

UNIVERSITE KASDI MERBAH OUARGLA

Faculté des Sciences Appliquées

Département de Génie Electrique



Mémoire

MASTER ACADEMIQUE

Domaine : Sciences et Technologies

Filière : Electrotechnique

Spécialité : Electrotechnique Industrielle

Présenté par :

FENTROUCI Fouad

BOUTAGHRIOUT Nassim

Thème :

***Simulation en 3 dimensions du champ
électromagnétique autour d'une ligne électrique
aérienne de 400 KV***

Soutenue publiquement le : 16/06/2025

Devant les jurys :

GADOUM Abdelatif	MCA	Université de Ouargla	Président
AYAD Ahmed Nour El Islam	PR	Université de Ouargla	Encadreur
ABBASSI Abderrahmane	MCB	Université de Ouargla	Examineur

Année universitaire 2024/2025

Dédicaces

Nous dédions humblement ce travail:

À nos chers parents, pour leur amour inconditionnel et leur soutien
constant.

À nos femmes, pour leur patience et leur encouragement

À nos frères et sœurs, pour leur présence et leurs encouragements

À tous les membres de nos familles

À nos amis fidèles

À tous les étudiants en électrotechnique

À l'ensemble des enseignants du département de Génie Électrique.

À tout le personnel de l'université Kasdi Merbah.

Remerciements

Avant tout, on remercie ALLAH le tout puissant de nous donner la santé, la volonté et ma force pour terminer ce travail dans les meilleures conditions.

Nous exprimons notre profonde reconnaissance et nos sincères remerciements à notre rapporteur, Monsieur Mr. AYAD AHMED NOUR EL ISLAM, qu'il trouve ici l'expression de notre sincère reconnaissance pour sa confiance, sa patience et son aide tout le long de ce travail.

Je remercie également, tous les membres du jury de bien vouloir juger ce Travail.

Ainsi que tous nos enseignants du Département Génie électrique. On n'exclut pas de ces remerciements, la promotion 2025 de Génie Électrique.

Sommaire

Sommaire

Liste Des Figures

Liste Des Tableaux

Introduction Générale 1

Chapitre I Généralités Sur Les Lignes Electriques Aériennes

I.1	Introduction	3
I.2	Le réseau électrique	3
I.3	Classification selon la fonction de réseau.....	5
I.4	Les différents niveaux de tension	5
I.5	Types des lignes électriques	6
I.5.1	Lignes électriques aériennes	6
I.5.2	Lignes électriques souterraines.....	7
I.5.3	Lignes électriques sous-marines.....	7
I.6	Lignes électriques aériennes	8
I.7	Éléments constitutifs d'une ligne aérienne.....	8
I.7.1	Conducteurs des lignes électriques aériennes.....	9
I.7.2	Câble de garde	10
I.7.3	Supports de ligne	11
I.7.4	Isolateurs de lignes électriques	14
I.7.4.1	Isolateurs de type rigide.....	14
I.7.4.2	Isolateurs suspendus ou éléments de chaîne	14
I.7.5	Accessoires	15
I.7.5.1	Matériel d'équipement.....	15
I.7.5.2	Cornes de garde, raquettes et anneau pare-effluves.....	16
I.7.5.3	Amortisseurs de vibration.....	16
I.7.5.4	Entretoises	16
I.7.5.5	Dispositifs de mise à la terre.....	16
I.7.5.6	Des dispositifs de signalisation pour la navigation aérienne	16
I.8	Généralités sur le champ électromagnétique	17
I.8.1	Caractéristiques de champ électromagnétique.....	17
I.8.1.1	Champ électrique	17
I.8.1.2	Champ magnétique	17
I.8.1.3	Champ électromagnétique	18
I.8.2	Le spectre électromagnétique	18
I.8.3	Sources de champ électromagnétique.....	19
I.8.3.1	Sources naturelles	20
I.8.3.2	Sources artificielle	20

