

RÉPUBLIQUE ALGÉRIENNE DÉMOCRATIQUE ET POPULAIRE

وزارة التعليم العالي والبحث العلمي

Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique

جامعة محمد البشير الإبراهيمي - برج بو عريريج

Université de Mohamed El-Bachir El-Ibrahimi - Bordj Bou Arreridj

Faculté des Sciences et de la Technologie

Département Electromécanique

MÉMOIRE

Présenté pour l'obtention du **diplôme de MASTER**

En : Electrotechnique

Spécialité : (Commande Electrique)

Par : - Bendali Fayçal

- Karour Radouane

Sujet

Analyse du champ électromagnétique des lignes de transmission
aérienne HVDC sur le corps humain

Soutenu publiquement, le 17/ 09 /2023, devant le jury composé de :

Mr Mourad HAMIMID	Prof	Univ-BBA	Président
Mr Abderrahim REFFAS	MCA	Univ-BBA	Examineur
Mme Fatiha AOUABED	MCB	Univ-BBA	Encadrant

Année Universitaire 2022/2023

DEDICACES

Je dédie ce modeste travail à :

Mes parents

Puisse ce modeste travail constituer une légère compensation pour tous les nobles sacrifices que vous étés imposé pour assurer mon bien être et éducation.

Et sans vous, sans votre présence, et sans votre patience, ce travail aurait été impensable Rétablissement à mon père et longue vie à chère mère

Ma femme et mes enfants : Zinou, Amine et Bouthaina

Mon frère et mes sœurs

Tous mes collègues de travail et mes amies

Tous les enseignants de départements électromécaniques

Je remercie très sincèrement mon encadrante :

DR.AOUABED FATIHA

BENDALI FAYCAL

DEDICACES

Je dédie ce modeste travail à :

Mes parents

Puisse ce modeste travail constituer une légère compensation pour tous les nobles sacrifices que vous étés imposé pour assurer mon bien être et éducation.

Et sans vous, sans votre présence, et sans votre patience, ce travail aurait été impensable Rétablissement à mon père et longue vie à chère mère

Ma femme et mes enfants

Mon frère et mes sœurs

Tous mes collègues de travail et mes amies

Tous les enseignants de départements d'électromécaniques

Je remercie très sincèrement mon encadrante :

DR.AOUABED FATIHA

KAROUR RADOUANE

REMERCIEMENT

Nous remercions notre promotrice **Dr AOUABED** d'avoir guidé nos pas tout au long de voyage académique, votre expertise et votre soutien nous ont été inestimable, et nous tenons à exprimer notre gratitude envers tous les enseignants pour leurs encouragements de continuer les études en MASTER, et nos remerciements aussi pour l'administration et les collègues avec les nous avons passé le curseur.

Karour Radouane

Bendali Fayçal

ملخص:

إن التنمية الاقتصادية العالمية ونمو الطلب على الطاقة الكهربائية هي اتجاهات لا مفر منها. وفي هذا السياق، أصبحت خطوط نقل التيار المباشر عالي الجهد (HVDC) حلاً متزايد الأهمية لتلبية الاحتياجات المتزايدة من الكهرباء. إن موضوع التأثيرات المحتملة للمجالات الكهربائية والمغناطيسية من خطوط نقل الجهد العالي على صحة الإنسان والكائنات الحية هو بالفعل موضوع معقد ويجذب الاهتمام المستمر في مجال البحث. باختصار، يهدف بحثنا إلى قياس وتحليل المجالات الكهربائية والمغناطيسية الساكنة الناتجة عن خط نقل HVDC بجهد $500 \pm$ كيلو فولت وتقييم تأثيرها على السلامة العامة. وهذا يتطلب فهم معالم الخط والعواقب المحتملة على الأفراد والمعدات في منطقة تأثير الخط.

كلمات مفتاحية: المجال الكهرومغناطيسي، COMSOL Multiphysics، العناصر المنتهية (FEM)، وخطوط النقل العلوية HVDC.

Résumé :

Le développement économique mondial et la croissance de la demande en énergie électrique sont des tendances incontournables. Dans ce contexte, les lignes de transmission à courant continu à haute tension (HVDC) sont devenues une solution de plus en plus importante pour répondre aux besoins croissants en électricité.

Le sujet des effets le champ électromagnétique des lignes de transmission à haute tension sur la santé humaine et les organismes vivants est en effet complexe et suscite un intérêt continu dans le domaine de la recherche. En résumé, notre recherche vise à quantifier et à analyser les champs électriques et magnétiques statiques générés par une ligne de transmission HVDC ± 500 kV et à évaluer leur impact sur la sécurité publique. Cela nécessite la compréhension des paramètres de la ligne et des conséquences potentielles sur les individus et les équipements dans la zone d'influence de la ligne.

Mots Clés : Champ électromagnétique, COMSOL MULTIPHYSICS, méthode des éléments fini (MEF), ligne de transmission HVDC.

Abstract:

Global economic development and the growth in demand for electrical energy are undeniable trends. In this context, high-voltage direct current (HVDC) transmission lines have become an increasingly important solution to meet the growing electricity needs.

The topic of the electromagnetic field effects of high-voltage transmission lines on human health and living organisms is indeed complex and continues to be of ongoing interest in the research field. In summary, our research aims to quantify and analyze the static electric and magnetic fields generated by a ± 500 kV HVDC transmission line and assess their impact on public safety. This requires an understanding of line parameters and potential consequences on individuals and equipment within the line's influence area.

Keywords: Electromagnetic field, COMSOL MULTIPHYSICS, Finite Element Method (FEM), HVDC transmission line.

SOMMAIRE

Résumé :

Introduction générale	1
Chapitre 01 : Généralité sur les lignes électriques	3
1.1. Introduction	3
1.2. Lignes électriques	3
1.2.1. Définition	3
1.2.2. Lignes aériennes	3
1.2.3. Tensions de fonctionnement	4
1.2.4. Lignes souterraines	5
1.2.5. Câbles sous-marins	6
1.2.6. Grandeurs caractéristiques d'une ligne	7
a. Impédance de la ligne	7
b. Admittance de la ligne	7
1.3. Principaux composants des lignes aériennes	7
1.3.1. Pylônes	8
1.3.1.1 Différents types de pylône	8
1.3.2 Conducteurs	12
1.3.3. Isolateurs	13
1.3.4. Eclateurs	14
1.3.5. Câbles de garde	15
1.4. Lignes à courant continu	15
1.5. Champ électromagnétique	16
1.5.1. Définition	16
1.5.2. Champ électrique	17
1.5.2. Champ magnétique	17
1.5.4. Champs électriques et magnétiques générés par des lignes à haute tension	18
1.5.5. Effets de champs magnétiques	18
1.6. Conclusion	19
Chapitre 02 : Généralité sur les systèmes HVDC	20
2.1. Introduction	20
2.2. Systèmes de transmission : HVAC vs HVDC	20
2.2.1. Système de transmission HVAC	20
2.2.2. Système de transmission HVDC	21
2.3. Développement de la technologie HVDC	21

2.4.	Avantages du transport d'énergie en technique HVDC	24
2.5.	Inconvénients du transport d'énergie en technique HVDC	26
2.6.	Domaine d'utilisation des systèmes HVDC	27
2.7.	Principe de fonctionnement d'un système transport HVDC	27
2.8.	COMPOSITION DU SYSTEME HVDC.....	27
2.9.	Types des liaisons HVDC	28
.2.10	Effet des champs électromagnétiques sur la santé et l'environnement	28
2.10.1.	Effets à court terme.	29
2.10.2.	Effets à long terme	30
2.10.3.	Quelques études sur l'effet des champs électromagnétiques sur la santé et l'environnement.	31
a.	<i>Leucémies infantiles</i>	31
b.	<i>Cancer du sein</i>	31
c.	<i>Lignes haute tension et cancers</i>	31
d.	<i>Champs magnétiques et cancer chez l'enfant</i>	32
e.	<i>Etudes expérimentales chez l'animal.</i>	33
2.9.	Conclusion	33
Chapitre 03 : Résultats et discussion.....		34
3.1.	Introduction.....	34
3.2.	Types des méthodes de calculs	35
3.3.	Modélisation en électromagnétique avec COMSOL 2D.....	35
3.3.1.	Introduction sur le programme COMSOL MULTIPHYSIQUES.....	35
3.3.2.	Méthode des éléments finis (MEF).....	35
3.3.3.	Étapes de la Méthode des éléments finis	35
a.	<i>Première étape</i>	36
b.	<i>Deuxième étape (définis les matériaux)</i>	37
c.	<i>Troisième étape (maillage et l'étude)</i>	39
d.	<i>La quatrième étape</i>	40
e.	<i>La cinquième étape</i>	40
3.4.	Résultats et analyse de la simulation	40
3.4.1.	Simulation du modèle proposé	40
3.4.2.	Calcul du champ et potentiel électrique	41
3.4.3.	Calcul du champ magnétique	45
3.4.4.	Variation de la densité de flux magnétique et sa distribution	45
3.4.5.	Facteurs affectant le champ électrique	47
a.	<i>Différents niveaux de la tension</i>	47

SOMMAIRE

<i>b. Différents hauteur de la terre H.</i>	47
<i>c. Différentes distances de séparation D.</i>	48
3.5. Conclusion	49
Conclusion générale	50
Références :	

LISTE DES FIGURES

FIGURE 1 1: LIGNE AERIENNE	4
FIGURE 1 2: LIGNES SOUTERRAINES	6
FIGURE 1 3: SCHEMAS EQUIVALENTS EN II ET EN T	7
FIGURE 1 4: UN PYLONE SUR UNE LIGNE 400kV EN FRANCE	8
FIGURE 1 5: PYLONE EQUILIBRE	9
FIGURE 1 6: SCHEMAS DE PYLONES A TRIANGLES	10
FIGURE 1 7: SCHEMA DU PYLONE CHAT	10
FIGURE 1 8: SCHEMATISATION DU PYLONE ELECTRIQUE DE TYPE BEAUBOURG.....	11
FIGURE 1 9: SCHEMA DU PYLONE ELECTRIQUE TRIANON.....	11
FIGURE 1 10: SCHEMA DU PYLONE PORTIQUE.....	12
FIGURE 1 11: CONDUCTEUR AERIENNE	13
FIGURE 1 12: ECLATEURS.....	15
FIGURE 1 13: CABLES DE GARDE.	15
FIGURE 1 14: COUPE TRANSVERSALE DU CHAMP ELECTRIQUE D'UNE LIGNE A HAUTE TENSION DE 380 kV	17
FIGURE 1 15: CHAMP MAGNETIQUE D'UNE LIGNE A HAUTE TENSION TYPIQUE DE 380 kV A DEUX TERNES, A PLEINE CHARGE (1920 A).	18
FIGURE 2 1: DISPOSITION DU SYSTEME HVDC	21
FIGURE 2 2: POSTE DE SELLINGE DE LA LIAISON IFA 2000 MW	24
FIGURE 2 3: POSTE LES MANDARINS DE LA LIAISON IFA 2000 MW.....	24
FIGURE 2 4: COMPARAISON ECONOMIQUE ENTRE LE TRANSPORT EN HVCA ET HVDC..	26
FIGURE 2 5: COMPARAISON DE LA LARGEUR DU COULOIR REQUIS PAR LES DEUX LIGNES HVDC 500 kV.....	26
FIGURE 2 6: SCHEMA DE PRINCIPE DU SYSTEME HVDC	27
FIGURE 2.7: DIAGRAMME SCHEMATIQUE D'UN SYSTEME HVDC RELIANT DEUX RESEAUX AC	28
FIGURE 3 1: DIAGRAMME DE DIFFERENTES ETAPES DE RESOLUTION	36
FIGURE 3 2: MODELE GEOMETRIQUE DE LA LIGNE ELECTRIQUE.....	37
FIGURE 3 3: MODELE GEOMETRIQUE DU CORPS HUMAIN, COMPOSE DE TROIS MATERIAUX: OS, FOIE ET MUSCLE.	38
FIGURE 3 4: SIMULATION SIMPLIFIEE EN 2D ET LES CONDITIONS LIMITES.	39
FIGURE 3 5: MAILLAGES ELECTRIQUE AVEC CORPS HUMAIN.	39
FIGURE 3 6: DISTRIBUTION DE LIGNES EQUIPOTENTIELLES DE ± 500 kV HVDC	42
FIGURE 3 7: POTENTIEL ELECTRIQUE A DIFFERENTES DISTANCES	43
FIGURE 3 8: CHAMP ELECTRIQUE D'UNE LIGNE.....	44
FIGURE 3 9: CHAMP MAGNETIQUE D'UNE LIGNE.....	45
FIGURE 3 10: LA DENSITE DU FLUX MAGNETIQUE.	46
FIGURE 3 11: CHAMP MAGNETIQUE A DIFFERENTS DISTANCES.....	46
FIGURE 3 12: CHAMP ELECTRIQUE A DIFFERENTS NIVEAUX DE LA TENSION	47
FIGURE 3 13: CHAMP ELECTRIQUE A DIFFERENTS HAUTEUR DE LA TERRE H.	48
FIGURE 3 14: CHAMP ELECTRIQUE A DIFFERENTS DISTANCES DE SEPARATION D.....	48

LISTE DES TABLEAUX

TABLEAU 1 1: LES DIFFERENTES TENSIONS DE FONCTIONNEMENT ALTERNATIF ET CONTINU	5
TABLEAU 1 2: AVANTAGES ET INCONVENIENTS DES LIGNES.....	6
TABLEAU 1 3: TABLEAU 1.3 QUELQUES EXEMPLES SUR LES LIGNES ALGERIENNES.	14
TABLEAU 2 1: LE SEUIL DE PERCEPTION DU CHAMP MAGNETIQUE.	31
TABLEAU 2 2: RESULTATS RESUMES POUR LES EFFETS A LONG TERME CHEZ L'ENFANT.....	32
TABLEAU 3 1: CARACTERISTIQUE DE LA LIGNE ELECTRIQUE.....	37
TABLEAU 3 2: PROPRIETES ELECTRIQUES DE CERTAINS TISSUS HUMAINS A 50 Hz [31]	38
TABLEAU 3 3: FACTEUR DE DEGATS ET DENSITE DE COURANT.	42

Acronymes

Abbreviations	Signification
HTA	Haute tension A
HTB	Haute tension B
TBT	Très basse Tension
BT	Basse Tension
HVDC	Courant continu haute tension
HVAC	Courant alternatif haute tension
DC, AC	Courant continu, courant alternatif
FEM	La méthode des éléments finis

Symboles

Abbreviations	Signification
\vec{F}	Le vecteur de la force
Q	La charge électrique
$\vec{\text{grad}}$	Le gradient
v	La vitesse de champ de matériau
V/m	Volte sur mètre
T, μ T	Tesla, micro tesla
Z_L	Impédance linéique d'une phase de la ligne
R_L	La résistance de la ligne
X_L	La réactance inductive de la ligne.
Y_L	Admittance linéique d'une phase de la ligne
E	le champ électrique
ρ_v	La densité volumique de la charge électrique.
ϕ	Potentiel électrique de l'espace
σ	Conductivité électrique
E_{d1}, E_{d2}	tension de la ligne
α, β	angles d'amorçage des convertisseurs 1 et 2 respectivement
j	La densité de courant électrique
H	La hauteur des lignes DC.
F_{AC}, F_{DC}	Les filtres des alternatifs et continus
B	Le champ magnétique
D	Distance entre les lignes
L_1, L_2	Les inductances de lissage de cotés harmoniques
A	Vecteur
n	Vecteur
∇	Nabla
ϵ_0, ϵ_r	Perméabilité de vide, Perméabilité de l'air respectivement
j_e	La densité de courant libre.



INTRODUCTION GENERALE

Introduction générale

Vous êtes-vous déjà senti inconfortable en dessous de ligne à haute tension ? En plus du grésillement désagréable qui chatouille vos tympans, une armée de fourmis électrique semble vous parcourir le corps tel une terre à conquérir avant de fouiller plus en profondeur pour savoir si notre peur des lignes à haute tension est justifiée ou non, précisons d'abord en quoi elles consistent et en premier lieu, qu'est-ce que ça veut dire une ligne à haute tension ?.

Une ligne à haute tension est un système de câbles et de pylônes conçu pour transporter de l'électricité à des niveaux de tension élevés, généralement bien au-dessus de la tension domestique standard. Ces lignes sont utilisées pour transporter l'électricité sur de longues distances depuis les centrales électriques vers les zones où elle est consommée [1]. Elles transportent l'énergie électrique à des tensions comprises entre 44 et 765 kV (1 kV = 1000 V). Les lignes à haute tension sont essentielles pour le transport efficace de l'électricité, mais elles suscitent souvent des préoccupations liées à la santé et à l'environnement en raison de l'exposition aux champs électromagnétiques qu'elles génèrent.

Les systèmes HVDC (High Voltage Direct Current) et HVAC (High Voltage Alternating Current) sont deux technologies fondamentales pour la transmission et la distribution d'électricité à grande échelle. Ils jouent un rôle essentiel dans la fourniture fiable d'énergie électrique à travers le monde, mais diffèrent fondamentalement par la nature de leur courant électrique et leurs applications.

Le choix des lignes à haute tension s'impose dès qu'il s'agit de l'énergie électrique sur des distances supérieures à quelques Kilomètres. Le but principal est de réduire les pertes en ligne, et d'améliorer la stabilité du réseau.

L'exploitation de systèmes de transport d'électricité en courant continu à haute tension (HVDC, High Voltage Direct Current) est devenue importante à l'ère actuelle, es systèmes HVDC jouent un rôle crucial dans l'optimisation du transport d'électricité à longue distance, l'intégration des énergies renouvelables et la stabilité du réseau électrique, ce qui en fait une technologie essentielle dans l'ère actuelle de la transition énergétique et de la demande croissante en électricité.

Les champs électromagnétiques ont de nombreux effets biologiques connus. Tout d'abord, la composante magnétique des CÉM peut induire des courants électriques dans tout matériau conducteur. Puisque notre corps est composé en grande partie d'eau, il est conducteur. Les CÉM sont donc susceptibles de produire des courants électriques dans les tissus constituant notre organisme [1].

Difficile d'imaginer notre vie quotidienne sans tous ces appareils électriques et électroniques. Mais nous oublions souvent que partout où il y a du courant, il y a des champs électriques et magnétiques, comme dans le cadre de la production, du transport et de la distribution d'énergie électrique.

Nous ne pouvons ni voir ni sentir les champs électriques et magnétiques. Nous pouvons uniquement mesurer leur intensité – un fait qui inquiète de nombreuses personnes.

