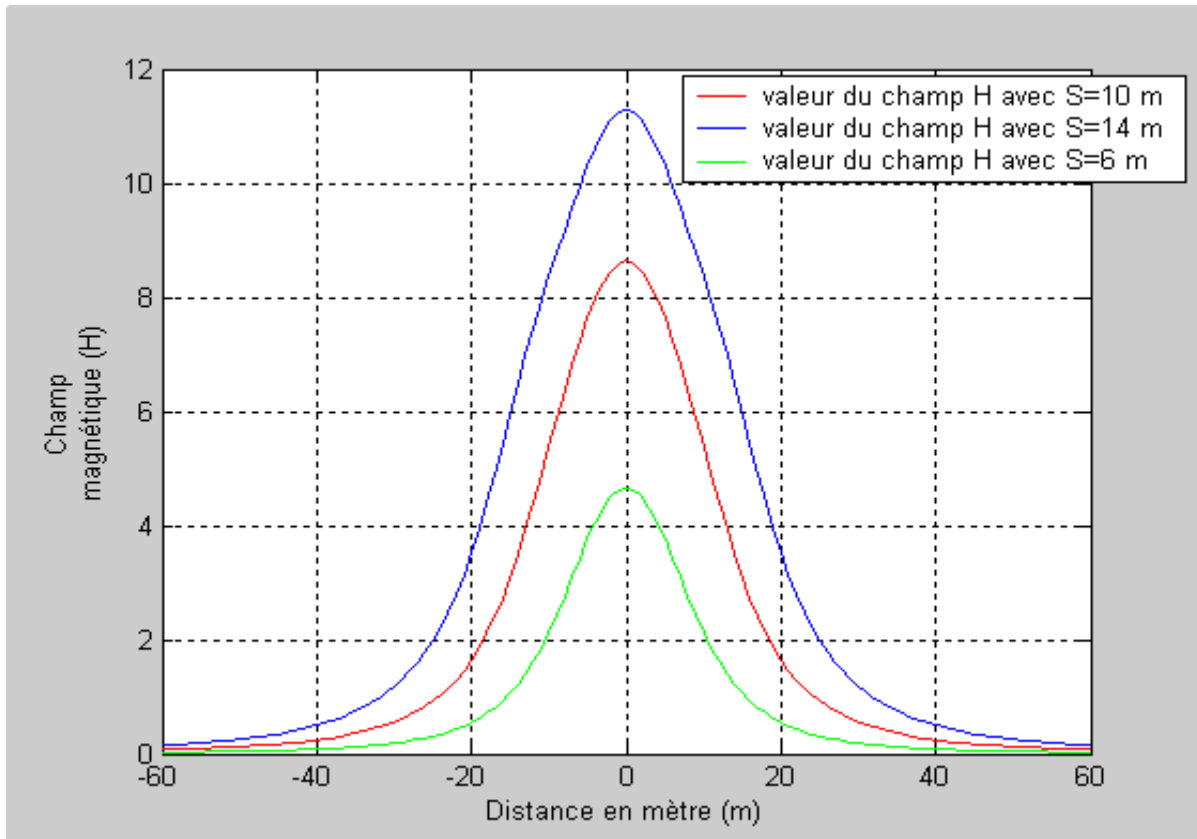


Figure. III.8 Champ magnétique calculé pour différents espacement entre phases

Discussion

Quand la distance entre conducteurs diminue ($S \downarrow$), le champ H diminue

- Les conducteurs étant **plus rapprochés**, leurs champs magnétiques **interagissent plus fortement** et ont tendance à **s'annuler partiellement** (phénomène de superposition vectorielle).
- Cela crée une **configuration plus compacte**, donc **un champ global plus faible** observé au sol.

III.3 Méthode électrique pour la réduction du champ électromagnétique

III.3.1 Calcul du Champ Électrique avec écran passif

Étant donné que la plupart des effets des champs se produisent près du niveau du sol et sont fonction de l'amplitude du champ électrique non perturbé à 1 mètre au-dessus du sol, la réduction de ce champ est l'objectif principal de la méthode de blindage présentée dans cette section.

La méthode de blindage modifie la valeur de l'intensité du champ électrique ainsi que le potentiel spatial, passant d'une valeur sans fils de garde à une valeur inférieure avec ces fils. Le calcul du blindage du champ électrique est obtenu en combinant les calculs bidimensionnels du champ électrique sans fils de garde et ceux du facteur de blindage (Shielding Factor, SF) ainsi que de l'efficacité de blindage (Shielding Efficiency, SE) dans un champ uniforme.

$$E_s = E_u \cdot SF \quad \dots\dots\dots(III.4)$$

Où E_s est le champ électrique au sol **en présence du blindage**, et E_u est le champ électrique **non perturbé**, c'est-à-dire **en l'absence de blindage**.