I.9	Le champ électromagnétique généré par les lignes électriques aériennes	21
I.9.1	Champ Electrique Rayonné par les lignes aériennes	21
I.9.2	Champ Magnétique Rayonné par les lignes aériennes	22
I.9.3	Niveaux de champs rayonnés	22
I.9.4	Les phénomènes de couplage électrique et magnétique	23
I.9.4.1	Couplage électrique (ou capacitif).....	23
I.9.4.2	Couplage magnétique (ou inductif)	24
I.9.5	Interaction du champ électromagnétique à 50 Hz avec le corps humain.....	25
I.9.5.1	Interaction lie au champ électrique.....	25
I.9.5.2	Interaction lie au champ magnétique	26
I.10	Effet du champ électromagnétique 50 Hz sur l'environnement et sante	27
I.10.1	Effet du champ électromagnétique 50 Hz sur corps humain	27
I.10.1.1	Effets directs à court terme	27
I.10.1.2	Effets directs à long terme	28
I.10.1.3	Effets indirects (Courants de contact).....	28
I.10.2	Recommandations et réglementations	28
I.10.2.1	Protection public.....	28
I.10.2.2	Protection des travailleurs.....	29
I.10.3	Effet du champ électromagnétique 50 Hz sur les animaux modèles et de rente.....	30
I.10.4	Effet du champ électromagnétique 50 Hz sur les plantes	31
I.10.5	Conclusions pour les effets directs chez les animaux et les plantes	32
I.11	Conclusion.....	33
Chapitre II Formulation Mathématique Des Phénomènes Electromagnétiques		
II.1	Introduction	35
II.2	Calcul du champ électromagnétique	35
II.2.1	Equations de Maxwell.....	35
II.2.1.1	Propriétés magnétiques	36
II.2.1.2	Caractéristiques diélectrique	36
II.2.1.3	Relations de continuité entre deux milieux différents	37
II.2.1.4	Conditions de passage	38
II.3	Modèles électromagnétiques.....	38
II.3.1	Modèle Electrostatique	39
II.3.2	Modèle magnétostatique	39
II.3.2.1	Modèle magnétostatique scalaire.....	39
II.3.2.2	Modèle magnétostatique vectorielle	40
II.3.2.3	Formulation en termes de potentiel vecteur.....	40
II.3.2.3.1	Le calcul du champ magnétique des lignes électriques.....	40
II.3.2.3.2	Le calcul du champ électrique des lignes électriques	41
II.4	Déclaration des conditions aux limites	42
II.5	Les techniques de résolutions des équations aux dérivées partielles.....	42
II.5.1	Méthode des Eléments Finis (MEF) :.....	43

II.5.1.1	Fonction d'approximation	44
II.5.1.2	Formulation Intégrale	45
II.5.1.2.1	Formulation Variationnelle	45
II.6	Conclusion.....	45

Chapitre III Résultats De Simulation Des Lignes Aériennes En 3D

III.1	Introduction	46
III.2	Simulation sous COMSOL	46
III.2.1	Présentation du logiciel COMSOL	46
III.2.2	Etapas du processus de simulation sous COMSOL.....	47
III.3	Simulation du champ électromagnétique autour des lignes aériennes	48
III.3.1	Choix du modèle dans COMSOL.....	48
III.3.1.1	Modèle «Power Lines Electric Field»	48
III.3.1.2	Modèle «Power Lines Magnetic Field».....	48
III.4	Modèles géométriques de la ligne 400 KV simple terre de COMSOL.....	49
III.4.1	Paramètres de la ligne 400 kV	49
III.4.2	Maillage du domaine d'étude	50
III.4.3	Configuration spatiale de la Ligne de mesure	50
III.5	Résultats de simulation d'une ligne aérienne 400 kV	51
III.5.1	Champ électrique.....	51
III.5.2	Champ magnétique	54
III.6	Présence d'un défaut dans les lignes électriques 400 KV	56
III.6.1	Défaut d'un court-circuit triphasé.....	56
III.6.2	Défaut de surtension	58
III.6.3	Défaut de manque phase.....	59
III.6.3.1	Champ électrique	60
III.6.3.2	Champ magnétique	61
III.7	Présence d'un pipeline très proche de la ligne haute tension 400 kV.....	62
III.8	Présence d'un pipeline perpendiculaire avec la ligne.....	64
III.9	Présence de plusieurs pipeline en parallèle à la ligne aérienne 400 KV.....	65
III.10	Présence de plusieurs parties de pipelines a des différentes positions sous la ligne 400 KV	67
III.11	Conclusion	69
Conclusion générale		69
Référence		70