Le corps humain est de plus en plus exposé à une pollution électromagnétique résultant de l'utilisation croissante de l'électricité. Bien que les conséquences sur la santé ne soient pas clairement établies, l'OMS (Organisation Mondiale de la Santé) précisent notamment des valeurs de champ magnétique B , de champ électrique E , et de densité J de courants induits dans le corps à ne pas dépasser. Par ailleurs, le transport de l'énergie électrique attire l'attention depuis longtemps en raison des valeurs très importantes des grandeurs électriques [2].

L'objectif de notre travail est donc de calculer la distribution du champ électrique et magnétique au voisinage des lignes à haute tension et les effets des champs électromagnétiques sur le corps humain.

Ainsi le travail présenté dans ce mémoire est articulé autour de trois chapitres :

Le premier chapitre sera consacré à un rappel sur les généralités dans les lignes électriques

Le deuxième chapitre de notre mémoire portera sur les technologies fondamentales pour la transmission et la distribution d'électricité à grande échelle, ainsi qu'un rappel des effets des champs électromagnétiques sur la santé.

Dans le troisième chapitre, nous calculons la distribution du champ électrique et magnétique au voisinage des lignes HVDC de configuration type nappe.

Enfin, nous terminerons notre travail par une conclusion générale.

CHAPITRE 1

Chapitre 01 : Généralité sur les lignes électriques

1.1. Introduction

Les lignes aériennes et souterraines sont utilisées pour transporter l'électricité sur de longues distances, mais elles sont soumises à des champs électromagnétiques en raison du courant électrique qui circule à travers elles. Les champs électromagnétiques peuvent avoir des effets sur la santé humaine et l'environnement, c'est pourquoi il est important de comprendre comment ils se propagent et comment les minimiser. Les lignes aériennes sont généralement plus susceptibles de générer des champs électromagnétiques que les lignes souterraines en raison de leur distance par rapport au sol. Toutefois, les lignes souterraines peuvent également produire des champs électromagnétiques, en particulier lorsqu'elles sont situées près de bâtiments ou d'autres structures. Les effets des champs électromagnétiques sur la santé humaine font l'objet de débats et de recherches scientifiques continues, et il est important de prendre en compte ces facteurs lors de la conception et de la mise en place de nouvelles installations électriques.

1.2. Les lignes électriques

1.2.1. Définition

Les lignes électriques sont un pilier fondamental du réseau électrique moderne, assurant la distribution efficace de l'électricité sur de vastes distances, tout en contribuant à la fourniture fiable d'énergie aux consommateurs et aux entreprises. [3].

Les lignes électriques, également appelées lignes principales des réseaux de transport d'électricité, jouent un rôle essentiel dans le transport de l'électricité sur de longues distances. Elles peuvent prendre la forme de lignes aériennes, souterraines ou sous-marines, bien que le terme "lignes électriques" soit souvent réservé aux liaisons aériennes dans le domaine professionnel. Ces lignes sont utilisées pour transporter l'électricité produite par diverses centrales électriques vers les régions où elle est nécessaire. Elles permettent également d'interconnecter différents réseaux électriques, favorisant ainsi la stabilité et la fiabilité du système électrique global.

1.2.2. Les lignes aériennes

Les lignes aériennes sont constituées principalement d'un ensemble de conducteurs assurant avant tout la continuité électrique et réalisant une connexion entre deux nœuds d'un réseau électrique [4].

Les lignes aériennes peuvent être classées suivant les fonctions qu'elles assurent dans le réseau.

- **Lignes de grand transport** : elles permettent l'évacuation de l'énergie produite par un centre de production vers un centre de consommation ou vers les grands postes d'interconnexion [4].
- **Lignes d'interconnexion** : elles assurent la mise en commun des ressources de production de plusieurs régions ou pays et facilitent ainsi le secours mutuel lors de situations particulières affectant la consommation, l'hydraulicité, la disponibilité des équipements, etc. Les lignes d'interconnexion constituent un réseau maillé [4].
- **Lignes de répartition** : elles dirigent l'énergie depuis les grands postes d'interconnexion vers les postes alimentant les réseaux de distribution ou ceux des grands clients nationaux [4].
- **Lignes de distribution** : elles acheminent l'énergie aux différents consommateurs ; ces lignes se décomposent en lignes d'ossature à forte section de conducteur et en lignes d'écart, essentiellement radiales, généralement plus légères.



Figure 1.1: Ligne aérienne

1.2.3. Tensions de fonctionnement

Il est d'usage de classer les lignes électriques en fonction de leur tension de fonctionnement (prise entre deux de leurs trois conducteurs) :

- Basse tension - moins de 1 000 volts, utilisée pour la connexion vers un immeuble d'habitation ou de petits clients commerciaux et de l'utilitaire.

- Moyenne tension - entre 1 000 volts (1 kV) et 33 kV, utilisée pour la distribution dans les zones urbaines et rurales.
- Haute tension - entre 33 kV et 230 kV utilisée pour le transport de grandes quantités d'énergie électrique.
- Très haute tension - plus de 230 kV à 800 kV utilisée pour de longues distances, de très grandes quantités d'énergie électrique.
- Ultra haute tension - supérieure à 800 kV

Tableau 1.1: Les différentes tensions de fonctionnement alternatif et continu

		Alternatif	continu
Très basse Tension	<u>TBT</u>	$U_n \leq 50V$	$U_n \leq 120V$
Basse Tension	<u>BT</u>	$50V < U_n \leq 1\ 000V$	$120V < U_n \leq 1500V$
Haute Tension	<u>HTA</u>	$1000V < U_n \leq 50\ 000V$	$1\ 500V < U_n \leq 75\ 000V$
	<u>HTB</u>	$U_n > 50\ 000V$	$U_n > 75\ 000V$

1.2.4. Les lignes souterraines

Les lignes électriques souterraines sont des câbles électriques enfouis dans le sol pour le transport de l'électricité. Elles sont privilégiées dans les zones densément peuplées, les centres villes, les parcs, les zones résidentielles et autres endroits où les lignes aériennes ne sont pas envisageables.

Ces câbles souterrains offrent plusieurs avantages, notamment une esthétique améliorée, car ils sont dissimulés sous terre, évitant ainsi l'encombrement visuel des lignes aériennes. Ils sont également moins vulnérables aux intempéries et aux perturbations causées par les éléments extérieurs, ce qui contribue à une meilleure fiabilité du réseau électrique.

Les lignes électriques souterraines sont une solution efficace pour assurer la distribution d'électricité dans les zones urbaines et les lieux où la présence de lignes aériennes serait peu pratique ou esthétiquement indésirable.



Figure 1.2: Lignes souterraines

En somme, les lignes électriques souterraines ont des avantages et des inconvénients. Le choix entre les lignes aériennes et les lignes souterraines dépendra des circonstances locales et des priorités de chaque situation (Tableau 1.2).

Tableau 1.2: Avantages et inconvénients des lignes.

	Avantages	Inconvénients
Lignes aériennes	<ul style="list-style-type: none"> -Frais de construction et d'entretien acceptable -Surveillance facile, -Détection des defaults -Défauts souvent fugitifs 	<ul style="list-style-type: none"> -Sujet aux atteintes extérieures (Vulnérables) -Exposées aux décharges -Environnement et esthétique -Atmosphériques (la foudre) -Difficultés de droit de passage -Dangers pour l'aviation et en cas de rupture de conducteurs
Lignes souterraines	<ul style="list-style-type: none"> -Protège des atteintes extérieures (décharges atmosphériques) -Respecte l'environnement et l'esthétique -Seule solution en ville et pour la traversée de cours d'eau -Perturbation radio faible Pas de champ extérieur 	<ul style="list-style-type: none"> -Frais de construction 5 à 20 fois chère que les lignes aériennes -Entretien difficile -Problème de surveillance -Localisation des défauts malaisée -Problème de corrosion -Longueur limitée des câbles

1.2.5. Les câbles sous-marins

Les câbles sous-marins, également connus sous le nom de câbles sous-marins de transmission d'électricité, sont des câbles spécialement conçus pour transporter de l'électricité sous l'eau, notamment à travers les océans et les mers. Ils jouent un rôle essentiel dans le transport de l'énergie électrique entre différentes régions, continents et îles, facilitant ainsi l'interconnexion des réseaux électriques mondiaux.

Ces câbles sous-marins sont utilisés pour diverses raisons, notamment le transport de l'électricité produite par des sources d'énergie éloignées vers les zones de consommation, l'intégration des énergies renouvelables provenant de parcs éoliens offshore ou de centrales solaires situées près des côtes, et la fourniture d'énergie aux îles éloignées qui ne peuvent pas être reliées au réseau continental par des moyens traditionnels.

1.2.6. Grandeurs caractéristiques d'une ligne

La présence d'un champ statique entre les conducteurs est la conséquence de la capacité entre ces conducteurs, quant au champ magnétique, il est dû à l'inductance propre des conducteurs formant la ligne. Nous aurons donc besoin d'inductances et de capacités pour notre modèle.

Les conducteurs eux-mêmes ont une résistance propre, cette résistance étant en série dans les conducteurs, dans notre modèle.

a. Impédance de la ligne

C'est une grandeur complexe dans laquelle interviennent la résistance et la réactance inductive de la ligne.

$$Rl + jX = Zl \quad (1)$$

b. Admittance de la ligne

De la même façon c'est une grandeur complexe définie par :

$$gl + jbl = yl \quad (s) \quad (2)$$

Nous avons alors un circuit basé sur des composants simples (résistances, inductances et capacités), capable de reproduire fidèlement le comportement de la ligne

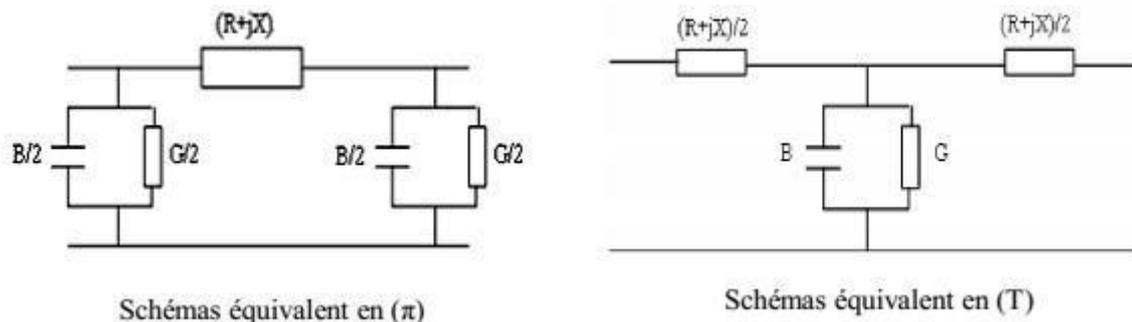


Figure 1.3: Schémas équivalents en π et en T

1.3. Les principaux composants des lignes aériennes

Une ligne de transport se compose de conducteurs, d'isolateurs et de supports.

1.3.1. Pylônes

Pour les lignes aériennes, les opérateurs de transport d'électricité, utilisent des pylônes, en général réalisés en treillis d'acier. Leur fonction est de supporter et de maintenir les conducteurs à une distance suffisante du sol et des obstacles : ceci permet de garantir la sécurité et l'isolement par rapport à la terre, les câbles étant nus (non isolés) pour en limiter le poids et le coût [3].

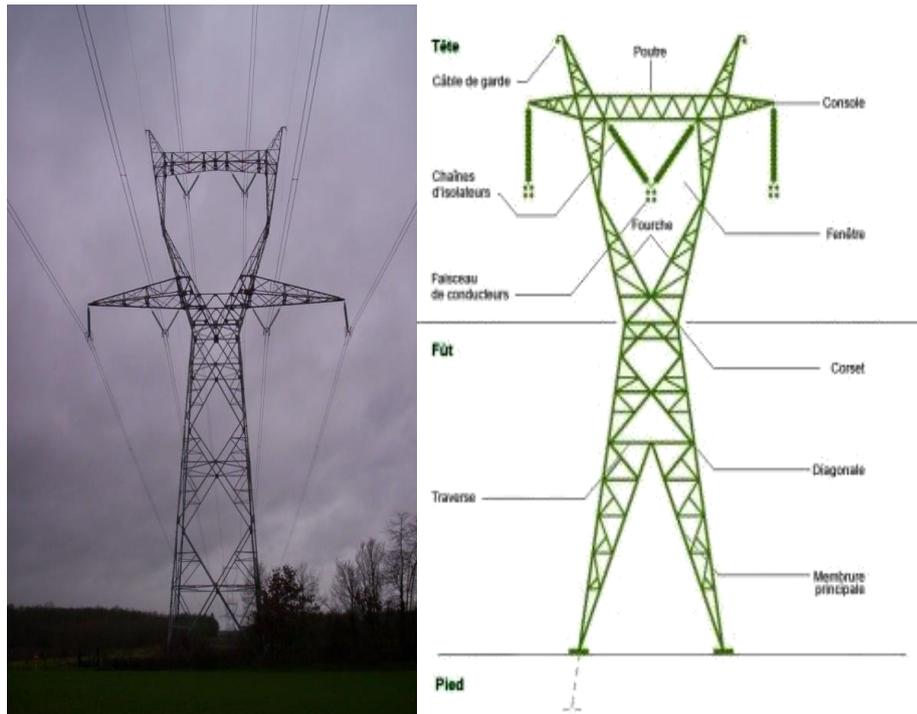


Figure 1.4: Un Pylône sur une ligne 400kV en France

1.3.1.1 Les différents types de pylône

Le design des pylônes et des réseaux de pylônes intègre des questions de coûts (moindre quantité de matériaux et mise en œuvre et entretien facilités pour diminuer les coûts), des aspects techniques (solidité, moindre prise au vent...), mais aussi de sécurité (limitation des risques de fuite d'électricité et de brûlure électrique)[5], esthétiques et d'intégration paysagère et éco paysagère [6]. Depuis la diffusion de courant à très haute tension sur de grandes distances, dans les années 1950, les pylônes sont devenus de plus en plus grands et ont nécessité des fondations plus profondes et solides [7].

a. Pylône Equilibre

La ligne du courant à très haute tension de Avelin à Tourmignies.- Hauts-de-France Baptisé Equilibre, dessiné par l'agence Hugh Dutton Associés ce pylone a été conçu en 2021, pour le transport d'électricité à très haute Tension. Il constitue la première ligne acheminant

l'énergie verte essentiellement éolienne produite par les pays du Nord de l'Europe à travers la France CAUE du Nord



Figure 1.5: pylône équilibre

b. Pylône en treillis

C'est un pylône métallique, constitué par un assemblage de membrures et cornières (notamment utilisées comme contreventement) [8] formant un treillis (ou de tubes).

Il est destiné à la plupart des lignes de transport de l'électricité, sous forme de courant alternatif ou de courant continu. Les modèles les plus utilisés ont un fût quadrangulaire constitué de consoles ou de traverses. Les fondations sont généralement à pieds séparés. Il faut distinguer les pylônes de forme phallique, typiques du Canada, et ceux de forme trapézoïdale (parfois dits *tétrapodes*).

c. Pylône à triangles

Les pylônes possédant 3 triangles (1 circuit triphasé) sont également appelés pylônes à armement *Triangle*.

Les pylônes possédant 6 triangles (2 circuits triphasés) sont également appelés pylônes à armement *Drapeau*.

d. Pylône Nappe

Le pylône Nappe a la particularité d'avoir les conducteurs situés sur le même plan horizontal, dans le but de limiter la hauteur du pylône par rapport aux pylônes à triangles

e. Pylône Chat

Le pylône Chat a une hauteur moyenne de 35 mètres et un poids moyen de 6 tonnes en 225 kV.

L'objectif principal du pylône Chat par rapport au pylône Nappe est de surélever le câble du milieu pour des raisons électriques

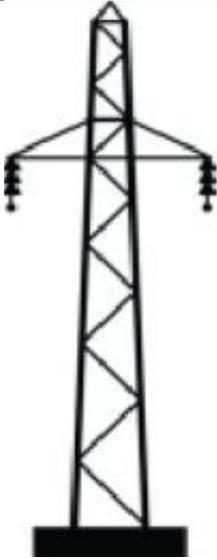
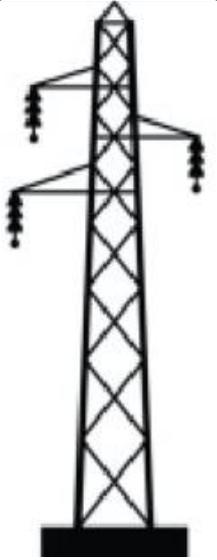
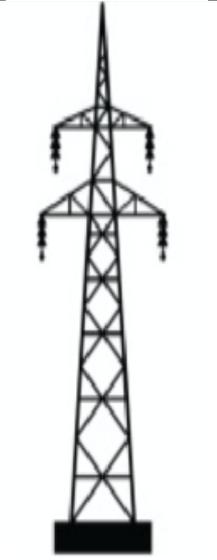
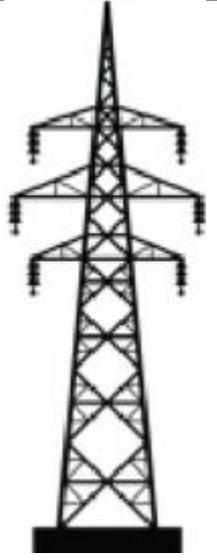
				
Pylône électrique un triangle	Pylône électrique deux triangles	Pylône électrique trois triangles	Pylône électrique quatre triangles	Pylône électrique six triangles

Figure 1.6: Schémas de pylônes à triangles

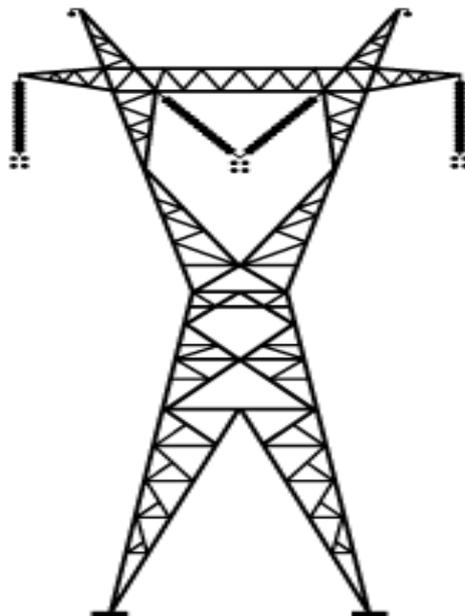


Figure 1.7: Schéma du Pylône chat

f. Pylône F44 ou Beaubourg

Le pylône « *Beaubourg* » mesure 41 mètres et fait 20 tonnes en 225 kV.

Le pylône « *Beaubourg* » mesure 50 mètres et fait 45 tonnes en 400 kV.