L'efficacité du blindage, notée **SE**, peut également être définie comme indiqué dans l'équation (2) :

$$SE = 1 - SF = \frac{E_u - E_s}{E_u} \quad \dots\dots\dots(III.5)$$

Combinaison des équations (1) et (2) des champs

$$E_s = E_u (1 - SE) \quad \dots\dots\dots(III.6)$$

La méthode de blindage passif appliquée à une route située sous une ligne de transmission à haute tension consiste à utiliser une grille infinie de fils parallèles mis à la terre, espacés de manière uniforme et placés à une hauteur constante sous les phases de la ligne. Cette configuration permet un blindage efficace dans la zone située en dessous.

Les paramètres de cette disposition sont : le rayon des fils **R**, la hauteur **H**, et l'espacement **S**. Ce concept repose sur l'hypothèse que le champ est induit par des conducteurs à haute tension situés à une distance importante de la grille et du sol. Un blindage parfait au-dessus d'un plan correspondrait à un autre plan au potentiel nul.

L'efficacité de blindage d'une grille infinie, notée **SE_∞**, est donnée par l'équation suivante

$$SE_{\infty} = \frac{2\pi H/S}{\ln \frac{2H}{R} + \left[\ln \frac{e^{2\pi H/S} - e^{-2\pi H/S}}{4\pi H/S} \right]} \quad \dots\dots\dots(III.7)$$

III.3.2 Effet des écrans passifs sur le champ électrique

III.3.2.1 Profil du champ électrique en l'absence d'écrans

Pour la ligne de 400 kV étudiée, la répartition des charges capacitatives a été calculée à l'aide d'un modèle analytique développé sous Matlab. Cette analyse a été réalisée pour plusieurs hauteurs de ligne, notamment 10 m, 12 m, 15 m, 19,1 m et 25 m, afin d'évaluer la distribution du champ électrique sans la présence d'écrans passifs.

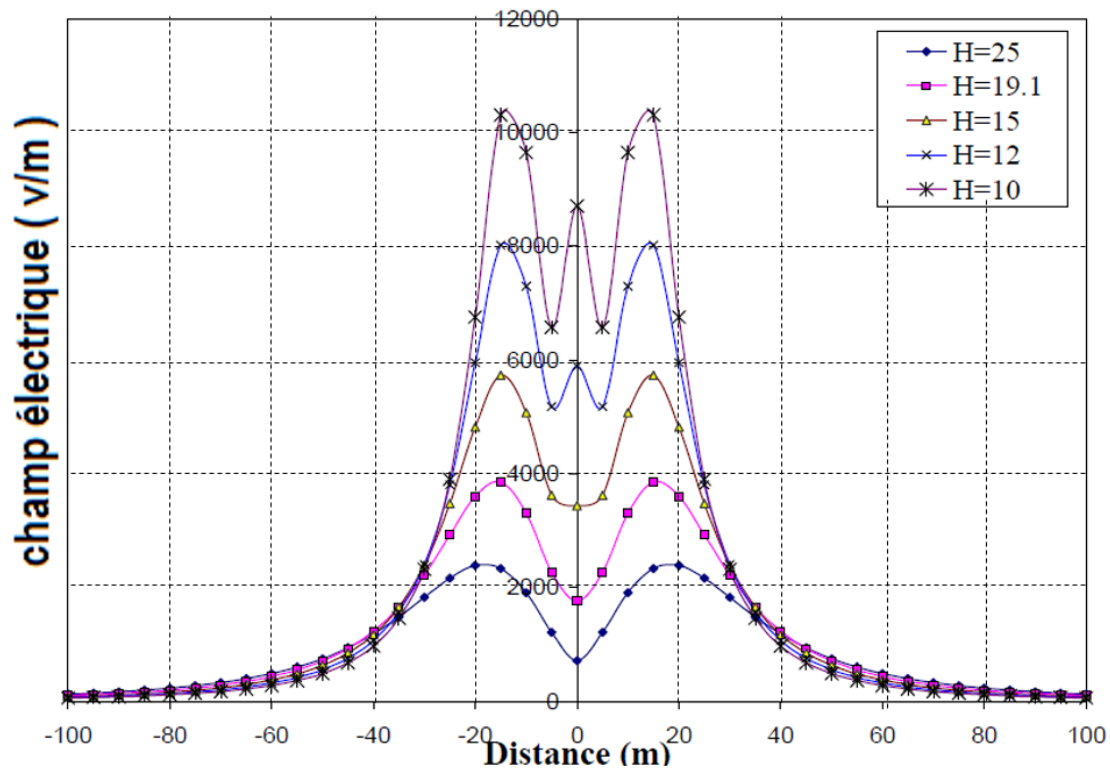


Figure III.9 l'intensité du champ électrique pour différentes hauteurs de la ligne