Liste Des Figures

Chapitre I Généralités sur les lignes électriques aériennes

Figure I-1: les maillons du système électrique.....	5
Figure I-2: conducteur d'une ligne aérienne.....	6
Figure I-3: ligne électrique aérienne.....	6
Figure I-4: différents câbles électriques souterrains	7
Figure I-5: Ligne électrique souterraine.....	7
Figure I-6: différents câbles sous-marins	7
Figure I-7: ligne électrique sous-marine.....	7
Figure I-8: conducteur équilibré (61 fils).....	9
Figure I-9: Conducteurs usuels.....	10
Figure I-10: Câble de garde à fibres optiques incorporées	11
Figure I-11: pylône haute tension	12
Figure I-12: schéma du support	13
Figure I-13: Isolateur d'une ligne haute tension.....	14
Figure I-14: Champ électromagnétique	18
Figure I-15: Spectre électromagnétique	19
Figure I-16: Valeurs typiques du champ électrique à 1,5 m du sol.....	21
Figure I-17: Valeurs typiques du champ magnétique à 1,5 m du sol.....	22
Figure I-18: Couplage capacitif (lié au champ électrique)	24
Figure I-19: Couplage inductif (lié au champ magnétique)	25
Figure I-20: courant induit par un champ électrique	26
Figure I-21: courant induit par un champ magnétique.....	26

Chapitre II Formulation mathématique des phénomènes électromagnétiques

Figure II-1 : Interface entre deux milieux différents.....	37
Figure II.2 : Discrétisation du domaine d'étude (maillage).....	44

Chapitre III Résultats de Simulation des lignes aériennes en 3D

Figure III-1: L'interface du logiciel COMSOL Multiphasiques.....	47
Figure III-2 : Ligne aérienne de transport électrique.....	48
Figure III-3: Ligne 400kV simple tour COMSOL.....	49
Figure III-4: Distance entre les deux pylônes.....	49
Figure III-5: Maillages des domaines étudiés	50

Figure III-6: Configuration spatiale de la ligne de mesure.....	51
Figure III-7: Distribution du champ électrique autour les lignes aériennes.....	52
Figure III-8: Propagation du champ électrique au niveau du sol sous les lignes aériennes.....	52
Figure III-9: Mesure du champ électrique au niveau du sol sous les lignes aériennes 400KV.....	53
Figure III-10: Représentation des lignes de la densité du flux magnétique.....	54
Figure III-11: Propagation du champ magnétique au niveau du sol sous les lignes aériennes.....	54
Figure III-12: Variation de l'induction magnétique d'une ligne 400 kV en fonction du courant à 100 m de distance.....	55
Figure III-13 : l'influence de la présence d'un court-circuit sur la distribution des lignes magnétiques.....	56
Figure III-14 : Mesure de la densité du flux magnétique.....	57
Figure III-15 : L'impact des surtensions sur la distribution du champ électrique.....	58
Figure III-16 : Mesure de champ électrique (surtension de 12000 KV).....	59
Figure III-17 : Distribution du champ électrique lors d'une ouverture d'une seule phase.....	60
Figure III-18 : Mesure du champ électrique lors d'ouverture d'une phase.....	60
Figure III-19 : Distribution du champ magnétique lors d'une ouverture d'une seule phase.....	61
Figure III-20 : Mesure du champ magnétique lors d'une ouverture d'une seule phase.....	61
Figure III-21 : Le passage d'un pipeline sous une ligne 400Kv.....	63
Figure III-22 : Calcul de l'induction magnétique sur une partie de pipeline sous la ligne 400 KV....	63
Figure III-23 : Présence d'un pipeline long perpendiculaire à la ligne 400 kV	64
Figure III-24 : Mesure de l'Induction magnétique au niveau de pipeline	65
Figure III-25 : présence de plusieurs pipelines en parallèle à la ligne aérienne 400 KV.....	65
Figure III-26 :L'induction magnétique au niveau des pipelines disposés en parallèle.....	66
Figure III- 27 : mesure du champ électrique dans la partie supérieure de chaque pipeline.....	67
Figure III-28: Plusieurs passages de pipelines sous la ligne de 400 kV selon un angle perpendiculaire	67
Figure III-29 : Calcul du champ magnétique induit sur les tronçons de pipelines.....	68