Le pylône français « *Beaubourg* », également appelé pylône à armement « *Danube* », est le résultat d'une recherche technique et de design industriel de cinq ans et d'une consultation

nationale menée par EDF. Il porte le nom du Centre national d'art et de culture Georges-Pompidou, dit Beaubourg où le jury l'a retenu en 1977 parmi une quinzaine de projets. Depuis, à chaque nouvelle ligne (ou modernisation de ligne), il s'inscrit dans le paysage.



Figure 1.8: Schématisation du pylône électrique de type Beaubourg

g. Pylône Trianon

Le pylône Trianon mesure 25 mètres et fait 12 tonnes en 225 kV.

Le pylône Trianon mesure 35 mètres et fait 21 tonnes en 400 kV.

Le pylône Trianon, de géométrie très simple, a été largement employé à la demande des services chargés de la protection des sites ou de zones sensibles. Pour améliorer l'absorption dans les paysages, une série de pylônes tubulaires surbaissés est mise au point à partir du début des années 1960. C'est une famille de supports en forme de chevalet en tubes d'acier haubanés, offrant une silhouette très aérée se fondant dans le paysage. On en trouve souvent près des aéroports et autres zones aéronautiques.

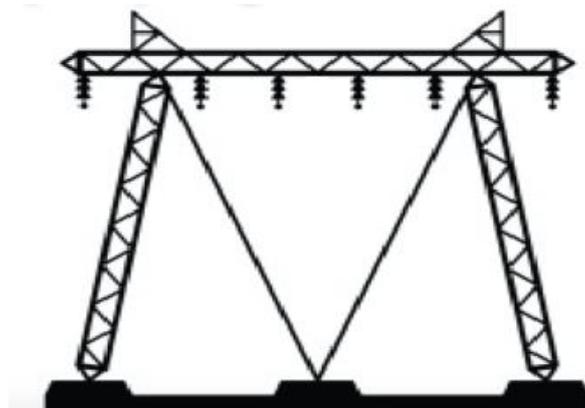
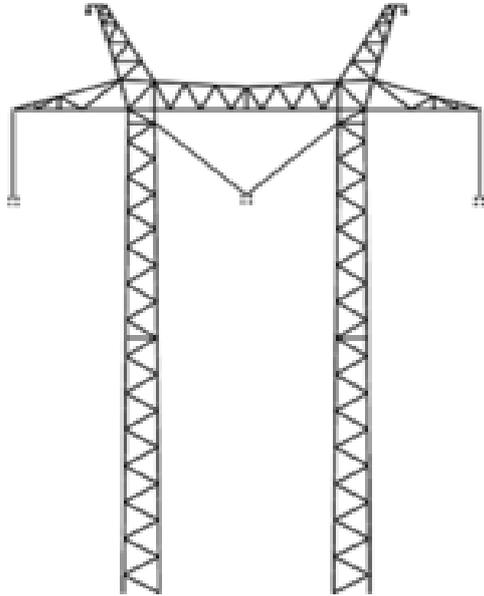


Figure 1.9: Schéma du Pylône électrique Trianon

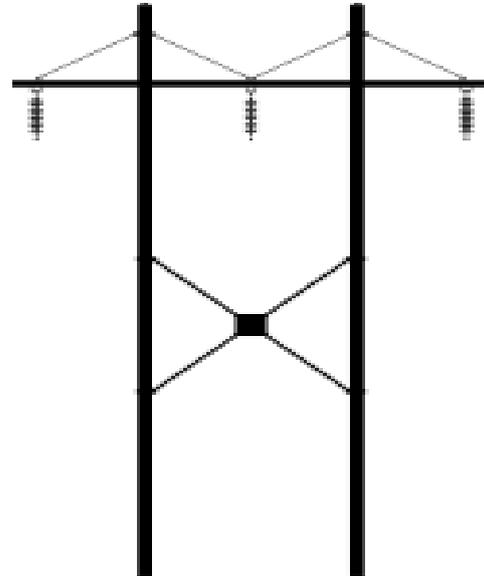
h. Pylône Rhodon

Les pylônes Rhodon ont été conçus de la même façon que les pylônes Trianon. Ces pylônes peuvent accueillir jusqu'à quatre circuits (ternes) 400 kV ou six circuits 225 kV.

i. Pylône portique



Pylône électrique portique



Pylône électrique portique en bois

Figure 1.10: Schéma du Pylône portique

1.3.2 Conducteurs

Le courant électrique est transporté dans des conducteurs. L'énergie électrique étant transportée sous forme triphasée, on trouvera au moins 3 conducteurs par ligne. Pour une phase, on peut aussi trouver un faisceau de conducteurs (de 2 à 4) à la place d'un simple conducteur afin de limiter les pertes. Les conducteurs en cuivre sont de moins en moins utilisés.

On utilise en général des conducteurs en aluminium, ou en alliage aluminium-acier ; on trouve aussi des conducteurs composés d'une âme centrale en acier sur laquelle sont tressés des brins d'aluminium [9]. Les conducteurs sont nus, c'est-à-dire non revêtus d'un isolant.



Figure 1.11: conducteur aérienne

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 les propriétés électriques du conducteur.

La capacité de transport d'une ligne aérienne dépend du type de conducteur et des conditions météorologiques. Il faut éviter que la chaînette formée par le conducteur ne se rapproche trop du sol ou de la végétation à cause de la dilatation thermique provoquée par l'effet Joule.

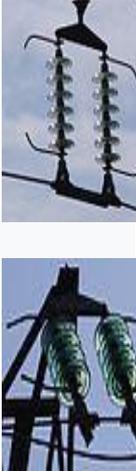
Les conducteurs hautes tensions sont aériens ou souterrains (et parfois sous-marins). Les conducteurs aériens sont soumis à l'action des facteurs atmosphériques : température, vent, pluie, gel, etc. Ces facteurs interviennent de façon importante dans le choix des paramètres d'une ligne haute-tension : type de conducteur électrique (matériaux et géométrie), hauteur et distance des pylônes, tension mécanique maximum sur le conducteur afin de maintenir une garde au sol suffisante, etc. Le choix de ces paramètres a une grande influence sur les coûts de construction et d'entretien d'une ligne de transmission, ainsi que sur sa fiabilité et sur sa longévité. Toutes choses égales par ailleurs la position des conducteurs influe sur l'intensité et la disposition du champ électromagnétique.

1.3.3. Isolateurs

La fixation et l'isolation entre les conducteurs et les pylônes est assurée par des isolateurs, ils ont un rôle à la fois mécanique et électrique. Ceux-ci sont réalisés en verre, en céramique, ou en matériau synthétique [24]. Les isolateurs en verre ou céramique ont en général la forme d'un empilement d'assiettes. Il en existe deux types : les isolateurs rigides (assiettes collées) et les éléments de chaîne (assiettes emboîtées). Plus la tension de la ligne est élevée, plus le nombre d'assiettes est important. Les chaînes peuvent être simples (câbles légers en

suspension), doubles droites (horizontales pour les câbles en amarrage et verticales pour les câbles lourds en suspension), doubles en V (câbles en suspension anti-balancement) voire triples (supportant plusieurs câbles).

Tableau 1.3: Quelques exemples sur les lignes algériennes.

type de ligne	230/400 (420) kV	130/225 (245) kV	52/90 (100) kV	36/63 (72,5) kV	12/20 (24) kV	230/400 V
appellation	400 kV	225 kV	90 kV	63 kV	15 kV ou 20 kV	400 V
classification	THT (HTB transport national)		HT (HTB transport régional)		MT (HTA distribution)	BT (consommation)
nombre d'isolateurs	19	12 à 14	9	4 à 6	2 à 3	1
illustrations						

1.3.4. Les Eclateurs

L'éclateur est généralement constitué de deux électrodes, l'une reliée à l'élément à protéger et l'autre à la terre. Leur distance est généralement réglable de façon à ajuster la tension d'amorçage. Son écartement est réglé pour provoquer l'amorçage si les surtensions des réseaux sont importantes [10].



Figure 1.12:Eclateurs.

1.3.5. Câbles de garde

Les câbles de garde ne transportent pas le courant. Ils sont situés au-dessus des conducteurs. Ils jouent un rôle de paratonnerre au-dessus de la ligne, en attirant les coups de foudre, et en évitant le foudroiement des conducteurs. Ils sont en général réalisés en almelec-acier. Au centre du câble de garde on place parfois un câble fibre optique qui sert à la communication de l'exploitant. Si on décide d'installer la fibre optique sur un câble de garde déjà existant, on utilise alors un robot qui viendra enrouler en spirale la fibre optique autour du câble de garde.

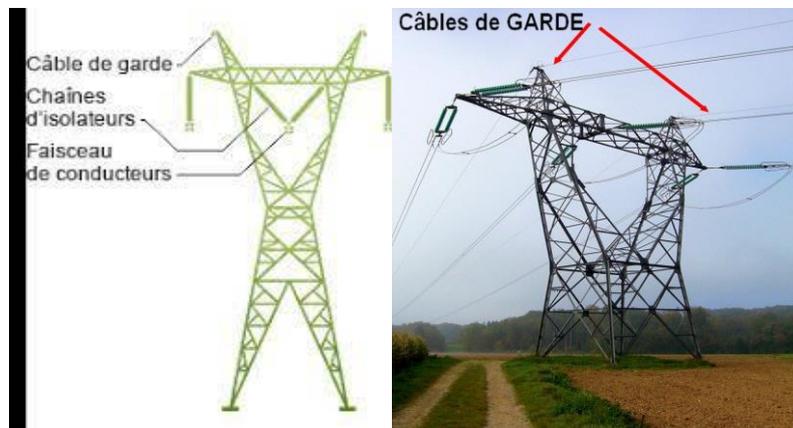


Figure 1.13: câbles de garde.

1.4. Les lignes à courant continu

Les lignes à courant continu à haute tension (High Voltage Direct Current - HVDC) sont un type de technologie de transmission d'électricité qui permet de transporter de grandes quantités d'énergie sur de longues distances avec une efficacité accrue par rapport aux systèmes de transmission à courant alternatif (AC). Contrairement aux lignes AC classiques,

les lignes HVDC transportent l'électricité sous forme de courant continu plutôt que de courant alternatif.

Les lignes HVDC sont utilisées pour interconnecter des systèmes électriques éloignés, relier des sources d'énergie renouvelable éloignées aux centres de consommation, et surmonter des obstacles naturels tels que les océans, les montagnes ou les étendues de terre inhabitables. Elles sont également utilisées pour transporter de l'énergie sur de très longues distances avec des pertes d'énergie réduites, ce qui en fait une option attrayante pour les projets d'interconnexion internationaux.

Les avantages des lignes HVDC incluent une efficacité de transmission plus élevée, une capacité de charge accrue, une meilleure stabilité du système électrique et une plus grande flexibilité pour le contrôle du flux d'électricité. Elles permettent également d'atténuer les pertes d'énergie associées aux lignes de transmission AC sur de longues distances.

Les lignes HVDC utilisent des convertisseurs électroniques pour convertir l'électricité entre courant alternatif et courant continu, ce qui facilite le transfert bidirectionnel de l'électricité et offre des avantages de régulation et de contrôle du système.

En raison de leur efficacité et de leur capacité à surmonter de grandes distances, les lignes HVDC jouent un rôle de plus en plus important dans le paysage de la transmission d'électricité mondiale et contribuent à l'intégration des énergies renouvelables et à l'amélioration de la stabilité du réseau électrique.

1.5. Champ électromagnétique

1.5.1. Définition

Un champ électromagnétique est une région de l'espace où des champs électriques et magnétiques se propagent simultanément. Ces champs sont générés par des charges électriques en mouvement ou par des courants électriques.

Les champs électromagnétiques sont omniprésents dans notre environnement moderne en raison de l'utilisation généralisée de l'électricité et de la technologie sans fil. Ils sont produits par diverses sources, telles que les lignes électriques, les appareils électroniques, les réseaux de communication sans fil (comme le Wi-Fi et les téléphones portables), ainsi que par des phénomènes naturels tels que les éclairs.

Les champs électriques sont créés par des charges électriques, qu'elles soient positives ou négatives, tandis que les champs magnétiques sont créés par des courants électriques en mouvement. Ces deux types de champs sont liés et interagissent entre eux, formant un champ électromagnétique.

Il est important de noter que les champs électromagnétiques peuvent avoir des effets sur la santé humaine et l'environnement, surtout lorsqu'ils sont présents à des niveaux intenses ou lorsqu'on y est exposé de manière prolongée. Les recherches scientifiques se poursuivent pour mieux comprendre les effets potentiels des champs électromagnétiques et pour établir des normes de sécurité appropriées.

1.5.2. Champ électrique

Le champ électrique (figure 1.14) traduit l'effet d'attraction ou de répulsion qui est exercé par une charge sur une autre charge (en fonction de leurs signes respectifs). On peut dire de façon simplifiée que le champ électrique est lié à la tension. Plus la tension est grande, plus le champ électrique qui en résulte est grand. Un objet électrique sous tension génère toujours un champ électrique, même s'il n'est parcouru par aucun courant [11].

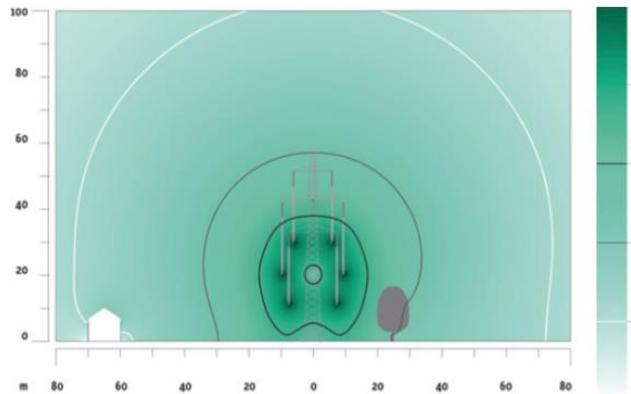


Figure 1.14: Coupe transversale du champ électrique d'une ligne à haute tension de 380 kV [11]

Le champ électrique est une grandeur physique qui exerce une force électrique sur une particule chargée. En un point donné, le vecteur champ électrique \vec{E} est défini comme étant la force par unité de charge placée en ce point :

$$\vec{E} = \frac{\vec{F}}{q} \quad (3)$$

En général on utilise une autre unité : Vu que $E = -dV/dx$: Alors $[E] = V/m$

$$\vec{E} = -\overrightarrow{\text{grad}} V \quad (4)$$

1.5.2 Champ magnétique

Le champ magnétique (figure 1.15) décrit la force exercée par une charge électrique en mouvement. Il se produit quand il y a déplacement de charge électrique, lorsque le courant circule. On peut dire de façon simplifiée que le champ magnétique est lié au courant. Pourtant on entend plus souvent parler de Tesla (T) ou plutôt de micro tesla (μT – soit un million de

fois moins qu'un T) comme unité du champ d'induction magnétique ; celui-ci traduit l'effet du champ magnétique dans un milieu donné [11]

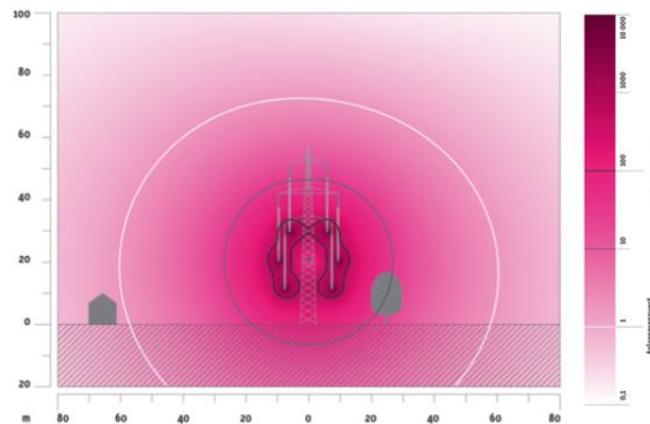


Figure 1.15: Champ magnétique d'une ligne à haute tension typique de 380 kV à deux ternes, à pleine charge (1920 A). [11]

1.5.4. Les champs électriques et magnétiques générés par des lignes à haute tension

Les champs magnétiques sont générés par le courant électrique qui circule dans les câbles de la ligne électrique. Plus le courant est important, plus le champ magnétique sera important. Les champs magnétiques peuvent se propager sur de plus longues distances que les champs électriques, et ils sont plus difficiles à atténuer.

Des études ont été menées sur les effets potentiels des champs électriques et magnétiques sur la santé humaine, en particulier sur les risques de cancer et de leucémie. Bien que les résultats de ces études soient mitigés et controversés, certains organismes ont émis des recommandations pour limiter l'exposition aux champs électriques et magnétiques, notamment en ce qui concerne l'emplacement des habitations et des établissements sensibles par rapport aux lignes électriques à haute tension.

1.5.5. Effets de champs magnétiques

Les effets du champ électromagnétique sur le corps humain dépendent de plusieurs facteurs, tels que l'intensité, la fréquence et la durée d'exposition. Les champs électromagnétiques peuvent être produits par diverses sources, telles que les lignes électriques, les appareils électroniques, les téléphones portables, les antennes relais, les fours à micro-ondes, etc.

À faible intensité, les champs électromagnétiques ne présentent généralement pas de danger pour la santé humaine. Cependant, à des niveaux d'exposition plus élevés, ils peuvent avoir des effets néfastes sur le corps. Ces effets peuvent inclure [25]:

- Des maux de tête, des étourdissements et des nausées [25].
- Des troubles du sommeil et de la concentration [25].
- Des modifications du rythme cardiaque et de la pression artérielle [25].
- Des troubles du système nerveux et du système immunitaire [25].
- Des risques accrus de cancer, notamment pour les personnes travaillant à proximité de sources de rayonnement ionisant (par exemple, les travailleurs de centrales nucléaires) [25].

Les champs électromagnétiques peuvent également avoir des effets sur le développement fœtal et sur la fertilité, bien que les preuves à cet égard soient encore limitées.

En général, il est recommandé de limiter l'exposition aux champs électromagnétiques en réduisant l'utilisation de téléphones portables et d'autres appareils électroniques, en évitant de dormir à proximité de sources de rayonnement électromagnétique, et en respectant les normes de sécurité établies par les organismes de réglementation.

1.6. Conclusion

En conclusion, les lignes aériennes et souterraines sont des composants importants des réseaux électriques modernes, mais elles peuvent également produire des champs électromagnétiques qui ont des effets potentiels sur la santé humaine et l'environnement. Les recherches continuent à étudier les effets des champs électromagnétiques sur la santé, mais en attendant, il est important de minimiser l'exposition des populations à ces champs. Les compagnies d'électricité doivent donc travailler pour concevoir et installer des réseaux électriques qui réduisent l'exposition aux champs électromagnétiques, tout en assurant une distribution fiable de l'électricité. En fin de compte, il est important de trouver un équilibre entre les avantages de l'utilisation de l'électricité et la minimisation des risques potentiels pour la santé et l'environnement.