III.3.2.2 Profil du champ électrique avec écrans

Dans ce cas, des conducteurs servant d'écrans passifs sont installés entre les conducteurs des phases et le sol. La configuration de la ligne de transmission reste identique à celle illustrée à la figure III.10, à laquelle s'ajoutent des fils de blindage passifs placés sous les conducteurs de phase. Ces fils ont un rayon de 0,0039 mètres, un espacement noté S , ainsi qu'une hauteur géométrique H mesurée par rapport au sol.

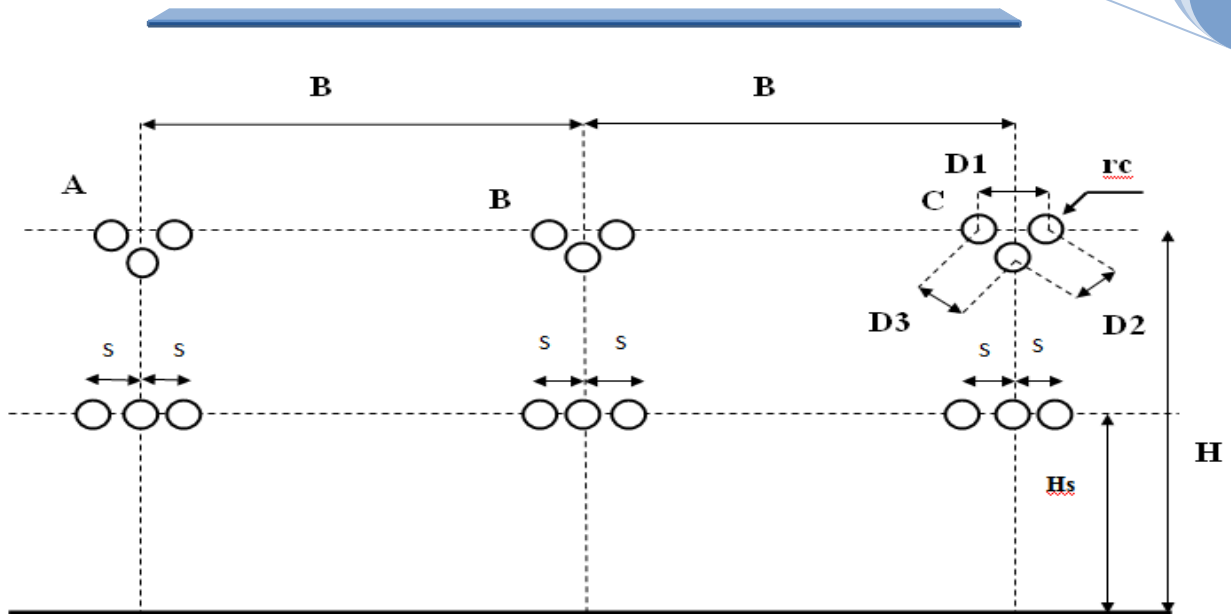


Figure III.10 modèle étudié de la ligne de transmission 400kV avec des fils de blindage passifs

La figure (III.11) présente le profil du champ électrique mesuré à 1 mètre au-dessus du sol, pour une hauteur de ligne $H = 15$ mètres, un espacement entre câbles de blindage fixé à 5 mètres, et différents nombres de câbles de blindage. D'après cette figure, il apparaît clairement que l'intensité maximale du champ électrique diminue à mesure que le nombre d'écrans passifs augmente, avec une réduction pouvant atteindre jusqu'à 55 % pour un espacement $S = 5$ mètres et $nS = 5$ écrans par phase.