Liste Des Tableaux

Chapitre I Généralités sur les lignes électriques aériennes

Tableau I-1 : Niveaux de tension normalisée d'après la CEI.....	6
Tableau I-2 : caractéristiques principales des conducteurs pour lignes à haute et très haute tension.....	10
Tableau I-3: caractéristiques des conducteurs de garde.....	11
Tableau I-4 : valeurs typiques des ordres de grandeur de champs électrique et magnétique.....	23

Chapitre III Résultats de Simulation des lignes aériennes en 3D

Tableau III-1 : mesure du champ électrique selon l'axe x.....	53
Tableau III-2 : Variation de la densité du flux magnétique en fonction de la distance et l'intensité du courant.....	55

Introduction Générale

Introduction Générale

L'énergie électrique est un pilier essentiel des sociétés modernes, alimentant nos foyers, industries, transports et technologies. Sa production, qu'elle provienne de sources fossiles, nucléaires ou renouvelables, nécessite un réseau de transport et de distribution efficace pour parvenir jusqu'aux consommateurs. C'est là que les lignes électriques, en particulier les lignes aériennes, jouent un rôle crucial.

L'étude du comportement des lignes aériennes a mis en évidence le risque associé au rayonnement électromagnétique émis par ces infrastructures. Ce rayonnement peut avoir des effets significatifs sur les êtres vivants (êtres humains, animaux, végétaux), ainsi que sur les équipements électroniques et électriques. Par ailleurs, les structures métalliques situées à proximité de ces lignes, telles que les pipelines, peuvent être soumises à des courants induits, susceptibles de provoquer une corrosion électrochimique accélérée ou d'autres dysfonctionnements techniques. Il est donc impératif de mieux comprendre ces phénomènes afin d'évaluer les risques et de développer des solutions adaptées. [3].

Ce mémoire de fin d'études s'articule autour de cette problématique et se structure en trois chapitres principaux.

Le premier chapitre présente les fondamentaux des réseaux électriques de transport, en abordant la classification et les types de lignes (aériennes, souterraines, etc.), ainsi que leur mode de fonctionnement. Il met également l'accent sur les champs électromagnétiques, leurs sources, leurs caractéristiques et leurs effets potentiels sur la santé et l'environnement.

Le deuxième chapitre porte sur les équations de Maxwell, essentielles à la compréhension de la propagation des champs électromagnétiques.

Le troisième chapitre présente les résultats des simulations numériques, en analysant les niveaux de champs électromagnétiques selon différentes configurations de positionnement du pipeline par rapport à une ligne aérienne de 400 kV. L'étude met en évidence les impacts potentiels sur la santé, l'environnement et les infrastructures métalliques, notamment les pipelines.

Chapitre I

Généralités Sur Les Lignes Electriques Aériennes

I.1 Introduction

L'énergie électrique est devenue un partenaire indispensable dans notre vie quotidienne, notre développement technologique et économique. Malgré tous les bénéfices liés à son utilisation, nous baignons constamment dans des champs électriques et magnétiques. Si le public reconnaît les avantages liés à son utilisation, il manifeste une inquiétude croissante quant aux effets induits par son utilisation.

La production d'électricité est réalisée dans des centrales (hydroélectriques, thermiques, à vapeur, à gaz...) et doit être acheminée jusqu'aux industries, agglomérations, établissements, et logements. Un réseau de lignes, de transformateurs, de postes électriques permet cet acheminement. Les lignes à très haute tension sont les premiers maillons de ce réseau, elles permettent de transporter l'électricité des principaux centres de production jusqu'aux zones de consommation.