CHAPITRE 2

Chapitre 02 : Généralité sur les systèmes HVDC

2.1. Introduction

Le High Voltage Direct Current (HVDC), ou courant continu haute tension, est une technologie de transmission d'électricité qui offre des avantages significatifs par rapport aux systèmes de transmission à courant alternatif (AC) traditionnels.

Les lignes à haute tension à courant continu (HVDC) sont une avancée de la transmission d'énergie électrique en courant continu, essentielles pour un transport efficace sur de longues distances de manière plus efficace et économique que les systèmes à courant alternatif. Conçues pour dépasser les limitations du courant alternatif (AC) largement utilisé en distribution locale, Les avantages clés des lignes HVDC sont la réduction des pertes d'énergie grâce à la conversion en tensions élevées, un contrôle précis de la puissance, l'interconnexion des réseaux électriques à des fréquences différentes, la résistance accrue aux perturbations électriques et la capacité de surmonter les obstacles géographiques tels que les transmissions sous-marines.

Les technologies HVDC ont considérablement évolué au fil du temps, et les systèmes modernes intègrent des convertisseurs électroniques hauts performance pour la conversion entre courant alternatif et courant continu, ainsi que pour le contrôle précis de la transmission. Ces lignes jouent un rôle crucial dans les réseaux électriques mondiaux en permettant un transport efficace et fiable de l'énergie sur de longues distances.

Dans ce chapitre, nous allons dans un premier temps expliquer les raisons pour lesquelles la considération des systèmes HVDC apporte un intérêt dans la transmission de puissance et ce par rapport à un transport alternatif, classiquement utilisé [12 ,13].

Nous présenterons ensuite un rappel sur les effets des champs électromagnétiques sur la santé.

2.2. Systèmes de transmission : HVAC vs HVDC

2.2.1. Système de transmission HVAC

Dans le système de transmission HVAC, l'énergie électrique est générée et transmise à l'aide des signaux de tension et de courant alternatifs.

À partir de la centrale de production, la tension est augmentée par un transformateur triphasé, qui permet la transmission de l'énergie avec des pertes de puissance moindres, puis redescendue du côté de la distribution à l'aide d'un transformateur triphasé pour les consommateurs moyenne ou basse tension [14].

2.2.2. Système de transmission HVDC

Dans une sous-station HVDC ou une sous-station de conversion, des redresseurs et des onduleurs sont placés aux deux extrémités de la ligne de transmission, comme le montre la figure 2.2. La section redresseuse convertit la tension alternative en tension continue, tandis que la section onduleur reconvertit la tension continue en tension alternative. La transmission CC est utilisée sur de longues distances car elle diminue les pertes et améliore l'efficacité globale du système. Un système composé de deux stations de conversion et d'une seule ligne de transmission est appelé « système à courant continu à deux bornes » ou « système point à point ». De même, si une sous-station a plus de deux stations de conversion et des lignes terminales CC interconnectées, elle est connue sous le nom de sous-station CC multi-terminal (Long et Nilsson). Il existe deux principaux types de dispositifs de commutation utilisés dans les convertisseurs requis pour les systèmes HVDC, à savoir les thyristors et les transistors bipolaires à grille isolée.

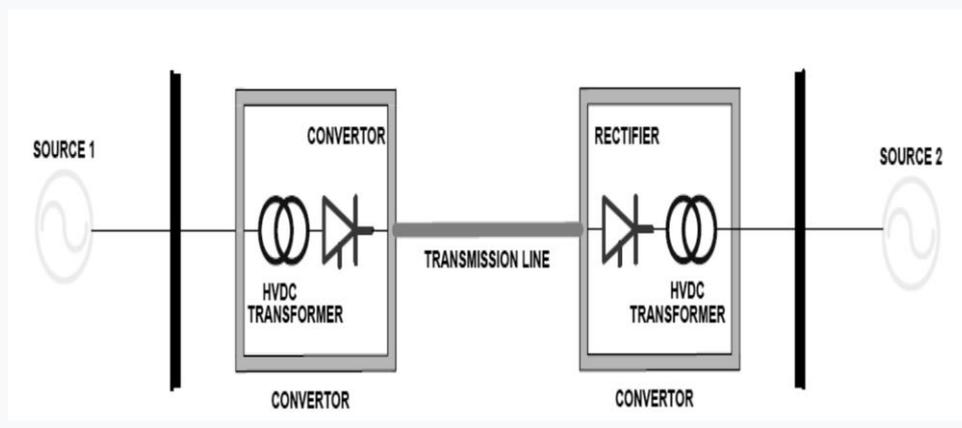


Figure 2.1: Disposition du système HVDC

2.3. Développement de la technologie HVDC

A la fin du 19^{ème} siècle, les premiers générateurs et le transport de l'énergie électrique s'effectuèrent en courant continu. Les découvertes fondamentales de Galvani, Volta, Oersted, Ohm, et Ampère ont été dans le domaine du courant continu. Le premier réseau électrique était mis en service en 1882 grâce à la découverte de Thomas Edison [15], à ce moment, le système électrique devient complet qui va de la production jusqu'à la consommation. Malgré leurs premières utilisations massives, les systèmes DC ont été très vite dépassés par les systèmes alternatifs. Leurs limitations étaient devenues de plus en plus apparentes. Les générateurs alternatifs, de part leurs souplesses d'adaptation aux niveaux de tension,

remplacèrent rapidement les générateurs à courant continu dans le domaine de la production et du transport de l'énergie électrique.

En 1889, la première ligne de transmission AC (monophasée) fonctionna en Oregon entre Willamette Falls et Portland. Ceci est rendu plus pratique grâce à l'invention du transformateur.

En 1906, la première liaison de transport en courant continu était mise en service reliant Moutiers-Lyon sur une distance de 200 Km et d'une puissance de 20 MW [16].

Le développement de la transmission HVDC remonte aux années 1930 lorsque les redresseurs à vapeur de mercure ont été inventés.

En 1939, une liaison continue de 1 MW est réalisée en Suisse par Brown Boveri utilisant des valves à vapeur de mercure. Vers 1940, AEG et Siemens réalisent une liaison de 30MW avec la même technologie. En 1941, le premier contrat pour un système de transmission HVDC a été placé; 60 MW ont été destinés à être livrés à la ville de Berlin par le biais d'un câble souterrain de 115 km de longueur. En 1945, ce système était prêt pour l'opération. Toutefois, en raison de la fin de la seconde Guerre, le système a été aplati et n'a jamais été opérationnel.

Au début des années 1950, l'évolution de l'électronique de puissance permet d'envisager à nouveau la solution du courant continu pour le transport de l'énergie électrique. Le courant alternatif des réseaux de production est transformé par les stations de conversion en courant continu pour le transport en utilisant des ponts de conversion avec valves à vapeurs de mercure ; ce développement a ouvert la voie à une première application commercialisée de la technologie HVDC en 1954. Il s'agissait d'une interconnexion reliant l'île de Gotland à la Suède sur une distance de 96 KM et d'une puissance de 20 MW [16]. À partir de ce moment, de nombreuses liaisons continues sont réalisées, en particulier la première liaison entre France et Grande-Bretagne de 160 MW en 1961. Le succès de la nouvelle technologie a immédiatement déclenché des recherches et développement valves à vapeur de mercure. Depuis 1965, le développement des thyristors par General Electric améliora la transmission HVDC et augmenta la compétitivité des systèmes HVDC, et plusieurs compagnies adoptèrent cette technologie. De grands projets ont été réalisés dans le monde entier, tels que [16-18]:

- ❖ En 1954, le premier projet HVDC dans le monde entra en service à Gotland (suède), Il servit au transfert de 20 mégawatts sur un câble sous-marin de 96 km de long reliant Vaestervik et Yigne à Gotland avec une tension de ± 100 kV.
- ❖ En 1965, projet Cahora Bassa (1920 MW) reliant Mozambique à l'Afrique du Sud sur une distance de 1360 km.

- ❖ En 1967, projet de Sardinia (Italie) (200 MW , 413 km, 200 kV) ;
- ❖ En 1982, projet de 560 MW (± 500 kV) reliant Inga à Shaba (République démocratique Congo) sur une distance 1700 km.
- ❖ En 1984, projet 2000 MW (500 kV):Pacific Intertie-Upgrade (USA).
- ❖ En 1986, le grand projet sous-marin IFA2000 (20 00 MW, ± 270 kV) entre la France et L'Angleterre reliant les Mandarins et Sellindge sur une distance de 73km.
- ❖ En 1987 projet de Itaipu 2 (Brésil) : 3150 MW (± 600 kV).
- ❖ En 1989 projet de 600 MW (500 kV) :Geshouba-Shanghai(China) sur une distance de 1000 km.
- ❖ En 1991 projet de 750 MW (300 kV) reliant Rihand –Delhi (Inde) sur une distance de 910 km.
- ❖ En 1992 (2001) projet : de 1854 MW (± 463 kV) de Nelson River I (USA).
- ❖ En 1993 projet de 300 MW (300 kV) reliant Thailand –Malysia sur une distance de 110 km.
- ❖ En 1994, projet de 600MW (± 450 kV) : cable de Baltic.
- ❖ En 2001, projet de 500 MW (400 kV) reliant Italy- Grèce sur une distance de 160 km ;
- ❖ En 2000, projet de 1400MW (± 250 kV) : Kii Channel (Japan).
- ❖ En 2002 projet de Garabi 2(Brésil) 2000 MW (± 70 kV).
- ❖ En 2004 projet de 3000 MW (± 500 kV) : Three Gorges-Guangdong (China) sur une distance de 940 km.
- ❖ En 2004, projet de 3100 MW (± 500 kV) : Pacific Intertie-Sylmar (USA).
- ❖ En 2005, projet de 500 MW (400 kV) : Iceland –UK 2005.
- ❖ En 2009 projet de 2500 MW (500 kV) reliant : Ballia-Bhiwadi (Inde) sur une distance de 780 km.
- ❖ En 2010 projet de 6400 MW (800 kV) reliant : Xianjiaba - Shanghai (Chine) sur une
- ❖ distance de 2071 km.



Figure 2.2: Poste de Sellinge de la liaison IFA 2000 MW



Figure 2.3: Poste Les Mandarins de la liaison IFA 2000 MW

2.4. Les avantages du transport d'énergie en technique HVDC

Lors de l'interconnexion de différentes sources, certains problèmes techniques apparaissent, tels que : le problème de synchronisme, de déphasage et de stabilité. Une transmission HVDC permet d'éviter certaines limitations et inconvénients des transmissions en courant alternatif. En effet, les principaux avantages des systèmes HVDC peuvent être répertoriés de la manière suivante :

- ❖ Interconnexion des réseaux asynchrones.
- ❖ La transmission HVDC est plus efficace économiquement et techniquement pour le transport électrique sur de longues liaisons. Le coût d'une transmission HVDC est plus

faible que celui d'une transmission AC pour des distances supérieures à 600 km pour les lignes aériennes et 50 km pour les liaisons par câble (voir figure (2.3) [16-18].

- ❖ Commande très rapide du flux de puissance, qui implique des améliorations de stabilité, non seulement pour les liaisons de HVDC mais également pour le système HVAC [17-19].
- ❖ Pas de limite technique à la longueur de la ligne ou de câble relativement à une ligne à courant alternatif.
- ❖ Retour à la terre peut être utilisé.
- ❖ Pas d'effet de peau.
- ❖ Limitation de la propagation des perturbations entre les réseaux.
- ❖ Aucune exigence de fonctionnement en synchronisme des systèmes HVDC.
- ❖ Réduction du couloir de servitude et donc minimisation des droits de passage.
- ❖ Préserve la gestion indépendante de la fréquence et du contrôle du générateur.
- ❖ La direction du flux de puissance peut être changée très rapidement (Bidirectionnalité).
- ❖ L'échange de puissance en courant alternatif est imposé par la réactance de la ligne et le déphasage des tensions, par contre ces derniers n'interviennent pas dans le transport HVDC, seule la résistance et les tensions des deux extrémités déterminent la puissance transitée [19].
- ❖ Nombre de conducteur réduit.
- ❖ La faisabilité de modulation rapide de la puissance peut être exploitée pour amortir les oscillations de réseau alternatif [16,19].
- ❖ Le transport d'énergie en continu HVDC peut porter plus de puissance pour une taille indiquée de conducteur, sa capacité est en effet 2 à 5 fois celle d'une ligne AC de même niveau de tension [20].
- ❖ Limitation des courants de défauts par blocage des valves.
- ❖ Suppression du problème de puissance réactive.
- ❖ Faisabilité d'échange de puissance entre deux réseaux fonctionnant avec tension et fréquences différentes par des convertisseurs dos à dos.
- ❖ Les perturbations électromagnétiques sont réduites du fait du champ électromagnétique quasi constant [19,21].
- ❖ Les pertes sont plus faibles en HVDC qu'en HVAC [15,16,22].

- ❖ La compensation d'énergie est réduite.
- ❖ Un lien de HVDC n'augmente pas la puissance de court-circuit dans le point de raccordement; ceci signifie qu'il n'est pas nécessaire de changer les disjoncteurs dans le réseau existant [12,18].
- ❖ La technologie de VSC laisse commander la puissance active et réactive indépendamment sans compensateur supplémentaire.
- ❖ Les pertes par effet couronne sont réduites.
- ❖ Les transmissions HVDC ont un taux élevé de disponibilité et de fiabilité, montrés par plus de 50 années d'opération.

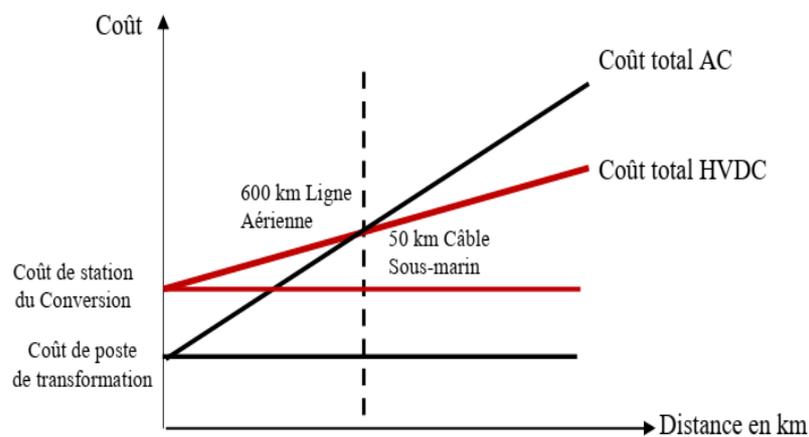


Figure 2.4: Comparaison économique entre le transport en HVCA et HVDC [17,18,23].

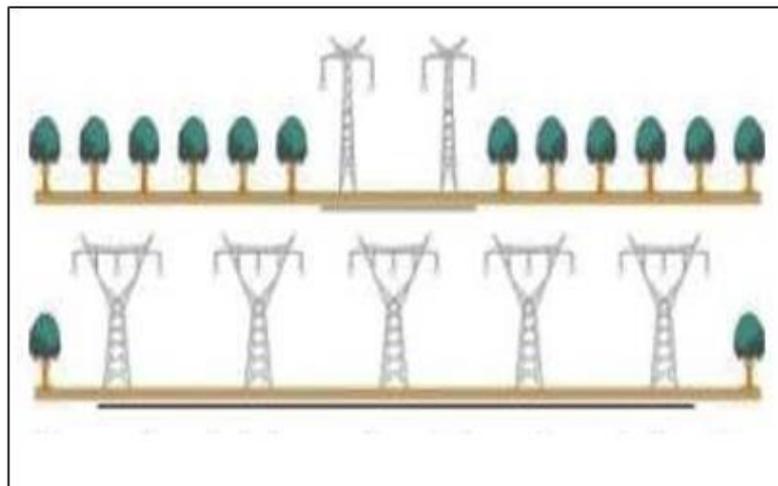


Figure 2.5: Comparaison de la largeur du couloir requis par les deux lignes HVDC 500 kV Three Gorges - Shanghai et par les lignes HVAC ayant la même capacité de transport [20].

2.5. Les inconvénients du transport d'énergie en technique HVDC

Malgré les nombreux avantages de la transmission HVDC, des inconvénients majeurs doivent être signalés, tels que [17,18,23]:

- ❖ Le coût élevé des stations de conversion.

- ❖ La génération des harmoniques.
- ❖ Difficultés de changement des niveaux de tension.
- ❖ Difficultés de contrôle.
- ❖ Convertisseurs exigent beaucoup de puissance réactive.
- ❖ Fonctionnement très difficiles des réseaux multi terminales.
- ❖ Difficulté de coupure de courant continu.
- ❖ Difficultés d'injection (piqûres).
- ❖ Bruit généré par les stations de conversion [19].

2.6. Domaine d'utilisation des systèmes HVDC

A travers les avantages et les inconvénients décrits dans les sections précédentes, nous pouvons conclure les domaines d'utilisation des transmissions HVDC comme suit [16-19]:

- ❖ Interconnexions asynchrones.
- ❖ Longues liaisons souterraines et sous-marines.
- ❖ Lignes aériennes de grandes longueurs.
- ❖ Interconnexions transfrontalières.
- ❖ Contrôle de transit et maîtrise de la stabilité.

2.7. Principe de fonctionnement d'un système transport HVDC

Un système de transport à HVDC, est constitué de deux convertisseurs, le premier convertisseur est un redresseur en pont triphasé convertissant la puissance alternative du réseau alternatif 1 en puissance continue. Celle-ci est transportée sur une ligne composée de deux conducteurs et reconvertie en puissance alternative par le convertisseur 2 (onduleur) [19]. Le schéma de principe de la transmission HVDC est montré par la figure 2.6 avec :

- E_{d1} et E_{d2} tensions de ligne.
- $-\alpha, \beta$: angles d'amorçage des convertisseurs 1 et 2 respectivement.