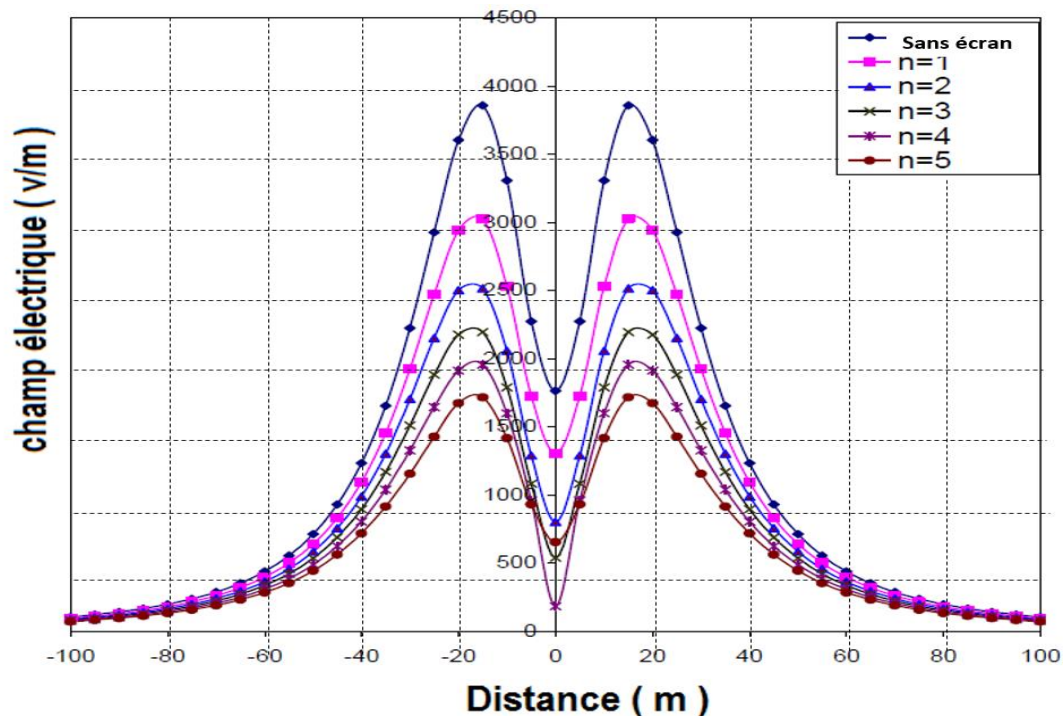


Figure III.11 distributions de champ électrique à hauteur de 1 m au-dessus de la surface du sol pour la ligne de transport de 400

1. Rôle des écrans passifs

Un **écran passif** est un conducteur métallique (non relié électriquement à la source de tension) placé sous les conducteurs actifs de la ligne haute tension. Il n'est pas alimenté, mais il **réagit au champ électrique** produit par les conducteurs.

2. Induction électrostatique

Lorsqu'un champ électrique provenant des conducteurs actifs atteint l'écran passif :

- Des **charges électriques de signe opposé** sont **induites** à la surface de l'écran.
- Ces charges **créent un champ électrique propre, opposé** au champ initial.
- Résultat : le champ total au niveau du sol est **partiellement annulé** → **champ réduit**.

3. Plus d'écrans = meilleure atténuation

- En ajoutant **plus d'écrans passifs**, on augmente le nombre de zones où le champ est **piégé et compensé**.
- Chaque écran agit comme un **bouclier supplémentaire**, qui renforce l'effet de **blindage électrostatique**.
- L'effet combiné de plusieurs écrans forme une **barrière efficace** contre le champ électrique émis par les conducteurs.

Les figures (III.12 et III.13) illustrent l'influence de plusieurs paramètres liés au blindage passif sur l'intensité maximale du champ électrique. Ces paramètres incluent le nombre de câbles de blindage, leur espacement (S) ainsi que leur hauteur (H) par rapport au sol. Il ressort de ces figures que l'augmentation du nombre d'écrans passifs entraîne une réduction notable du champ électrique maximal, lorsque l'espacement et la hauteur sont maintenus constants. De plus, on observe que ce champ maximal diminue avec l'augmentation de l'espacement S jusqu'à environ 2 mètres ; au-delà de cette valeur, l'effet devient négligeable et le champ tend à se stabiliser.