Le courant distribué est un courant alternatif de fréquence 50 Hz (extrêmement basse fréquence). Au voisinage immédiat d'une ligne à haute tension, aérienne ou souterraine, un champ électrique et un champ magnétique sont présents. À distance de la ligne, ces champs décroissent rapidement.

Dans le cas des lignes souterraines, le champ magnétique décroît plus rapidement avec la distance que dans le cas des lignes aériennes. Le champ électrique est très atténué par l'enfouissement sous terre. Certaines technologies lors de la mise en place des lignes permettent de réduire les champs (configuration des câbles, gaines...) [1].

Dans la première partie de ce chapitre, nous avons présenté de manière générale le réseau électrique ainsi que les différents types de lignes électriques. Par la suite, nous avons approfondi l'étude des lignes électriques aériennes en détaillant leurs différentes catégories ainsi que les éléments qui les constituent.

Dans la deuxième partie, nous avons présenté l'ensemble des rappels nécessaires à la compréhension des champs électromagnétiques, en abordant les différentes sources de ces champs, leurs interactions ainsi que les effets des champs électromagnétiques basse fréquence (50 Hz) générés par les lignes de transport d'électricité à haute et très haute tension sur le corps humain. Cette partie s'achève par une présentation des réglementations en vigueur et des limites d'exposition recommandées.

I.2 Le réseau électrique

Un réseau de transport d'électricité, élément clé du système énergétique, constitue l'infrastructure permettant de transporter l'électricité depuis les centrales de production jusqu'aux

utilisateurs finaux (consommateurs). Cette infrastructure comprend des lignes aériennes ou souterraines à différents niveaux de tension, organisées en maillage ou en arbre. Des postes de transformation, qui permettent de modifier le niveau de tension, ainsi que des dispositifs de coupure et de sécurité ainsi que des équipements de contrôle-commande complètent l'ensemble du système

Le réseau électrique permet de combiner un mix énergétique en tirant le meilleur parti de chaque filière et en organisant la complémentarité des moyens de production, des moins coûteux aux plus onéreux. Il contribue ainsi à limiter à la fois le coût des investissements et des opérations d'exploitation du système électrique dans son ensemble, tout en réduisant la consommation des ressources naturelles.

Le réseau électrique permet aussi aux utilisateurs de s'installer sur l'ensemble du territoire, sans dépendre de la proximité des centres de production, tout en bénéficiant d'une alimentation électrique fiable. Inversement, il rend possible l'exploitation de ressources énergétiques situées loin des zones de consommation telles que l'hydroélectricité en zone montagneuse ou les énergies marines pour répondre aux besoins en électricité.

Un réseau électrique de grande envergure doit être organisé sous forme de maillage, afin d'ajuster en permanence la disponibilité de l'électricité à la demande. Cela se fait en réorientant et en répartissant la puissance électrique entre les différentes parties du réseau. Sur le plan statistique, les fluctuations individuelles de la consommation sont absorbées dans une dynamique globale qui évolue lentement, suivant les tendances générales de la demande. Chaque nœud du réseau correspond à un poste électrique majeur, où convergent plusieurs lignes fonctionnant à divers niveaux de tension. L'interconnexion des différentes branches du réseau permet au gestionnaire d'équilibrer la demande, de garantir en tout temps la sécurité de l'approvisionnement et d'optimiser le rendement économique du parc de production. Les lignes de transport ainsi que les postes de transformation à haute et très haute tension (HT/THT) représentent ainsi des composantes fondamentales du réseau électrique [1].

Au début de l'année 2005 et trente ans après le passage au palier 220kV, le transport algérien d'électricité a réussi son passage au palier 400kV. Une étape décisive puisqu'elle permettra de renforcer d'une part le système électrique algérien et d'autre part, les liaisons électriques maghrébines dans le cadre du développement des interconnexions international et de la boucle méditerranéenne [3].