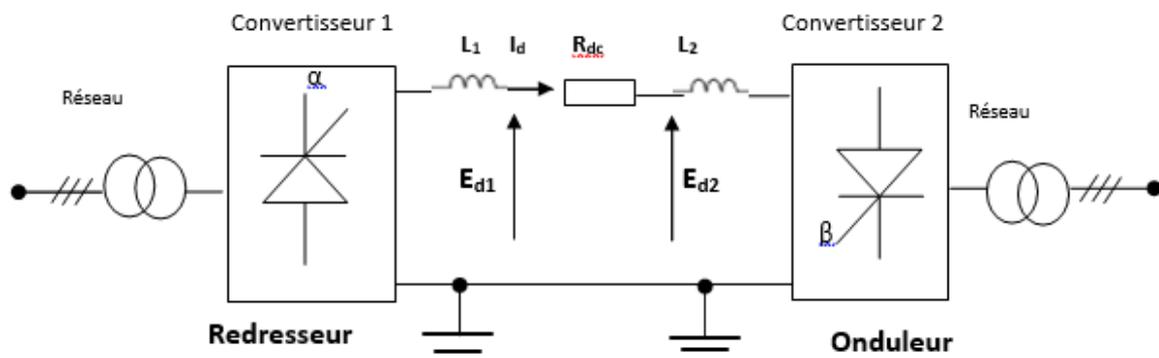


Figure 2.6: Schéma de principe du système HVDC

2.8. COMPOSITION DU SYSTEME HVDC

Un système HVDC est un équipement d'électronique de puissance utilisé pour la

transmission de l'électricité en courant continu en haute tension. Les éléments essentiels constituant un système HVDC sont :

- Les stations de conversion (redresseur et onduleur);
- Ligne HVDC ;
- Les inductances de lissage L_1 et L_2 .
- Les filtres des harmoniques de cotés alternatifs et continus F_{AC} et F_{DC} .
- Les transformateurs.
- Les sources de puissance réactives.
- Les électrodes de la mise à la terre.
- Une liaison par fibres optiques ou micro-ondes entre les postes de conversions [19,24].
- Systèmes de contrôle et de protection.
- Services auxiliaires.

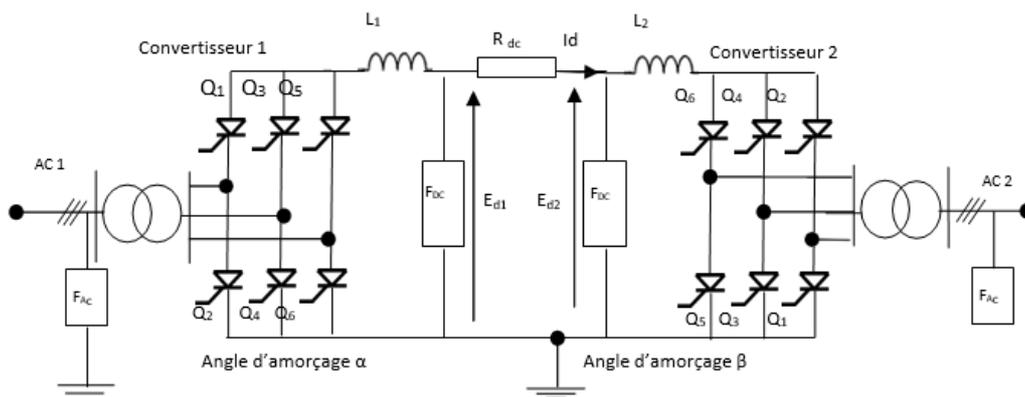


Figure 2.7: Diagramme schématique d'un système HVDC reliant deux réseaux AC

2.9. Types des liaisons HVDC

Plusieurs types de liaison HVDC sont développés dans les différentes applications de la transmission HVDC [17,24,23] :

- ❖ Liaison mono polaire.
- ❖ Liaison bipolaire.
- ❖ Liaison homopolaire.
- ❖ Liaison dos à dos "back-to-back".
- ❖ Liaison à deux terminaux.
- ❖ Liaisons multi terminaux.

2.10. Effet des champs électromagnétiques sur la santé et l'environnement

Les effets des champs électromagnétiques (CEM) sur la santé humaine et sur

l'environnement sont des sujets de débat et de recherche complexes. Les champs électromagnétiques se produisent naturellement (par exemple, la lumière du soleil) et sont également générés par les activités humaines, notamment les lignes électriques, les appareils électroniques, les antennes de télécommunication et les technologies sans fil. Les deux principaux types de champs électromagnétiques sont les champs électriques et magnétiques [25].

Quelques recherches réalisées suggèrent l'existence d'une corrélation entre l'exposition au champ électromagnétique et la santé humaine, et plus en particulier en ce qui concerne la leucémie chez l'enfant, et la leucémie et le cancer du cerveau chez les travailleurs des métiers de l'électricité [25].

En 1979, deux chercheurs américains, Nancy Wertheimer et Ed Leeper, ont voulu tirer la question des champs électromagnétiques émis par les lignes à haute tension au clair en effectuant une étude sur leurs effets et une possible incidence de cancers chez les gens qui y sont exposés régulièrement. Alors, y a-t-il un réel danger ou se laisse-t-on influencer par le sentiment d'inconfort que suscitent les installations électriques? [25].

La publication de Nancy Wertheimer, de très nombreuses études ont été menées sur les effets sanitaires des champs électromagnétiques : les cancers, des anomalies de la reproduction, les maladies cardiovasculaires, neuro dégénératives ou des troubles comme des problèmes de sommeil, les céphalées...[25].

2.10.1. Effets à court terme.

Lorsque le corps humain est exposé aux champs électriques, les champs électriques externes induisent à la surface du corps exposé une charge superficielle. Ce phénomène se traduit à l'intérieur du corps par l'apparition de courants, nécessaires pour déplacer les charges électriques à la surface du corps. Lorsque le corps humain est exposé aux champs magnétiques alternatifs, l'interaction physique champs magnétiques 50 Hz – corps humain crée des champs électriques induits, et provoque un courant induit à l'intérieur du corps humain.

L'exposition à un champ électrique peut amener les sujets exposés à percevoir ce champ, du fait de la vibration des poils provoqués par la charge électrique alternative induite à la surface du corps. La plupart des gens sont capables de percevoir des champs électriques de 50/60 Hz d'intensité supérieure à 20 kV.m⁻¹ et seule une infime minorité peut percevoir des champs d'intensité inférieure à 5 kV.m⁻¹ [25].

Les courants induits par des champs magnétiques alternatifs (pour les valeurs d'exposition usuellement rencontrées) sont de faible intensité et ne sont pas perceptibles. Par contre, l'exposition à des champs magnétiques intenses peut provoquer des perceptions immédiates. Les seuils de perception en fonction de la densité de courant induit, et en fonction de champs magnétiques retenus par l'OMS se trouvent dans le tableau 2.1. L'exposition à des champs électriques et magnétiques combinés de 60 Hz (9 kV.m-1, 20 µT) provoque une légère modification de la fonction cardiaque. Au repos, le rythme cardiaque était légèrement mais significativement réduit (de 3 à 5 battements par minute) pendant ou immédiatement après l'exposition. Mais cette réaction n'était pas observée lors de l'exposition à des champs plus forts (12 kV.m-1, 30 µT) ou plus faible (6 kV.m-1, 10 µT) [25].

2.10.2. Effets à long terme

Depuis environ 30 ans (la publication scientifique plus ancienne que nous avons trouvée date de 1979) [26] les effets à long terme des champs électromagnétiques sur la santé font l'objet de nombreuses recherches. La question posée de manière récurrente est :

« Le champ électromagnétique est – il un agent cancérigène ? ». Les études menées jusqu'à présent peuvent se classer en deux catégories principales : études épidémiologiques chez l'homme, et études d'exposition de longue durée chez l'animal.

Les études épidémiologiques chez l'homme sont effectuées sur des groupes des personnes qui, par leur travail ou par leur habitude de vie, sont exposés à des niveaux similaires de champ. Les taux de cancer de ces groupes sont comparés entre eux, ou avec un groupe de référence (le témoin). L'intérêt de ces études est d'analyser des populations dans les conditions de vie réelles. En revanche, dans ce type d'étude, il est impossible de maîtriser l'exposition aux champs électromagnétiques sur une longue période. De plus, il est également impossible de séparer les effets reproductibles aux seuls champs, des effets de tout autre facteur auxquels la population est exposée dans la vie courante, comme des facteurs familiaux (hérédité génétique...), l'habitude de vie (régime alimentaire, tabagisme, ...) et d'autres facteurs liés à l'environnement (pollution, utilisation de produits chimiques ...)[25].

Les études de longue durée chez l'animal sont effectuées sur des animaux en laboratoire. Dans ce cas, on peut contrôler parfaitement les niveaux d'exposition, et minimiser tout autre « facteur de perturbation » qui pourrait jouer un rôle dans le développement de cancers. Cependant, il est impossible de transposer directement à l'homme les résultats obtenus chez les animaux ; mais, ces études nous donnent des idées sur l'interaction entre « matière vivante » et les champs électromagnétiques.

Tableau 2.1: Le seuil de perception du champ magnétique. [25]

Champ magnétique (50/60HZ)(mT)	Densité de courant induit (Ma/ m ²)	Le seuil de perception
0.5-5	1-10	Effets biologiques mineurs
5-50	10-100	Effets bien établis sur le système nerveux et la vision.
50-500	100-1000	Stimulation des tissus excitables et des dommages possibles sur la santé.
>500	>1000	Fibrillation ventriculaire et des extrasystoles-effets aigus.

2.10.3. Quelques études sur l'effet des champs électromagnétiques sur la santé et l'environnement

Les champs électromagnétiques ont de nombreux effets biologiques connus.

a. *Leucémies infantiles*

Le centre international de recherche sur le cancer (Lyon) reconnaît, dans le cadre du programme de recherche de l'OMS, un risque multiplié par deux des leucémies infantiles parmi les enfants exposés à des champs magnétiques d'au moins 0,4 μ T.

b. *Cancer du sein*

Une étude suédoise de 1998 [26] démontre que, chez les femmes réceptives positives aux œstrogènes, le risque de cancer du sein avant 50 ans est 7,4 fois plus élevé en cas d'exposition à des champs magnétiques d'extrêmement basses fréquences.

c. *Lignes haute tension et cancers*

(ACI Multimédia BIO & ECOLOGIE...) Des études récentes, effectuées au USA et en Suède, révèlent que les cas de cancer sont deux fois plus élevés dans les foyers proches de lignes H.T. que dans les autres. Dans la région de Stockholm, "3% des cancéreux habitent à moins de 150 m d'une ligne à 200.000 volts", alors que 1,3% seulement de la population vit à proximité de telles lignes.

On est maintenant certains qu'il y a un rapport indéniable entre le déclenchement de certains types de cancers et les champs électriques à basses fréquences.

On a remarqué "que ces rayonnements changeaient la façon dont les tissus du cerveau produisent du calcium... qu'ils accélèrent la sécrétion d'une enzyme particulière, qui favorise le développement des tumeurs lorsqu'elles sont déjà formées". Aux USA, W. ROSS ADEY, président du Conseil National américain de Protection contre les radiations non ionisantes (NCRP) a déclaré « les études indiquent une conjonction entre les actions des promoteurs

chimiques de cancers et les CEM au niveau de la membrane cellulaire comme une étape clef dans la formation des tumeurs » [27]

d. Champs magnétiques et cancer chez l'enfant

Le cancer chez l'enfant est une maladie très grave et particulièrement difficile à accepter. D'une manière générale, le cancer évolue plus rapidement chez l'enfant, en raison du taux de division cellulaire, qui est plus élevé que chez les personnes adultes. Plusieurs facteurs sont considérés comme étant à l'origine de cette maladie : anomalies génétiques, certains rétrovirus, produits chimiques, pollution... Certaines hypothèses suggèrent l'existence d'une association entre le champ magnétique et le cancer chez l'enfant, et en particulier certaines formes de leucémie, qui sont parmi les cancers les plus fréquents chez l'enfant [27].

Les effets de l'exposition aux champs sur le risque de cancer du cerveau chez l'enfant ont été aussi étudiés (tableau 2.2). Dans les recherches de Wertheimer N. et Leeper E. [27], de Savitz et ses collègues, l'approche « wire codes » a été utilisée. Ces recherches mettent en évidence une relation entre cancer de cerveau et intensité du champ électromagnétique : selon les auteurs, pour les enfants vivant dans des habitations en des zones à haute densité des lignes électriques, le risque de mort par le cancer du cerveau est beaucoup plus important, par rapport à des enfants vivant dans des zones à faible densité des lignes électriques. En particulier, dans le travail de Wertheimer et Leeper, on trouve un risque relatif : (RR) = 2,4 (95% IC 1,0 – 5,4) et dans celui de Savitz : RR = 2,0 (95% CI 1,1 – 3,8). Parallèlement, des études épidémiologiques basées sur de vraies mesures de champ magnétique dans les habitations, ont été réalisés par Susan Preston – Martin et ses collègues et par Tynes et Haldorsen. Sur la base de ces résultats, on ne peut pas établir une relation entre le cancer du cerveau chez l'enfant et les champs magnétiques basse fréquence [25].

Tableau 2.2: Résultats résumés pour les effets à long terme chez l'enfant.

Auteurs	Méthodes	Cancer de cerveau	Leucémie
M.S. Linet [LHK97]	2		-
M.L. McBride [MGT99]	2		-
The Lancet [LAN99]	2		-
N. Wertheimer [WL79]	Wire code	+	
D A. Savitz [SWBJ88]	Wire code	+	
S. Preston – Martin [PGPH96]	Mesure in situ	-	
T. Tynes [TH97]	Mesure in situ	-	

e. Etudes expérimentales chez l'animal.

Des études expérimentales ont été effectuées sur des rats, afin de mettre en évidence un éventuel effet cancérigène des champs électromagnétiques. Ces études se déroulent dans des laboratoires, et donc on peut bien contrôler le niveau d'exposition (temps et intensité) des animaux, et surtout on peut minimiser l'effet d'éventuels agents cancérigènes. Cependant, les résultats de ces études ne peuvent pas être transposés directement chez l'homme.

Les chercheurs canadiens de l'Institut Armand – Frappier au Québec (Canada) ont fait des essais avec quatre groupes de rats femelles, qui ont été exposés 20 heures par jour et pendant toute leur vie à un champ magnétique sinusoïdal de 60 Hz de 2, 20, 200 et 2000 μT [25]. Ces groupes ont été comparés avec un groupe de référence vivant dans la même condition de vie dans le laboratoire, mais qui n'était pas exposé au champ magnétique. Après analyse et comparaison des résultats, aucune augmentation de cancers n'a été trouvée chez les populations exposées. D'autres études similaires réalisées indépendamment par une équipe japonaise n'ont pas observé non plus d'augmentation de tumeurs chez les animaux exposés, comparativement aux animaux témoins [25].

2.9. Conclusion

En conclusion, le HVDC est une technologie de transmission d'électricité prometteuse offrant des avantages significatifs en termes d'efficacité énergétique, d'intégration des énergies renouvelables et de flexibilité du réseau électrique. Son adoption croissante dans le monde entier témoigne de son rôle clé dans la transition énergétique vers un système électrique. L'intégration des énergies renouvelables dans les réseaux électriques est un défi majeur pour assurer une transition énergétique vers un système plus durable et moins dépendant des combustibles fossiles. La technologie HVDC joue un rôle crucial dans cette intégration en permettant le transport efficace de l'énergie renouvelable sur de longues distances.

CHAPITRE 3

Chapitre 03 : Résultats et discussion

3.1. Introduction

Il est vrai que la détermination de la distribution du champ électrique et du potentiel électrique dans les systèmes haute-tension est un problème complexe. Cela est dû à plusieurs facteurs, notamment la forme irrégulière des diélectriques, les géométries complexes des équipements et des structures électriques, ainsi que la nécessité de prendre en compte les interactions électromagnétiques entre les différents composants du système.

Les influences des champs électriques et magnétiques produits par les équipements haute tension, tels que les lignes aériennes à haute tension, sur l'environnement sont en effet bien connues et étudiées depuis de nombreuses années. Ces influences peuvent avoir des effets sur la santé humaine, la faune, la flore et l'environnement en général. C'est pourquoi il est essentiel d'évaluer avec précision l'impact environnemental de ces champs électromagnétiques [28-30]

L'évaluation précise de l'impact environnemental des champs électromagnétiques est très importante. Il devient un souci important dans les dernières années. Les méthodes comportent, principalement, des calculs analytiques et expérimentaux, ainsi que des calculs numériques.

L'augmentation de la population humaine et la demande croissante en énergie électrique ont conduit à la construction de lignes de transport haute tension à proximité de zones densément peuplées. Cela a suscité des préoccupations accrues concernant les impacts sur la santé et l'environnement. Par conséquent, la recherche continue dans ce domaine est essentielle pour mieux comprendre ces impacts, développer des normes de sécurité et de conception appropriées, et prendre des mesures pour minimiser les risques potentiels pour la santé et l'environnement.

L'objectif fondamental de cette recherche est de calculer le potentiel électrique statique ainsi que le champ électrique et magnétique statique autour et sous la ligne de transmission DC \pm 500 kV HVDC. Le calcul et l'analyse des champs électriques et magnétiques provoqués par les lignes de transmission aériennes à haute tension en courant continu en présence du corps humain sont essentiels pour déterminer les effets biophysiques et assurer la sécurité publique à proximité de la ligne de transmission. Les caractéristiques fondamentales de ce champ donné dépendent principalement du niveau de tension de transmission, du courant et de la position des conducteurs de la ligne de transmission.

3.2. Type des méthodes de calculs

Les méthodes d'évaluation de l'impact environnemental des champs électromagnétiques incluent généralement :

- a. Calculs analytiques :* Ces calculs sont basés sur des modèles mathématiques qui tentent de représenter le comportement des champs électriques et magnétiques dans un environnement donné. Ils peuvent être utiles pour des situations simples ou des configurations standard.
- b. Calculs expérimentaux :* Des expériences sur le terrain sont menées pour mesurer directement les niveaux de champs électromagnétiques dans différentes conditions et à différents endroits. Cela permet d'obtenir des données réelles pour évaluer l'impact.
- c. Calculs numériques :* Les simulations par ordinateur utilisant des méthodes numériques, telles que la méthode des éléments finis, sont couramment utilisées pour modéliser avec précision la distribution des champs électromagnétiques dans des environnements complexes. Ces simulations tiennent compte de la géométrie, des propriétés des matériaux et des conditions d'exploitation spécifiques.

3.3. Modélisation en électromagnétique avec COMSOL 2D

3.3.1. Introduction sur le programme COMSOL MULTIPHYSIQUES

Les simulations bidimensionnelles ont été réalisées avec le logiciel COMSOL MULTIPHYSIQUES. V.5.6, qu'est un logiciel commercial utilisé pour les simulations bidimensionnelles et tridimensionnelles. Il offre les mêmes possibilités de modélisation et aussi basé sur la formulation indirecte de la Méthode d'Élément Finis. Ce logiciel permet de simuler des nombreuses physiques et applications en ingénierie, et tout particulièrement les phénomènes couplés ou simulation multi-physiques.

3.3.2. Méthode des éléments finis (MEF)

La Méthode des Éléments Finis (MEF) est une technique numérique utilisée pour résoudre des équations aux dérivées partielles (EDP) qui décrivent le comportement de systèmes physiques complexes. Elle est couramment employée en ingénierie, en sciences de la physique, et dans de nombreux autres domaines pour résoudre une variété de problèmes liés à la mécanique des solides, la thermodynamique, l'électromagnétisme, la fluide dynamique, et bien d'autres.