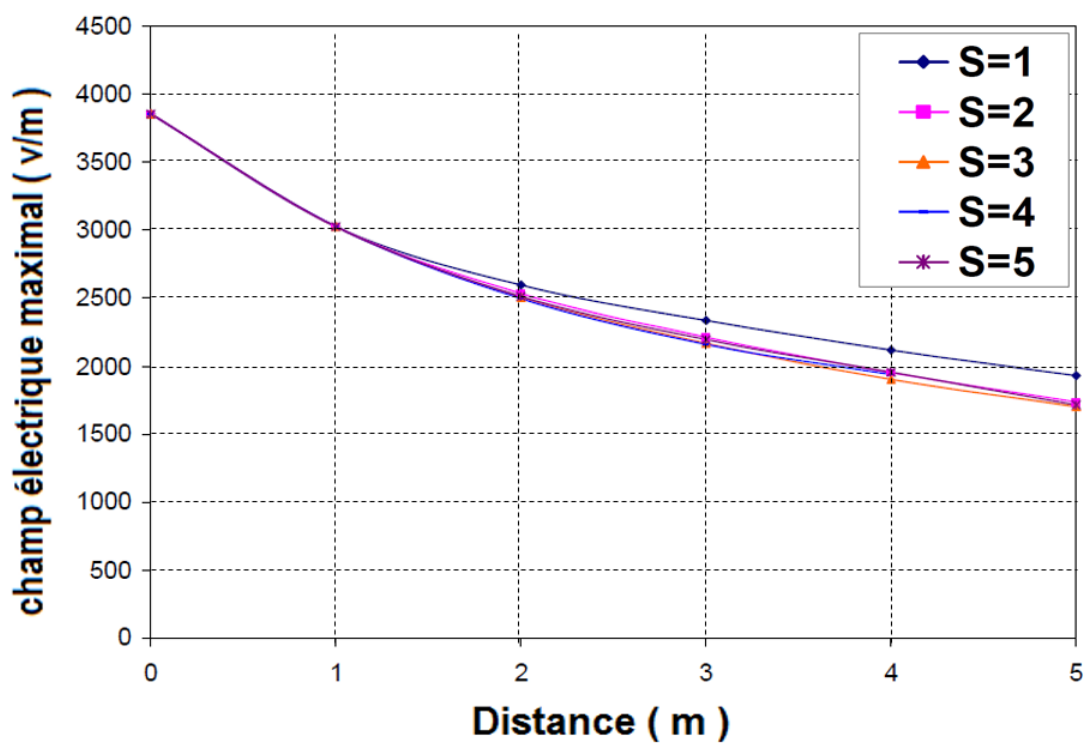


Figure III.12 Maximum Champ électrique avec la variation de l'espacement S entre les fils de blindage et nombre de fils différent

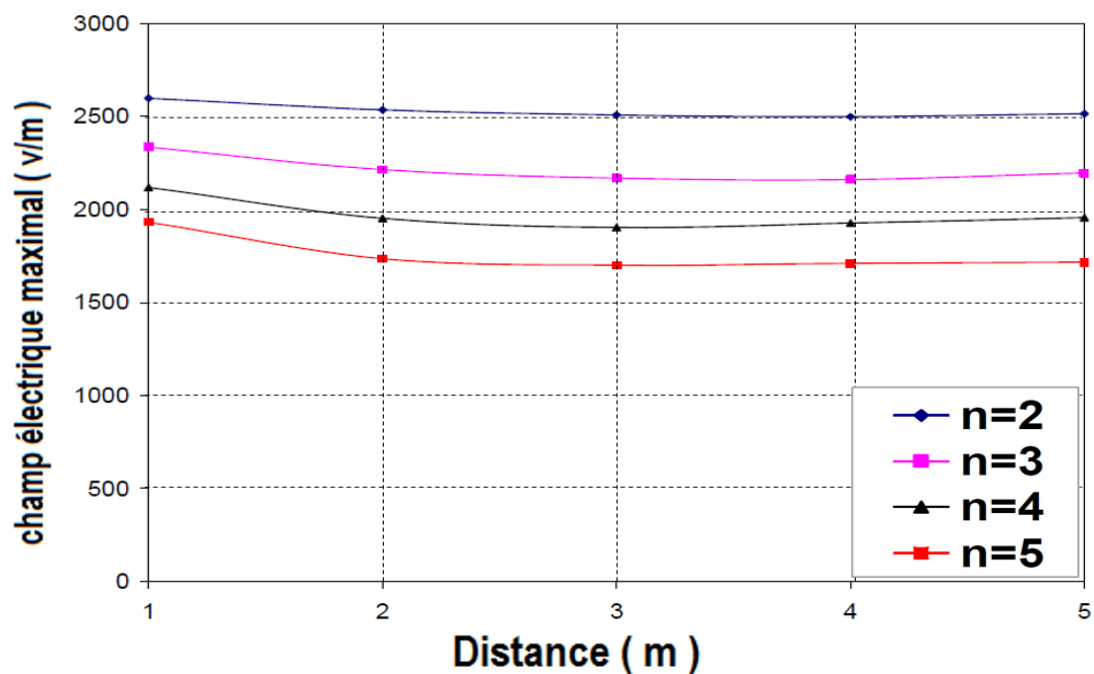


Figure III.13 Maximum champ électrique par rapport au nombre de fils de blindage passifs de la ligne de transmission avec $H=15\text{m}$

III.3.3 Effet des écrans passifs sur le champ magnétique

III.3.3.1 Profil du champ magnétique sans câble de blindage

Dans le cas du modèle de ligne 400 kV étudié, la distribution des composantes du champ magnétique à une hauteur de 1 mètre au-dessus du sol a été déterminée à l'aide d'un algorithme de calcul analytique développé sous l'environnement Matlab. L'analyse a été effectuée pour plusieurs hauteurs de ligne : 12 m, 15 m, 19,1 m et 25 m.