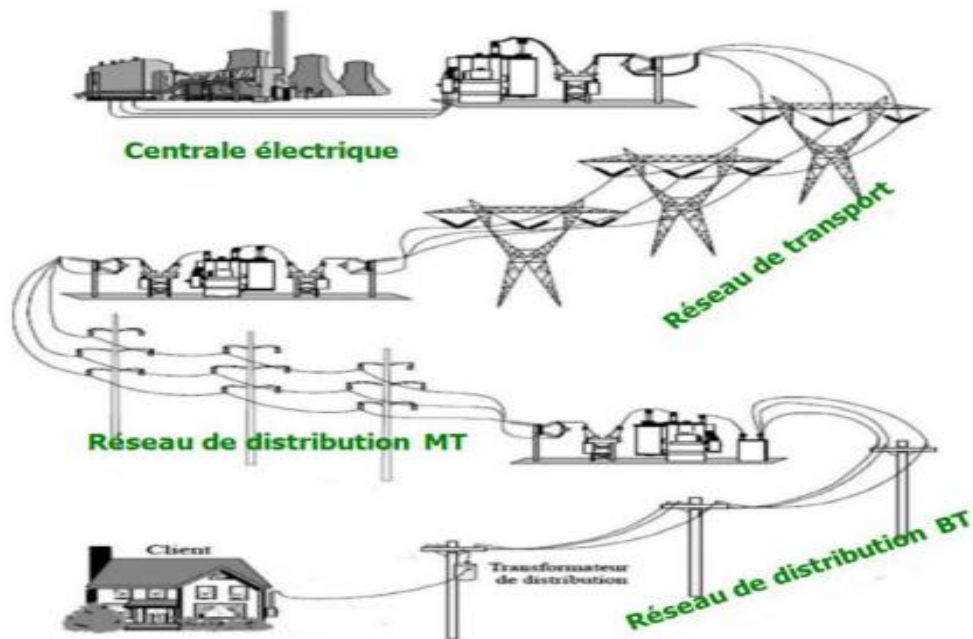


Figure I-1: les maillons du système électrique

I.3 Classification selon la fonction de réseau

Les réseaux électriques sont structurés en plusieurs niveaux fonctionnels, chacun assurant un rôle spécifique dans le système d'alimentation électrique. Cette classification fonctionnelle permet de distinguer les réseaux de transport, de répartition et de distribution.

- Le réseau de transport de l'électricité centralisé et maillé, dans lequel on distingue :
 - Le réseau de transport à très haute tension (220 kV et 400 kV) au niveau national et international, qui permet de transporter de grandes quantités d'énergie sur de longues distances avec un faible niveau de perte. Ces lignes partent des grandes centrales de production. Elles permettent également les interconnexions avec les pays voisins.
 - Les réseaux régionaux de répartition constitués de lignes à hautes tensions (220 kV, 150 kV, 90 kV et 60 kV) qui répartissent l'énergie au niveau des régions et fournissent en électricité les gros clients principalement industriels.
- Le réseau de distribution moyenne et basse tensions. Ce réseau permet la distribution de l'électricité à l'ensemble des consommateurs finaux.

I.4 Les différents niveaux de tension

Les différents niveaux de tension sont rigoureusement définis par la norme CEI (Commission électrotechnique internationale), une organisation mondiale de normalisation regroupant l'ensemble des comités électrotechniques nationaux (les comités nationaux de la CEI). L'objectif principal de la CEI est de promouvoir la coopération internationale dans le domaine de la

normalisation liée à l'électricité et à l'électronique.

Dans ce cadre, la CEI publie des normes internationales, élaborées par des comités d'études spécialisés. Tout comité national concerné peut contribuer aux travaux de ces comités. Par ailleurs, des organisations internationales, qu'elles soient gouvernementales ou non gouvernementales, collaborent également avec la CEI dans l'élaboration de ces normes [4].