3.3.3. Étapes de la Méthode des éléments finis

L'application de la MEF à un problème revient à suivre les étapes successives explicitées comme suit :

- Discrétisation du domaine ;
- Formulation intégrale des équations différentielles partielles ;
- Choix des fonctions d'interpolation ;
- Formation des matrices et vecteurs élémentaires ;
- Assemblage ;
- Résolution du système algébrique globale.

Actuellement, il existe différents logiciels qui utilisent cette méthode comme le FEMLAB, Maxwell, Flux2D et FEMM. Dans la suite de ce travail, nous avons utilisé le logiciel COMSOL Multiphysics version 5.6. Les étapes de résolution peuvent être résumées selon l'organigramme montré dans la figure 3.1.

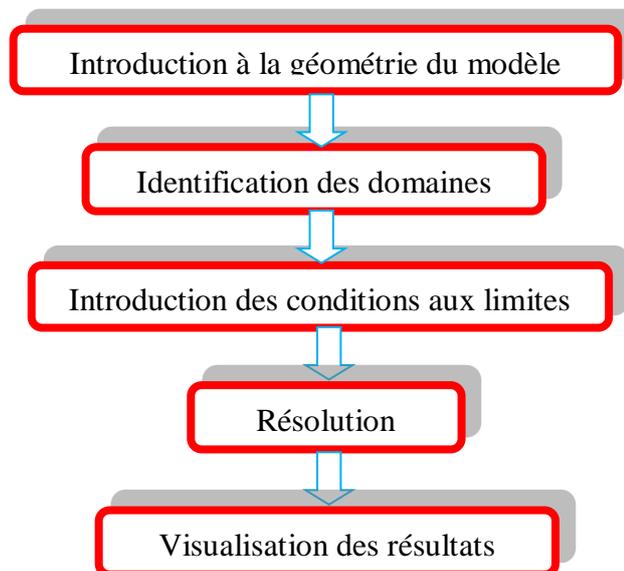


Figure 3.1: Diagramme de différentes étapes de résolution

Dans la modélisation et la simulation d'une ligne électrique aérienne avec et sans le corps humain se résumer en cinq étapes successives suivantes :

a. Première étape

La première étape consiste à définir la géométrie entière de la ligne électrique (figure.3.2).

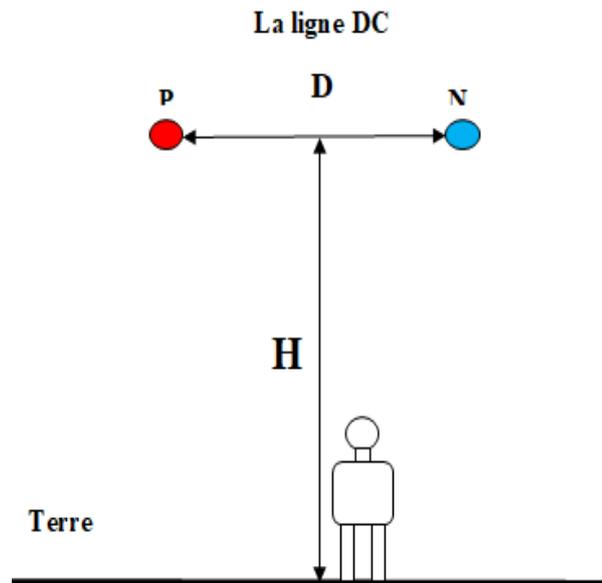


Figure 3.2: Modèle géométrique de la ligne électrique.

b. Deuxième étape (définis les matériaux)

La deuxième étape porte sur la définition des propriétés électriques des matériaux présents. Cela consiste à définir les permittivités relatives ordinaires et les conductivités volumiques.

- Ligne électrique

Une fois que les données nécessaires aux modèles de la ligne électrique sont résumées dans le tableau 3.1 On peut lancer la simulation.

Tableau 3.1: Caractéristique de la ligne électrique.

Domaine	Constante diélectrique relative ϵ_r	Conductivité σ . [S/m]
Conducteur (Aluminium)	1	3.774e7
Air	1	0

- Modèle du corps humain

Le modèle du corps humain sous la ligne de transmission haute tension est conçu pour analyser les effets du champ électromagnétique sous la transmission haute tension et pour appliquer la méthode des éléments finis à l'aide du logiciel COMSOL Multiphysics pour simuler la distribution du champ électrique sous la ligne de transmission HVDC de ± 500 kV avec le modèle du corps humain est mis à la terre.

Le corps humain est traité comme un corps conducteur en raison de la grande conductivité et de la grande permittivité relative. Pour cette raison, le modèle du corps humain est divisé en blocs en plusieurs parties qui sont la tête, le foie et les jambes, comme le montre la figure 3.3.

La détermination de ces propriétés électriques pour chaque tissu est un problème difficile, à cause de la difficulté pour obtenir des « échantillons », mais aussi car ces caractéristiques varient entre un individu et l'autre. De plus, la matière biologique se dégrade rapidement après la mort [31].

Dans le cadre de ce travail, nous n'étudierons que des phénomènes induits dans le corps humain à l'exposition des champs électromagnétiques de la fréquence industrielle de 50 Hz.

Des exemples de permittivité et conductivité que nous avons utilisées sont reportées dans le tableau 3.2.

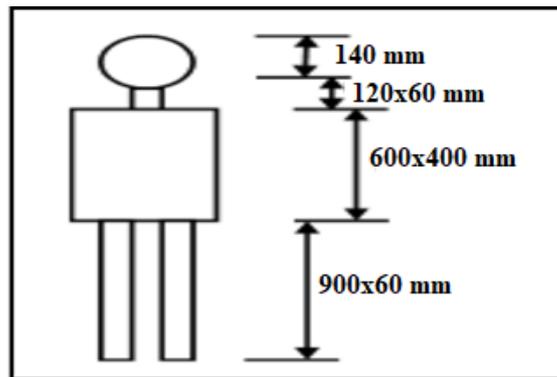


Figure 3.3: Modèle géométrique du corps humain, composé de trois matériaux: Os, Foie et Muscle.

Tableau 32: Propriétés électriques de certains tissus humains à 50 Hz [31]

Tissus	Conductivité [S/m]	Permittivité relative
Estomac	0.521	1.6372e+06
Muscle	0.23329	1.7719e+07
Reins	0.089239	1.0115e+07
Foie	0.0367	1.8317e+06
Cœur	0.0827	8.6646e+06
Cerveau	0.0533	5.2898e+06
Os	0.0504	8867.8
Poumons	0.0684	5.7589e+06

De plus, il faut définir les conditions aux limites qui se traduisent par le potentiel imposé sur chaque électrode (conditions de Neumann).

Supposons que le domaine de résolution soit suffisamment grand pour que le terme $n \cdot E_{\text{air}}$ soit négligeable à la frontière du domaine de résolution (figure 3.4) :

$$n \cdot E_{\text{air}} = 0 \text{ à la frontière}$$

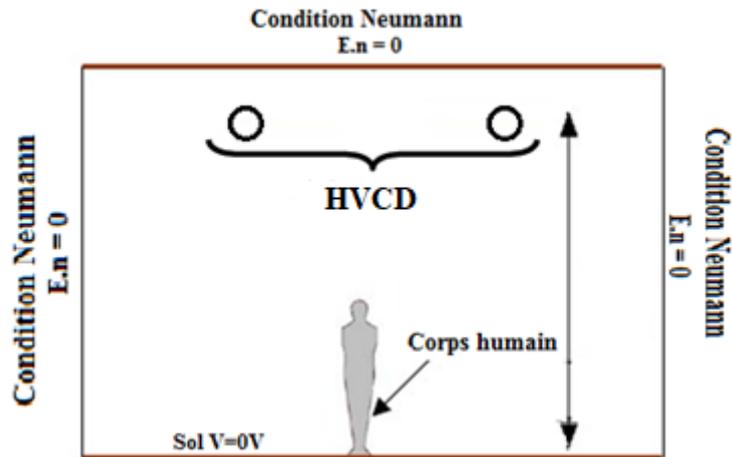


Figure 3.4: Simulation simplifiée en 2D et les conditions limites.

c. Troisième étape (maillage et l'étude)

La troisième étape porte sur la définition du maillage qui consiste à discrétiser les différentes interfaces entre les matériaux en éléments finis. Le maillage se fait automatiquement ou manuellement comme montre dans la figure 3.5.

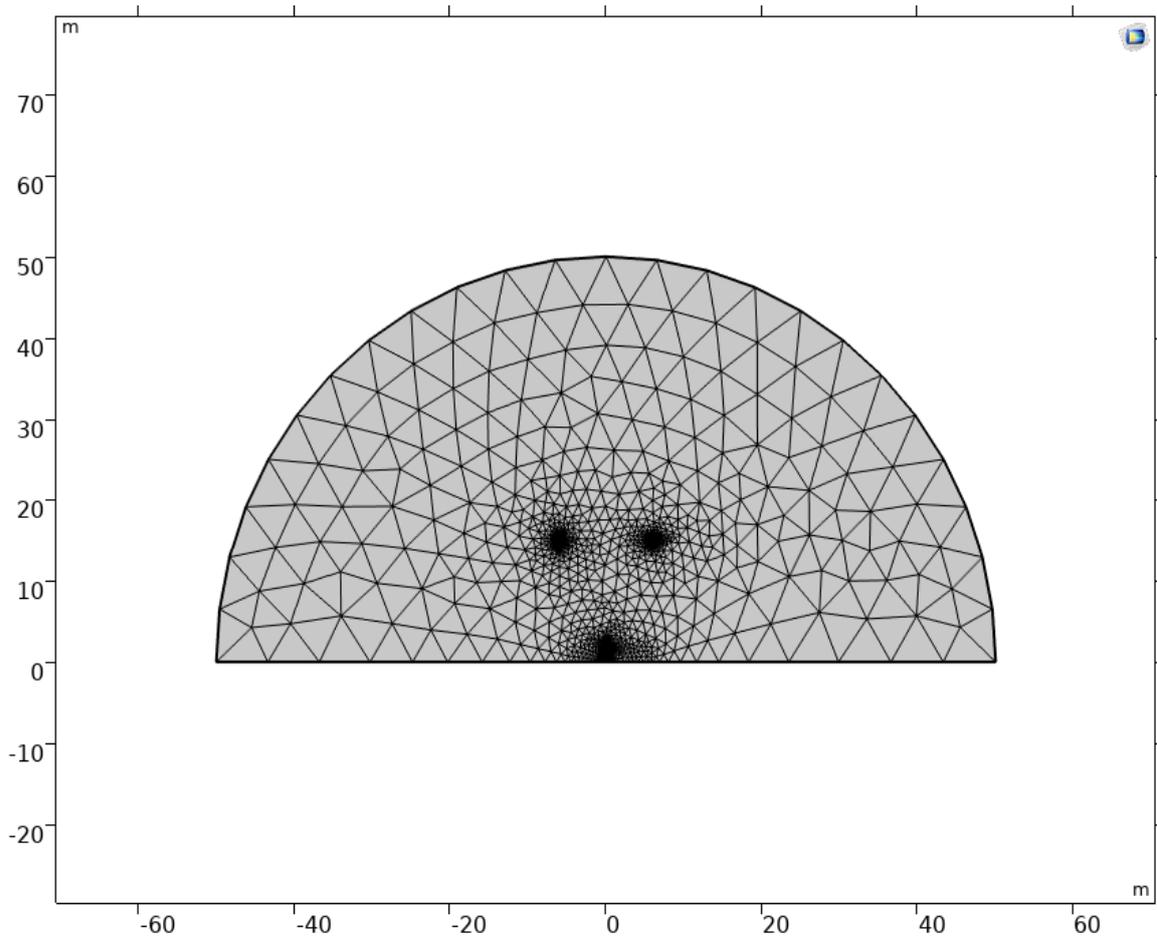


Figure 3.5: Maillages électrique avec corps humain.

d. La quatrième étape

La quatrième étape consiste à la résolution du problème par l'application de la méthode numérique et par la construction du système d'équations [32].

Suivant la taille du problème, on peut choisir de résoudre le système d'équations soit directement pour un faible nombre d'inconnues ou soit itérativement pour des problèmes de grande taille.

e. La cinquième étape

La dernière étape consiste à l'affichage des résultats comme le champ électrique, et champ magnétique suivant que l'on travaille en statique ou quasi-statique, leur module, leur partie réelle ou imaginaire ainsi que les composantes normales et tangentielles du champ électrique [32,33].

3.4. Résultats et analyse de la simulation

La ligne aérienne étudiée est une ligne de transmission HVDC ± 500 kV. Nous avons procédé dans le cadre de ce travail à des calculs effectués sur une ligne HVDC aérienne avec corps humain. Le calcul du champ électrique et magnétique dans notre étude est effectué à une hauteur de 1.75 m au-dessus de sol.

3.4.1. Simulation du modèle proposé

La simulation du modèle proposé de ligne de transmission à travers le corps humain a été réalisée dans COMSOL-Multiphysics version 5.6. La géométrie du modèle est préparée en 2D. Dans celui-ci, la hauteur du corps humain est spécifiée à 1,75 mètre, et la hauteur du conducteur de la ligne de transmission est de 15 mètres au-dessus du sol. Le diamètre du conducteur est de 42,10 mm. De plus, les conditions aux limites physiques sont définies, telles qu'une demi-circonférence de rayon 50 mètres. La densité de flux magnétique et le potentiel électrique ont été calculés et étudiés pour différentes hauteurs par rapport au sol. De plus, l'orientation et la variation desdits paramètres ont été déterminées à l'aide de la méthode des éléments finis (FEM).

La simulation se concentre sur la hauteur par rapport à la taille humaine et vise à étudier les problèmes de santé humaine liés à des expositions importantes aux champs électriques et magnétiques statiques. Le logiciel utilisé pour cette simulation est COMSOL, qui se base sur la méthode des éléments finis (FEM). La solution de l'équation aux dérivées partielles est également basée sur la FEM, car le solveur COMSOL ne peut pas résoudre directement cette équation en raison de sa complexité. Les équations fondamentales de Maxwell sont utilisées

pour calculer le champ électrique statique, le potentiel électrique et la densité de flux magnétique statique dans cette simulation [34].

$$\nabla \cdot D = \rho_v \quad (1)$$

$$E = \nabla \cdot D \quad (2)$$

$$\nabla \cdot (\epsilon_0 \epsilon_r E) = \rho_v \quad (3)$$

$$n \cdot D = 0 \quad (4)$$

Pour la modélisation magnétique utilisant la loi d'Ampère sera :

$$\nabla \times H = J \quad (5)$$

$$B = \nabla \times A \quad (6)$$

$$J = \sigma E \quad (7)$$

$$J = \sigma E + \sigma v \times B + J_e \quad (8)$$

$$n \times A = 0 \quad (9)$$

Les équations 4 et 9 définissent les conditions aux limites des champs électriques et magnétiques statiques. L'équation pour le champ électromagnétique statique dans le corps humain est obtenue en résolvant les équations de Maxwell, en prenant en compte le couplage entre le champ électrique (E) et le champ magnétique (H). Cela conduit à l'expression mathématique permettant de calculer le champ électromagnétique dans le corps humain [34].

$$\text{div} D = \rho \quad (10)$$

$$J = \sigma E \quad (11)$$

$$D = \epsilon E \quad (12)$$

$$\text{div} B = 0 \quad (13)$$

3.4.2. Calcul du champ et potentiel électrique

Toutes ces mesures sont obtenues pour trois points de mesures: par le niveau de la flèche de la ligne (13m), à l'en-tête humain (1,75m) et à 1 m au-dessus du sol.

Le champ électrique près de TL est généralement mesuré en KV / m et les champs magnétiques sont dans micro Tesla (μT).

Le principe de cette partie est de montrer l'effet et la distribution du champ électrique produit par la ligne de transmission HVDC ± 500 kV et du corps humain.

La distribution des lignes équipotentielles et la variation du champ électrique sont données sur la figure 3.6.

Le corps humain dans le domaine électrique est un domaine semi-conducteur. Dans ce cas, la relation en fonction de la densité de courant et de l'intensité du champ électrique $J = \sigma E$ conduit aux normes établies précédemment (voir tableau ci-dessous) [35].

Lors de l'exposition aux fréquences industrielles EMF, il est important d'observer la densité des courants induits dans les tissus humains. Il est fondamental de limiter la densité de courant dans le corps à $10 \text{ mA} / \text{m}^2$ qui est un peu au-dessus de la valeur normalement générée par le corps.

Tableau 3.3: Facteur de dégâts et densité de courant.

Facteur de dégâts	Densité de courant J [mA / m ²]	La description
a	1-10	Réponse biologique minimale des tissus.
b	10 - 100	Troubles du système nerveux et visuel.
c	100 - 1000	Les stimuli des tissus excitables, qui peuvent conduire à des réactions indésirables. Troubles cardiaques, irritabilité neuromusculaire et troubles du SNC.
d	d >1000	Extrasystoles, fibrillation cardiaque. Conditions avec un taux de mortalité élevé.