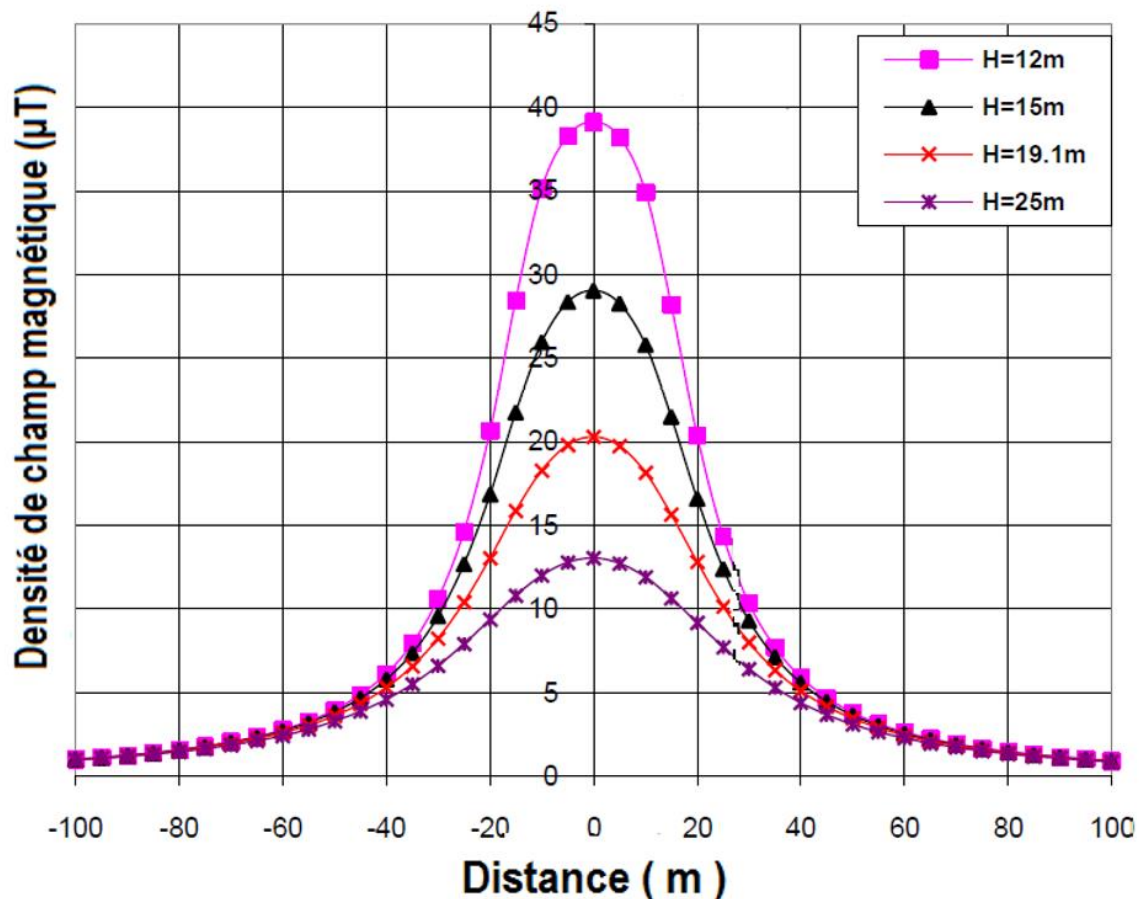


Figure.III.14 Distribution du champ magnétique à une hauteur de 1 m au-dessus de la surface du sol pour la ligne de 400 kV.

D'après la figure (III.14), on observe que l'intensité maximale du champ magnétique diminue avec l'augmentation de la hauteur géométrique de la ligne, pour un courant de charge de 2000 A. En effet, les valeurs maximales du champ magnétique obtenues pour des hauteurs de 25, 19.1, 15 et 12 mètres au-dessus du sol sont respectivement de 13,20 μT , 20,29 μT , 30,10 μT et 48,78 μT .

Cette réduction du champ peut s'expliquer par le phénomène des courants de Foucault (effet miroir) : un conducteur positionné en dessous des câbles de phase induit des courants qui génèrent un champ opposé, contribuant ainsi à atténuer le champ magnétique total mesuré au sol.