Le tableau I-1 présente les plages des tensions normalisées du réseau électrique :

Tableau I-1 : Niveaux de tension normalisée d'après la CEI

Tension alternative	Domaine de tension	Autre appellation courante	Tension d'utilisation
≤ 50 V	TBT	TBT (Très basse tension)	12-24-48 V
≤ 1000 V	BT	BT (Basse tension)	230-380-400 V
$1 < U \leq 50$ KV	HTA	MT (Moyenne tension)	5.5-6.6-10-15-20-36 KV
$U > 50$ KV	HTB	HT (Haute tension) THT (Très haute tension)	63-90-150-225-400 KV

I.5 Types des lignes électriques

Les lignes électriques sont des infrastructures qui permettent de transporter l'énergie électrique d'un point à un autre. Elles font partie principale du réseau de distribution ou de transport de l'électricité et se composent généralement de câbles ou de conducteurs suspendus sur des pylônes (pour les lignes aériennes) ou enterrés (pour les lignes souterraines) ou immergés dans l'eau (pour les lignes sous-marines). Les lignes électriques relient les centrales électriques, les sous-stations et les différents consommateurs (industriels, commerciaux, résidentiels), assurant ainsi la distribution de l'électricité.

I.5.1 Lignes électriques aériennes

Les lignes aériennes sont constituées de conducteurs nus en alliage d'aluminium, qui est moins bon conducteur que le cuivre de l'électricité mais qui présente l'avantage d'avoir une masse bien plus faible (contraintes mécaniques). Leur rôle principal est de transporter l'énergie électrique depuis les centrales de production jusqu'au réseau de distribution (figure I-3).



Figure I-2 : conducteur d'une ligne aérienne



Figure I-3 : ligne électrique aérienne

I.5.2 Lignes électriques souterraines

Les lignes électriques souterraines relient les postes électriques entre eux, facilitant ainsi le transport de l'énergie à très haute tension. Ces câbles sont enfouies à une profondeur généralement comprise entre 1,50 mètre et souvent plus de 2,50 mètres. Leur installation peut se faire aussi bien en zones urbaines que rurales.

- Le câble souterrain est composé des éléments suivants :
- une âme en cuivre ou aluminium, conductrice, nécessaire au transport de l'électricité.
- une isolation de haute qualité en polyéthylène.
- un écran servant à éliminer le champ électrique et les courants en cas de court-circuit ;
- une gaine extérieure.



Figure I-4 : différents câbles électriques souterrains



Figure I-5 : Ligne électrique souterraine

I.5.3 Lignes électriques sous-marines

Une ligne électrique sous-marine est un câble électrique immergé dans l'eau, généralement utilisé pour transporter de l'énergie électrique entre deux points séparés par une étendue d'eau (mer, océan, lac, etc.). Ces câbles sont conçus pour résister à des conditions environnementales difficiles, telles que la pression sous-marine, les courants marins, et la corrosion. Ils sont souvent utilisés pour relier des îles au continent, interconnecter des réseaux électriques entre pays, ou alimenter des plateformes offshore.



Figure I-6 : différents câbles sous-marins

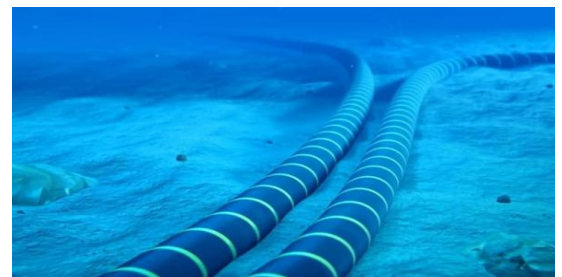


Figure I-7 : ligne électrique sous-marine

I.6 Lignes électriques aériennes

Une ligne électrique aérienne est un type de ligne de transmission d'électricité qui est suspendue dans les airs à l'aide de poteaux ou de pylônes. Ces lignes transportent l'électricité sur de longues distances, généralement depuis des centrales électriques vers des zones résidentielles, industrielles ou commerciales. Les avantages des lignes aériennes incluent un coût initial moins élevé par rapport aux lignes souterraines, mais elles peuvent être plus vulnérables aux intempéries (comme les tempêtes ou les vents forts) et peuvent créer des nuisances visuelles.