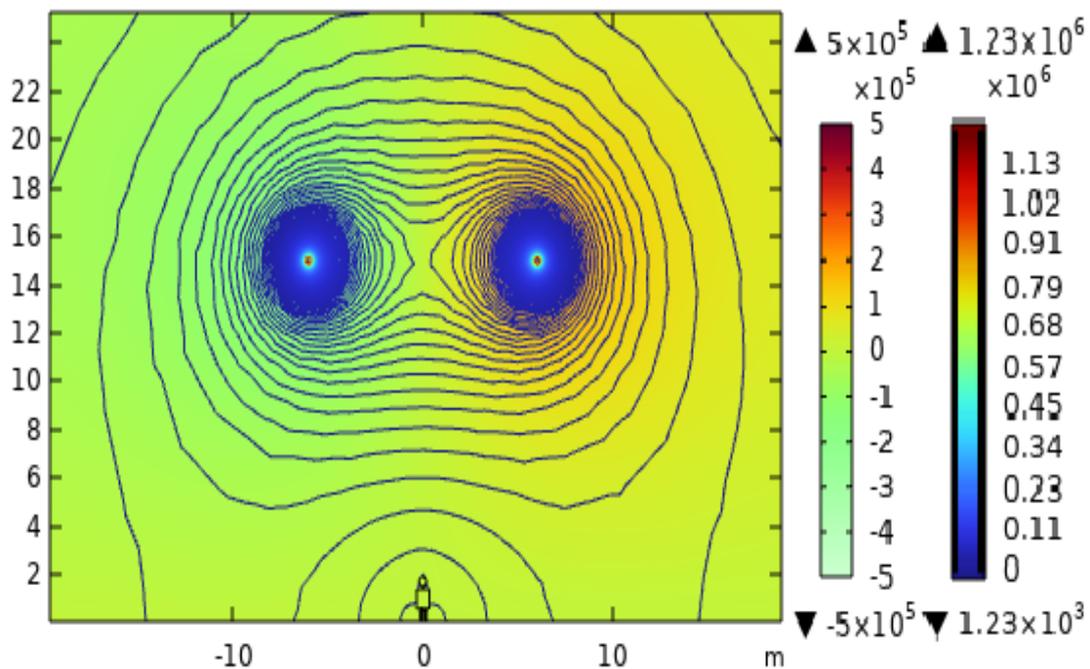


Figure 3.6: Distribution de lignes équipotentielles de $\pm 500 \text{ kV HVDC}$

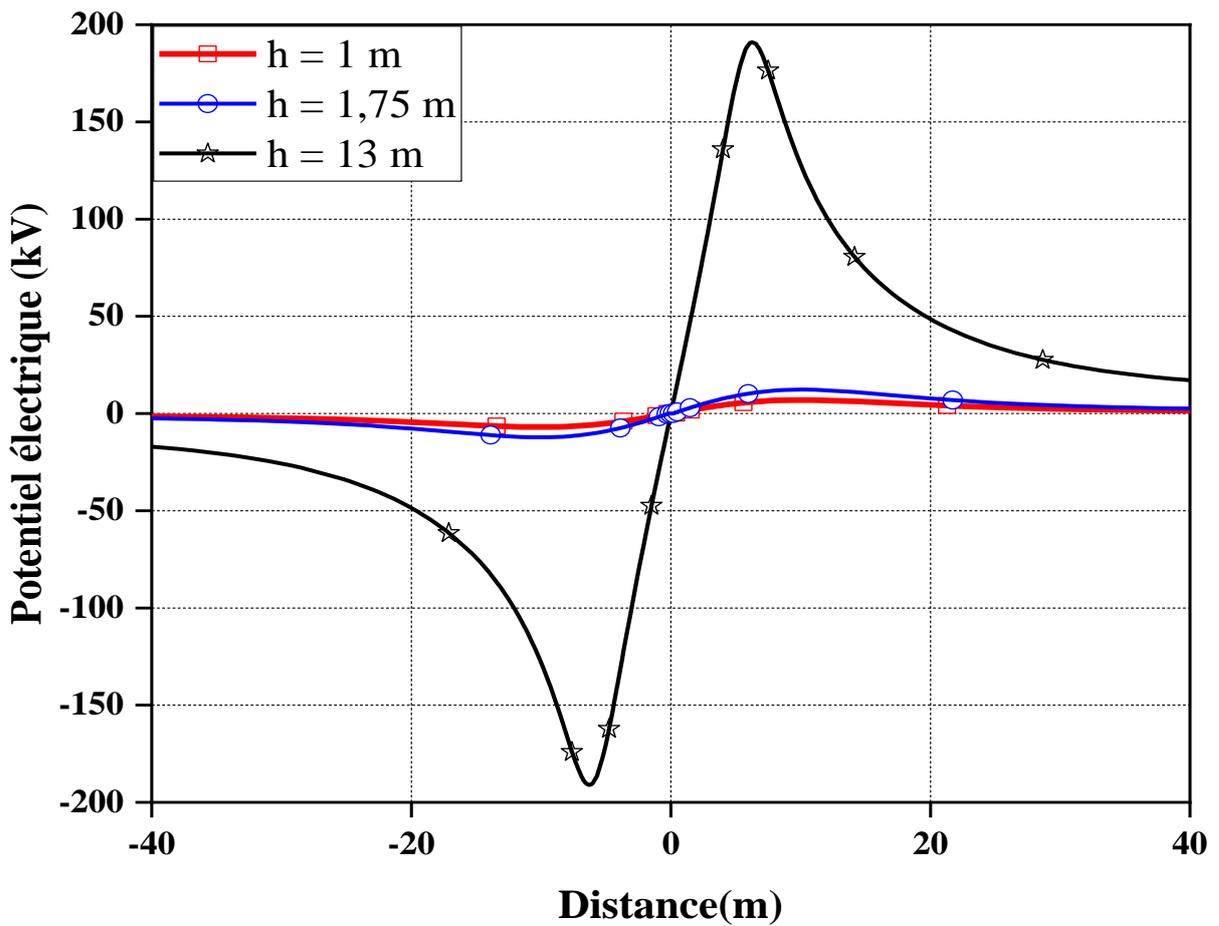


Figure 3.7: Potentiel électrique à différentes hauteurs

D'après cette figure (3.7) présentée se dessus, nous avons remarqué que le potentiel électrique présente une valeur très faible lorsque la source s'éloigne de sol, c'est pour cela la hauteur est un facteur important dans la conception des pylônes de transmission.

Sur la base de ces résultats médicaux (tableau 3.3) et de la conductivité électrique spécifique de certains tissus, l'intensité du champ électrique et magnétique dans les tissus dans facteur de dégâts c et les résultats donnés dans les figure 3.8.

La figure 3.8 représente l'effet du champ électrique à la tête humaine (1,75 m), au niveau de la flèche (13m) et à 1 m au-dessus du sol, d'après ces résultats on remarque la tête du corps humain est exposée au champ électrique extrêmement fort mais pour les tissus (1m) on observe l'intensité du champ électrique incident diminue de manière significative tout en pénétrant les tissus, en raison des propriétés électromagnétiques des tissus biologiques.

Le champ électrique au niveau de la flèche moyenne du conducteur qui est égale à 13 m pour la même tension électrique, est montrée dans la figure 3.8, où le champ électrique augmente aux distances de 1 et 1.75 m au-dessus du sol.

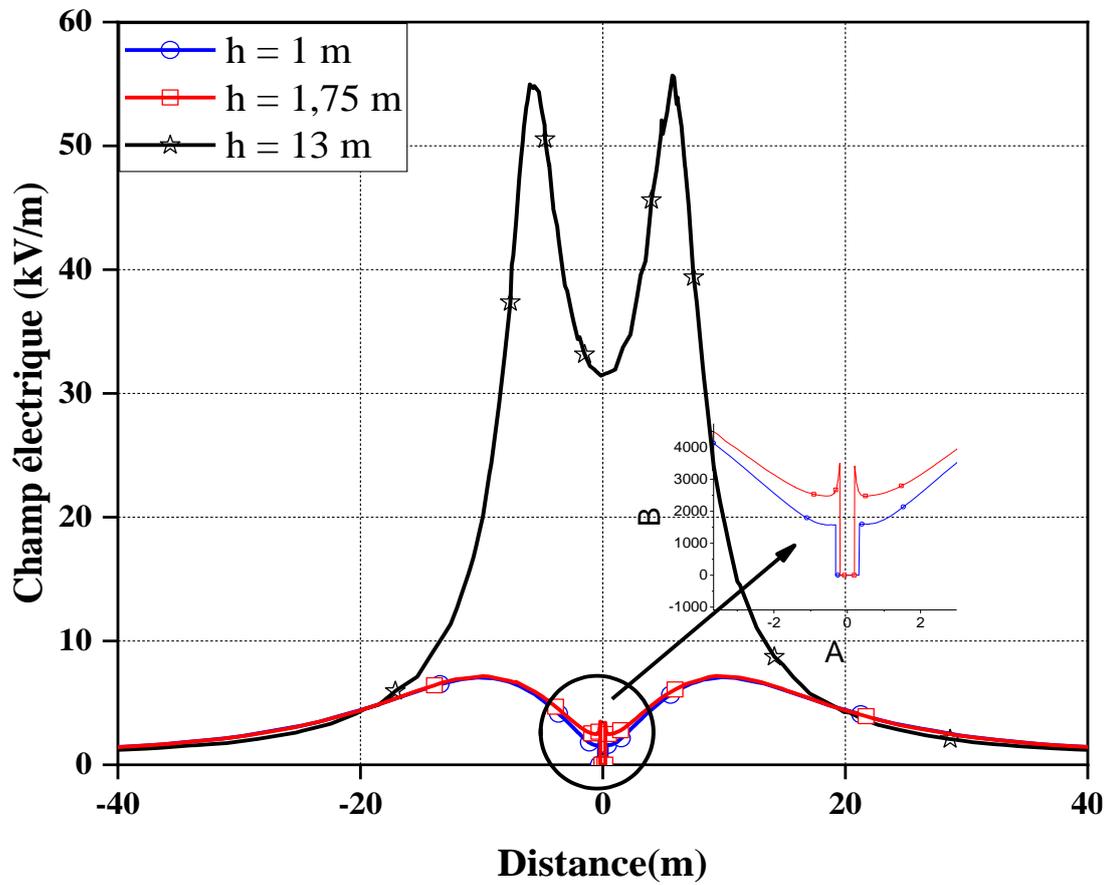


Figure 3.8: Champ électrique d'une ligne.

3.4.3. Calcul du champ magnétique

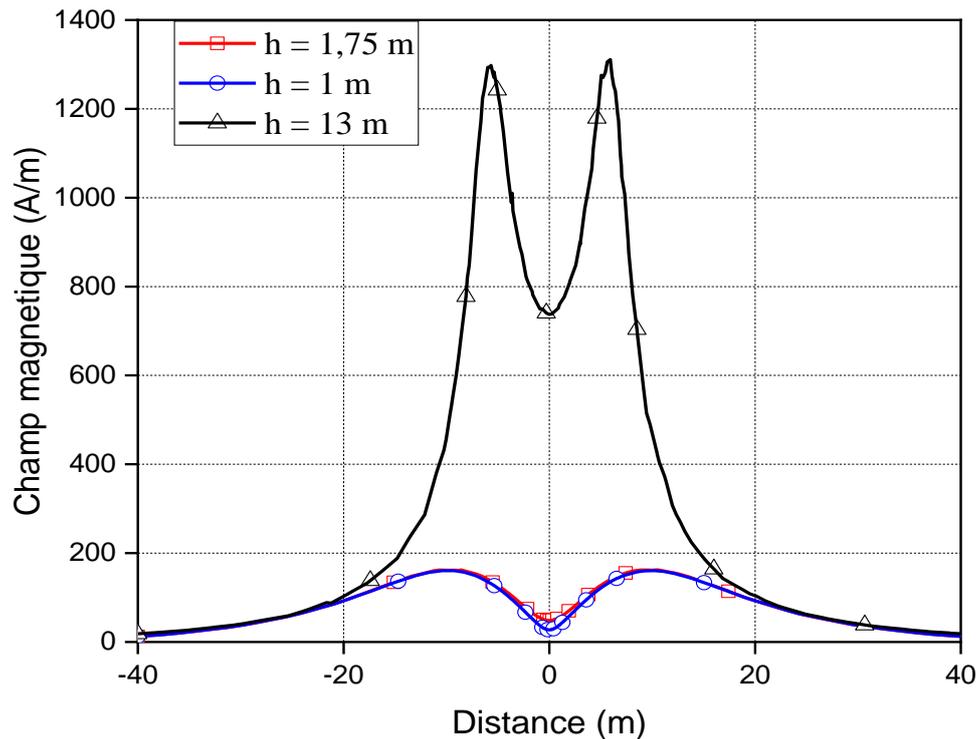


Figure 3.9: Champ magnétique d'une ligne

La figure 3.9 montre la variation du champ magnétique. D'après les résultats donnés par la figure, nous avons remarqué que les changements des hauteurs de la source par rapport au sol deviennent plus faibles.

3.4.4. Variation de la densité de flux magnétique et sa distribution

Les résultats sont présentés sous forme des courbes de variation du champ d'induction magnétique en fonction de la distance à l'axe de la ligne, les valeurs de l'induction sont calculées pour un même point de mesures par le niveau de la flèche de la ligne (13 m), à l'entête humaine (1,75 m) et à 1m au-dessus du sol.

La figure (3.10) montre la variation du champ magnétique en fonction de la distance, où on remarque que y'a deux valeurs maximales $B_{max} = 2 \cdot 10^{-4} T$ pour 1.75m, $B_{max} = 1.96 \cdot 10^{-4} T$ à 1m et $B = 1.65 \cdot 10^{-3} T$ à 13 m) pour une tension appliquée égale à ± 500 kV HVDC.

Le champ magnétique est généré par des objets magnétique, tel que des aimants permanents et par des en mouvement come le courant électrique, et d'après la figure présentée ci-dessous on remarque que l'effet du champ magnétique diminue de corps humains quand les câbles de HVDC sont en hauteur maximale.

La répartition les lignes du champ magnétiques est donnée dans la figure 3.11.

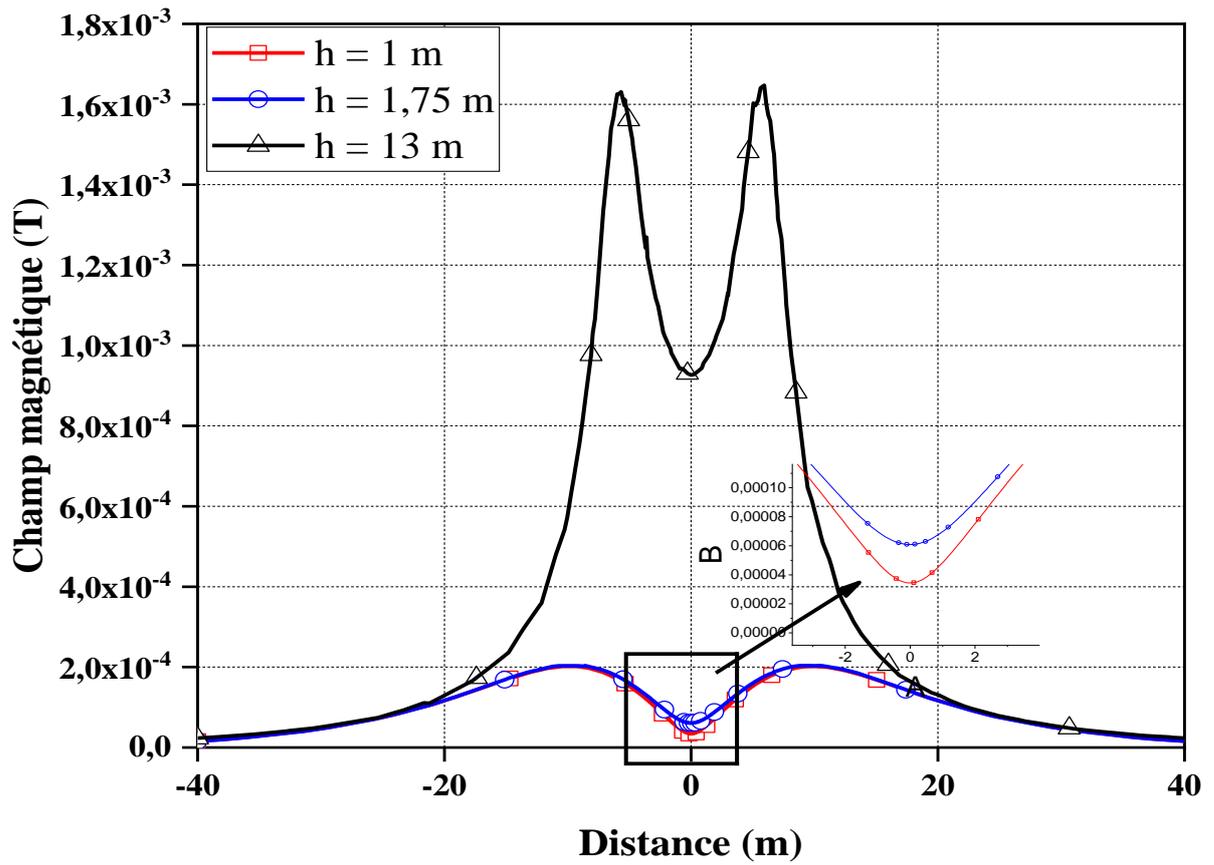


Figure 3.10: champ magnétique a différentes distances.

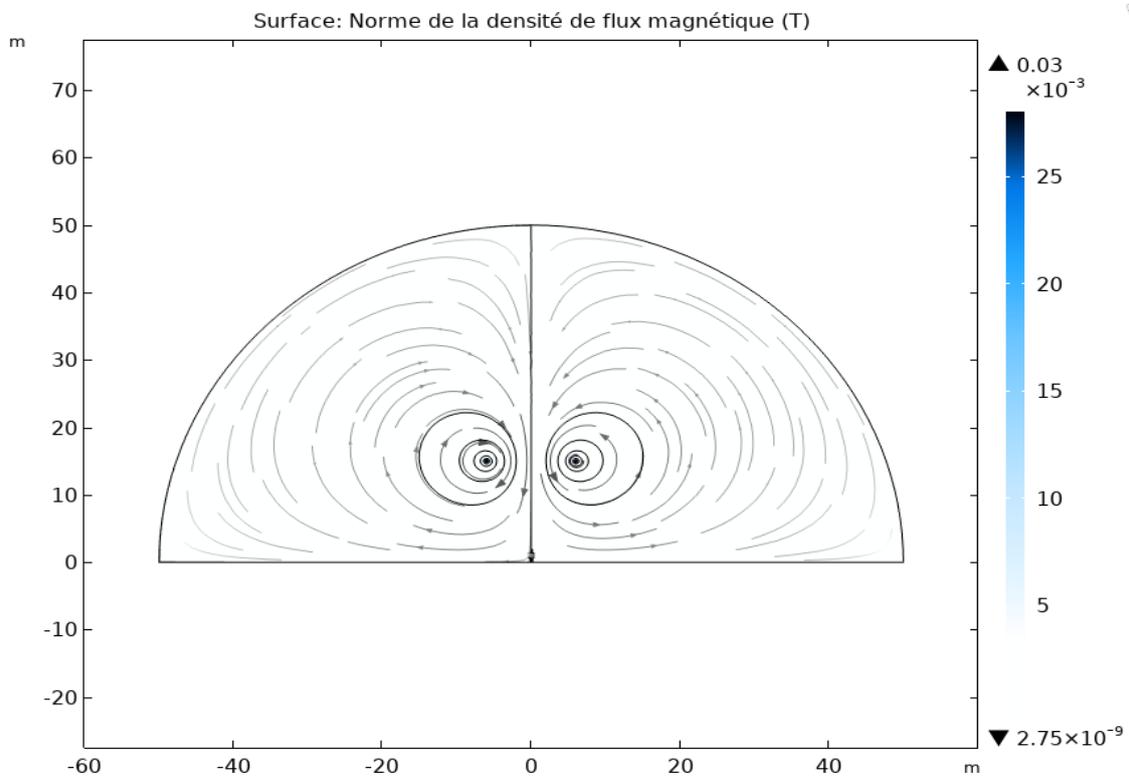


Figure 3.11: la densité du flux magnétique.