III.3.3.2 Profil du champ magnétique avec câble de blindage

L'effet du blindage passif sur le profil latéral du champ magnétique est illustré dans la figure (III.15). La configuration de la ligne avec écrans passifs correspond à celle décrite précédemment dans la figure III.11. Le système est constitué de six conducteurs au total, avec un rayon équivalent de 0,05 rc pour les conducteurs de phase, et 0,05 rsh pour les conducteurs de blindage. Les valeurs maximales du champ magnétique ont été calculées pour plusieurs combinaisons de nombre d'écrans, d'espacements latéraux et de hauteurs par rapport au sol.

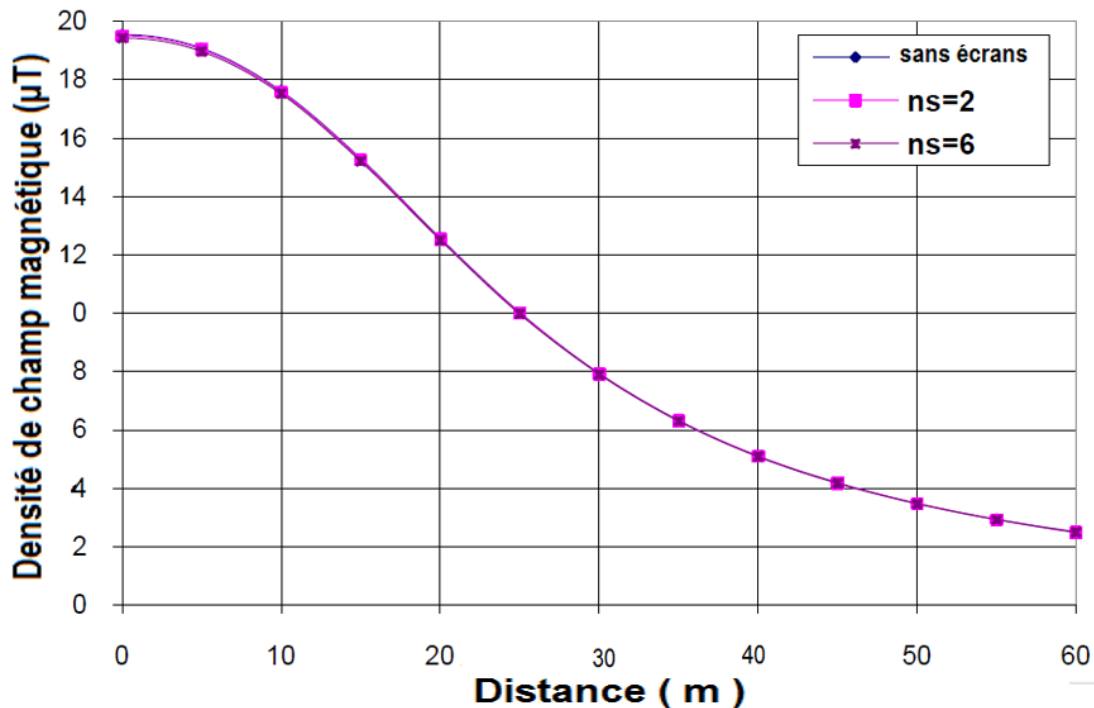


Figure III.15 Distribution du champ magnétique à 1 m du sol de la ligne 400 kV

Discussion des résultats

La figure (III.16) montrent la distribution du champ magnétique à 1 m par rapport au sol de la ligne de transmission de 400 kV. On peut voir sur cette figure que le nombre d'écrans passifs a un effet négligeable sur la réduction du champ maximal rayonné par la ligne.

III.4 Conclusion

À la lumière des travaux menés dans ce chapitre, il apparaît essentiel de limiter l'intensité des champs électrique et magnétique générés sous les lignes THT, afin de réduire leur impact sur l'environnement. Plusieurs approches peuvent être envisagées pour atteindre cet objectif :

L'optimisation des paramètres géométriques et électriques des lignes, tels que l'utilisation de fils de garde, la configuration des faisceaux de conducteurs, la compaction des lignes, ou encore la modulation des charges. Ces ajustements influencent de manière significative la distribution des champs dans le voisinage des lignes THT.

L'intégration de câbles de blindage, de nature capacitive ou inductive, disposés sous les conducteurs de phase. Ces écrans peuvent varier en nombre, en hauteur et en espacement, ce qui permet d'ajuster leur efficacité.

Les résultats analytiques obtenus permettent de conclure que :

L'intensité du champ électrique diminue notablement avec l'augmentation du nombre d'écrans, notamment lorsqu'ils suivent la même séquence que les phases de la ligne.

L'utilisation de câbles de blindage passifs s'avère être une méthode efficace pour atténuer le champ électrique .

Le taux de réduction combinée des champs électrique et magnétique augmente proportionnellement à l'utilisation d'un blindage passif bien configuré.

Conclusion

Conclusion générale

Le transport de l'énergie électrique à travers les lignes à haute et très haute tension (HT/THT) constitue l'un des piliers essentiels pour assurer l'approvisionnement énergétique continu des zones résidentielles, industrielles et rurales. Face à une demande croissante en électricité, stimulée par l'expansion démographique, l'urbanisation et le développement industriel, la nécessité de concevoir des réseaux de transport performants et fiables devient primordiale. Toutefois, ces infrastructures engendrent des effets physiques et électromagnétiques non négligeables, suscitant des interrogations sur leurs impacts environnementaux et sanitaires, notamment en ce qui concerne l'exposition prolongée aux champs électromagnétiques.

Dans ce contexte, le présent travail a permis de mener une étude approfondie des sources de champs électromagnétiques générés par une ligne de transport électrique à très haute tension de 400 kV, en mettant en évidence les phénomènes associés tels que le couplage inductif, l'effet couronne, l'ionisation de l'air ambiant, ou encore les tensions induites. Une revue analytique des normes internationales en vigueur a été réalisée afin de mieux comprendre les seuils d'exposition acceptables et les recommandations techniques visant à limiter ces effets.

L'étude a également porté sur les paramètres géométriques et techniques influençant la distribution des champs électriques et magnétiques dans l'environnement immédiat de la ligne. L'influence de la configuration géométrique, du positionnement des conducteurs, de leur espacement et de leur hauteur a été analysée en détail. En parallèle, l'efficacité de l'intégration de câbles de blindage passifs, placés sous les conducteurs de phase, a été évaluée à travers une série de simulations.

Les résultats obtenus ont montré que :

- L'intensité du champ électrique diminue significativement avec l'augmentation du nombre de câbles de blindage.
- L'efficacité du blindage est optimisée lorsque les câbles sont disposés en suivant la séquence des phases de la ligne.
- L'utilisation de câbles de blindage bien configurés permet également de réduire le champ magnétique, aboutissant à une atténuation combinée des deux types de champs.

Ainsi, cette étude confirme qu'il est à la fois possible et nécessaire de maîtriser les champs électromagnétiques générés par les lignes THT, non seulement pour des raisons techniques, mais aussi pour préserver la santé publique et l'intégrité de l'environnement. Les solutions étudiées, alliant optimisation des paramètres de ligne et intégration de systèmes de protection passive, offrent des pistes concrètes pour un déploiement futur de lignes THT plus sûres et respectueuses de leur environnement.

Bibliographie

- [1] A.Rakov. The state of health of persons working in electric fields of outdoor 400-500kV switchyards. Gig Trud Prof Zabol. (10):50-52. 1966.
- [2] AFSSET (Agence Française de Sécurité Sanitaire de l'Environnement et du Travail). Avis relatif à la Synthèse de l'expertise internationale sur les effets sanitaires des champs électromagnétiques extrêmement basses fréquences. Maison Alfort ; 2010.
- [3] A. Marincu, M. Greconici and S. Musuroi: "The electromagnetic field around a high voltage 400kvelectrical overhead Lines and the influence on the biological systems" .Ser. elec. energy. vol. 18, No. 1, (105-111), April 2005.
- [4] M. Milutinov, A. Juhas, and M. Prša, "Electric and magnetic field in vicinity of overhead Multi-line power system" Conference on modern power system MPS 2008, 12-14 november 2008, Romania .
- [5] J.M. Bakhashwain, M.H.Shwehdi. U.M.Johar,and A.A.El-Naim Magnetic field measurement and evaluation of EHV transmission lines in Saudi Arabia.Proceedings of the international conference on non ionizing radiations at Uniten, ICNIR 2003.
- [6] R .DJEKIDEL, D. MAHI, A. AMEUR, A. OUCHAR. Calcul et réduction du champ électrique au voisinage d'une ligne de transport d'énergie électrique HT. ACTA ELECTROTEHNICA , vol 55,page 1-2, 2014.
- [7] A. Bendaoud, K.. Medles, H. Sayah, K .Senoussi: "Reduction of magnetic field under the H .V transmission line", Journal of electrical & electronics engineering, volume 6 (139 - 145), 2006.
- [8] M. Brahami, M.Ghezaili, A. Bendaoud, M. Miloudi, H. Sayah, "Lignes de transport d'énergie et champs électromagnétiques", 6ème conférence régionale des comités CIGRE des pays arabes, Caire-Egypt 21-23 Novembre 2005.
- [9] Dib .Djalel, Mordjaoui . Mourad. Study of the influence high-voltage power lines on environment and human health (case study: The electromagnetic pollution in Tebessa city, Algeria).Journal of Electrical and Electronic Engineering.2(1):1-8, 2014. DOI:10.11648.