3.4.5. Les facteurs affectant le champ électrique

Il y a plusieurs facteurs qui affectent sur les valeurs des champs électrique produit par une ligne aérienne haute tension, il dépend principalement de la géométrie de la ligne électrique, c.-à-d. du niveau de la tension, la hauteur des conducteurs par rapport la terre et la distance séparation entre les conducteurs. Il y a plusieurs facteurs qui affectent sur les valeurs des champs électrique produit par une ligne aérienne haute tension, il dépend principalement de la géométrie de la ligne électrique, c.-à-d. du niveau de la tension, la hauteur des conducteurs par rapport la terre et la distance séparation entre les conducteurs.

a. Différents niveaux de la tension

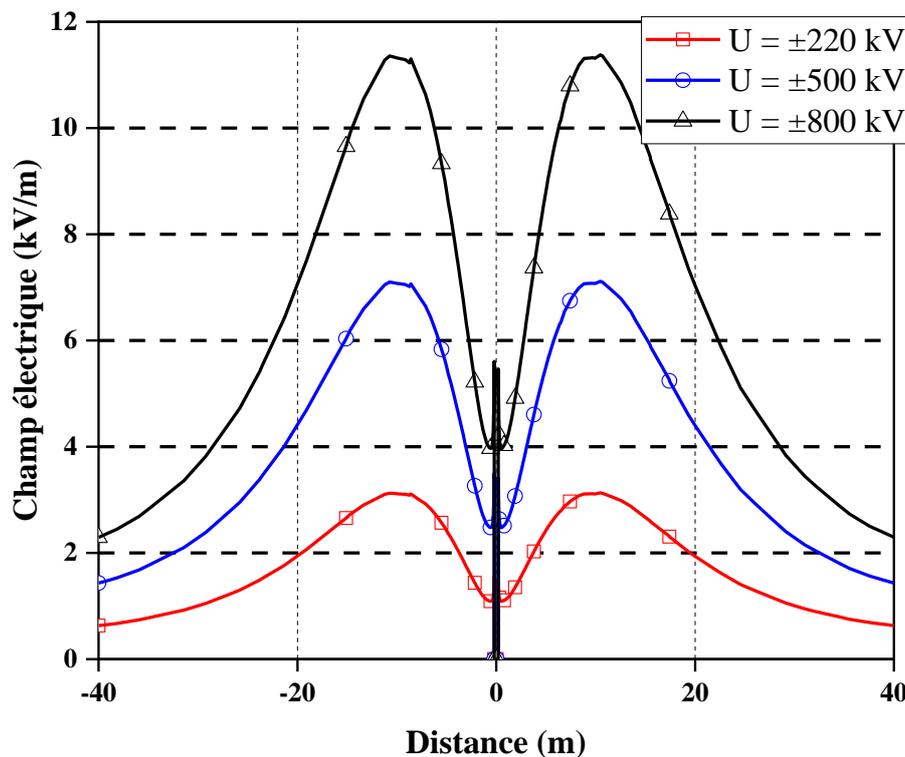


Figure 3.12 : Champ électrique à différents niveaux de la tension.

Le champ électrique présente des comportements similaires en ce que concerne leurs variations avec la variation de la tension c'est-à-dire à chaque qu'on augmente la tension, le champ électrique augmente.

b. Différents hauteur de la terre H .

La hauteur des pylônes de transmission électrique est un facteur crucial pour assurer la fiabilité, la sécurité et l'efficacité des réseaux électriques à haute tension. Elle contribue à maintenir un potentiel électrique plus élevé par rapport au sol, ce qui est essentiel pour le bon fonctionnement du réseau électrique.

Et nous avons constaté lorsque la hauteur est grande le champ électrique devient plus faible, c'est pour cela la hauteur des pylônes peut avoir un impact sur la sécurité des personnes et des animaux à proximité de la ligne HVDC.

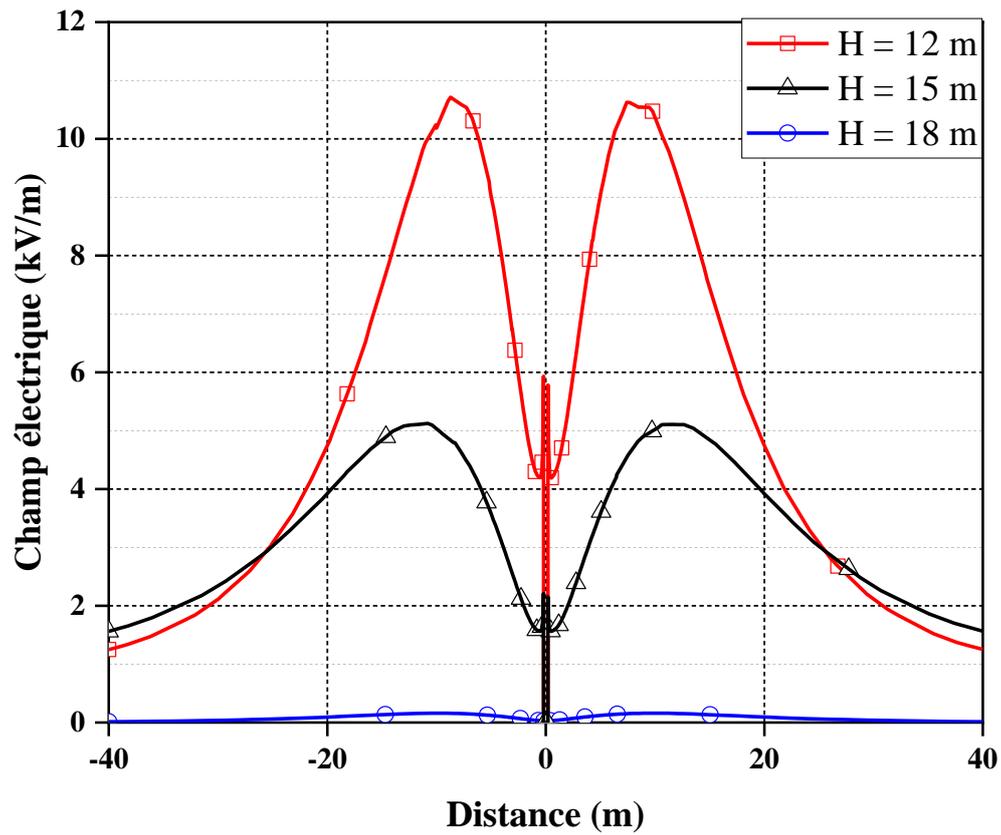


Figure 3.13 : Champ électrique a différents hauteur de la terre H.

c. Différentes distances de séparation D.

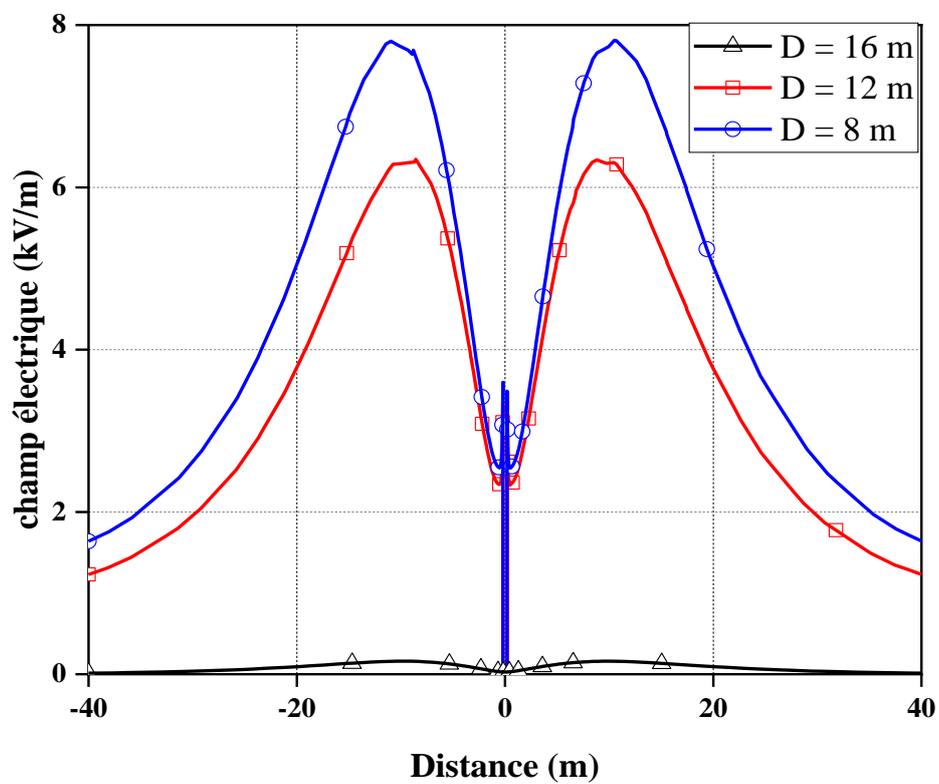


Figure 3.14 : Champ électrique a différents distances de séparation D.

La figure représente la simulation de champ électrique avec différentes distances de séparations, nous avons remarqué qu'à chaque fois la distance s'éloigne de la source, le champ électrique devient faible, c'est pour cela la distance de séparation entre les câbles dans un système à courant continu haute tension est facteur crucial dans la conception et l'exploitation de ce système.

3.5. Conclusion

Dans ce chapitre nous avons calculé le champ électrique et le champ magnétique en cas de présence d'un être humain en dessous d'une ligne de transmission aérienne de ± 500 kV HVDC, où on constate que la partie du corps humain affectée par le champ électromagnétique est la tête où ces atteignent des valeurs environnant de 14kV/cm pour le champ électrique et de 1.7 μ T pour le champ magnétique. Aussi nous avons étudiés l'influence de la hauteur, distances de séparation et de la tension sur la distribution de champ électrique et magnétique à 1.75m au-dessus du sol où on a remarqué que l'augmentation de la tension U (± 220 , ± 500 à ± 800 kV) et la diminution de la hauteur causent l'augmentation de champ électrique.

CONCLUSION GENERALE

Conclusion générale

Dans un premier temps, nous avons entrepris une étude bibliographique sur les aspects généraux des lignes électriques à haute tension en courant continu (HVDC). Ensuite, nous avons exposé les effets des champs électromagnétiques sur la santé, en considérant les fréquences industrielles, tant chez les enfants que chez les adultes. Nous avons abordé les effets avérés à court terme, réversibles, ainsi que certains effets probables à long terme. Il convient de noter que, bien que de nombreuses recherches aient été publiées, les conclusions de ces publications demeurent sujettes à controverse.

Par la suite, le chapitre trois s'est focalisé sur l'application de la méthode des éléments finis (MEF) pour calculer le champ électrique et magnétique dans les environs des lignes électriques aériennes HVDC, tout en évaluant leur impact sur le corps humain. En se basant sur nos simulations effectuées à l'aide du logiciel COMSOL Multiphysics 5.6, nous avons examiné le champ électrique à différentes distances, séparations des câbles, niveaux de tension et hauteurs par rapport à la terre, ce qui nous a permis de tirer les conclusions suivantes :

- Nous avons constaté que l'augmentation du niveau de la tension électrique entraîne une augmentation des valeurs du champ électrique;
- À l'inverse, l'augmentation de la hauteur des conducteurs par rapport à la terre diminue les valeurs du champ électrique ainsi que la distance de séparation D entre les câbles ;
- En calculant le champ électrique et magnétique à une hauteur de 1,75 mètre au-dessus du sol, nous avons obtenu une idée de l'intensité de ces grandeurs qui affectent le corps humain. La conclusion générale est que la tête du corps humain est exposée à un champ électrique extrêmement fort à proximité de ces lignes électriques à haute tension HVDC.

Ces conclusions soulignent l'importance de prendre en compte la distance entre les câbles, la hauteur des conducteurs et d'autres paramètres lors de la conception et de la gestion de ces lignes électriques afin de minimiser les risques potentiels pour la santé humaine, en particulier en ce qui concerne l'exposition à des champs électriques intenses.



REFERENCES

Références :

- [1] F. AOUABED, "la distribution du champ électrique et magnétique au voisinage des lignes à haute tension", Mémoire d'Ingénieur, Université de Sétif 2006.
- [2] ICNIRP. Guidelines for limiting exposure to time-varying electric, magnetic and electromagnetic field (up to 300 GHz). Health Phys., vol. 74, no 4, pp. 494–522, 1998.
- [3]. <https://www.techno-science.net/definition/6745.html>
- [4]. www.techniques-ingenieur.fr
- [5]. Joucdar, S., Kismoune, H., Boudjemia, F., & Bacha, D. (1997). Les brûlures électriques- étude rétrospective et analytique à propos de 588 cas sur une décennie 1984-1993. Annals of Burns and Fire Disasters, 10, 20-27.
- [6]. Gagnon C (2007) Appréciation esthétique des équipements de transport d'énergie (réseaux de pylônes).
- [7]. Fayoux P (1952) Fondations des pylônes des lignes électriques à très haute tension. Bulletin de la Société française des électriciens, 2.
- [8]. Morissette É (2008) Évaluation des normes de calcul et du comportement des cornières simples en compression utilisées comme contreventements dans les pylônes à treillis en acier. Université de Sherbrooke.
- [9]. Jean de Kerdéland, *L'antique histoire de quelques inventions modernes*, France-Empire, 1980, p. 89.
- [10]. Support de Cours Réseaux Electrique, Centre Universitaire Nour El Bachir El Bayadh, 95pp, 2017/2018.
- [11] Véronique Beauvois, Yves Beckers, Frédéric Rollin “ Effets potentiellement gênés par l’exploitations d’une ligne électrique aérienne à haute tension sur les exploitations agricoles situées à proximité,” Rapport Université de Liège, juillet 2020.
- [12] J.Q. Eric, "Transport d'énergie en courant continu à haute tension ", Technique de l'ingénieur D 4761.
- [13] René beaussier" Les interconnexion en courant continu : pourquoi ? Les liaisons dans le monde etCelle d'IFA “. Chef de laboratoire d'essais spécieux pour HVDC, 2000.
- [14]. Proceedings of the 5th NA International Conference on Industrial Engineering and Operations Management Detroit, Michigan, USA, August 10 - 14, 2020

REFERENCES

- [15]. R. Moran, Executioner's current Thomas Edison, George Westinghouse, and the invention of the electric chair, New York: Vintage Books, 2003.
- [16]. J.Q. Eric, "Transport d'énergie en courant continu à haute tension ", Technique de l'ingénieur D 4761.
- [17]. V.K. Sood, HVDC and Facts Controllers, Kluwer Academic Publisher, 2004.
- [18]. C.K. Kim, V.K. Sood, G.S. Jang, S.J. Lim, S.J. Lee, HVDC Transmission: Power Conversion. *Applications in Power Systems*, Wiley-IEEE Press, Singapore, 2009.
- [19]. T. Wildi, G. Sybille, Électrotechnique, 4 eme édition, de boeck, Bruxelles, 2005.
- [20]. B. Cova, G. Pirovano , S. Meregalli, " Audit des alternatives à la réalisation d'une ligne à très haute. tension entre le Cotentin et le Maine" CESI Centro Elettrotecnico Sperimentale Italiano ,2005.
- [21]. J. Setréus, L. Bertling, " Introduction to HVDC Technology for Reliable Electrical Power Systems ", PMAPS '08, Proceedings of the 10th International Conference on , 2008 , pp. 1-8.
- [22]. W.F. Long, J. Reeve, J.R. Mc Nichol, R.E. Harrison, and J.P. Bowles. "Considerations for implementing multiterminal DC systems", IEEE Transactions Power Apparatus and Systems, vol. 104, no. 9, 1985, pp. 2521- 2530.
- [23]. L. Teppoz, " Commande d'un système de conversion de type VSC-HVDC stabilité-contrôle des perturbations", thèse docteur de l'INPG 2005.
- [24]. J. Arrillaga, High Voltage Direct Current Transmission, 2nd Edition, the Institution of Electrical Engineers, London, 1998.
- [25] L. Ha HOANG «Contribution a la modélisation tridimensionnelle des interactions champ électromagnétique – corps humain en basses fréquences» thèse de DOCTORAT, ECL2007 L'Ecole Centrale de Lyon.
- [26] Feychting M, « Magnetic fields and Breast Cancer in Swedish Adults Residing Near High Voltage Power Lines» , Epidemiology, 9 (1998)
- [27] National Institute of Environmental Health Sciences (NIEHS), U.S. National Institutes of Health (1998) Assessment of Health Effects from Exposure to Power-line Frequency Electric and Magnetic Fields: Working Group Report. Research triangle Park, NC: NIH Publication No 98-3981.
- [28] R.G. Olsen, and G.L. Heins, "Electromagnetic Compatibility Of High Voltage Transmission

REFERENCES

- Lines And-The Guidance Of Center Pivot Irrigation Units With Cornering Systems” IEEE Trans. on Power Delivery, Vol. 13, No. 4, pp. 1230-1237, October 1998.
- [29] R. Djekidel, D. Mahi, A. Ameer, A. Ouchar et M. Hadjadj « Calcul et atténuation du champ magnétique d’une ligne aérienne HT au moyen d’une boucle passive» Volume 54, pp 103-108, ACTA ELECTROTEHNICA, Number 2, 2013
- [30] M. Abdel-Salam, M. H. Abdallah, "Transmission Line Electric Field Induction in Humans Using Charge Simulation Method", IEEE Trans. on Biomedical Eng., Vol. 42, NO. 11, pp. 1105-1109, NOV. 1995
- [31] D.M.Petković, D.Krstić, V.B.Stanković, "The effect of electric field on humans near 110 kV power lines", Working and Living Environmental Protection Journal, Vol. 3, No1, PP. 63 – 72, 2006.
- [32] C. Volât, " Modélisation physique et numérique par la méthode des éléments finis de frontière de la distribution du potentiel et du champ électrique le long d'un isolateur standard de poste 735kv recouvert de glace", Canada: université du Québec, juin 2002.
- [33] NISRINE MHAGUEN "développement de modèles dynamiques de prédiction de la tension critique de contournement des isolateurs recouverts de glace basés sur la méthode des éléments finis" Canada: université du Québec, juin 2011.
- [34] Khalid Hussain « Analysis of Electric and Magnetic Field of ± 660 kV HVDC OTL Underlying Human Body » 2021 International Conference on Advanced Electrical Equipment and Reliable Operation (AEERO) | 978-1-6654-0264 IEEE |
- [35] D. M. Petković, D. D. Krstić, V. B. Stanković " The effect of electric field on humans in the immediate vicinity of 110 kv power lines" Working and Living Environmental Protection Vol. 3, No 1, 2006, pp. 63 – 72