Les lignes électriques aériennes sont disponibles en différents types et longueurs pour s'adapter à des charges de tension variables. Cela leur permet de répondre à l'ensemble des besoins d'alimentation électrique industrielle et résidentielle. Elles peuvent être classées en fonction de la tension et de la longueur :

- Classification selon la tension de la ligne
 - Basse tension (réseau de distribution)
 - Moyenne tension (réseau de distribution)
 - Haute tension (réseau de répartition)
 - Très haute tension (réseau de transport)
- Classification selon la longueur de la ligne
 - Lignes courtes
 - Lignes moyennes
 - Lignes longues

I.7 Éléments constitutifs d'une ligne aérienne

Les lignes électriques ont pour rôle principal d'assurer le transport de l'énergie sur de longues distances. Elles sont composées de trois phases, chacune pouvant être constituée d'un faisceau de un à quatre conducteurs, espacés de quelques centimètres. Cet espacement vise à réduire l'effet couronne, un phénomène responsable de pertes en ligne distinctes des pertes Joule. L'ensemble formé par ces trois phases constitue ce que l'on appelle un terme.

La ligne est protégée contre les coups de foudre par un ou plusieurs conducteurs de garde, placés au-dessus des conducteurs d'énergie, au point le plus haut du support, avec la fonction aussi de raccorder le réseau de la terre des supports et des postes.

Par ailleurs, plusieurs paramètres influencent les champs électromagnétiques générés par ces

lignes lorsqu'elles sont mises en service. Parmi eux, la nature, les dimensions ainsi que le type de pylônes choisis lors de la conception des lignes de transmission jouent un rôle déterminant. Contrairement aux autres composants des lignes, dont le choix est généralement dicté par des normes techniques [1].

Les composants de la ligne aérienne peuvent être classés en cinq catégories principales :

I.7.1 Conducteurs des lignes électriques aériennes

Les conducteurs sont des éléments fixés aux lignes électriques pour favoriser le passage de l'électricité d'un endroit à un autre. Ils contribuent également à renforcer la sécurité du réseau électrique.

Le choix des conducteurs est très important dans le projet des lignes électriques aériennes, les conducteurs peuvent en effet avoir une influence de 30 à 40% sur les coûts totaux de la ligne. Le type et la dimension du conducteur influencent les charges de vent, gel et tirage que les supports doivent supporter; en outre les flèches qui peuvent se former à cause du givre ou de la température élevée influencent les hauteurs des supports.

Les conducteurs traditionnels les plus utilisés sur les lignes à haute tension sont réalisés en :

- Alliage d'aluminium (AAAC « All Aluminium Alloy Conductor »),
- Aluminium et acier (ACSR « Aluminium Conductor Steel Reinforced »)
- Alliage d'aluminium (ACAR « Aluminium Conductor Alloy Reinforced ») – plus rare
- Alliage d'aluminium/acier (AASR « Aluminium Alloy Steel Reinforced ») – plus rare

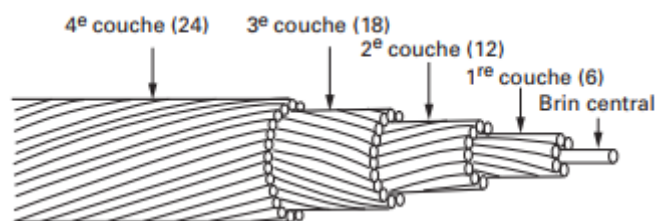


Figure I-8: conducteur équilibré (61 fils) [19].

Pour les lignes à haute tension, les conducteurs sont regroupés en faisceaux de deux à quatre par phase, espacés de manière appropriée (entre 0,4 et 0,5 m). Le nombre de conducteurs par phase est déterminé de façon à garantir une section en aluminium, ou en alliage d'aluminium, suffisante pour assurer le transport du courant électrique correspondant aux charges prévues.

Dans des cas particuliers de danger de formation de surcharge de givre ou neige sur le conducteur, il faut utiliser un ou deux conducteurs de grand diamètre (50 à 60 mm).

On voit dans le Tableau I-2 les caractéristiques géométriques, la masse par kilomètre et la portée de lignes équipées de différents types de conducteurs (les conducteurs aluminium/acier et l'alliage d'aluminium sont le plus utilisés) :

Tableau I-2 : caractéristiques principales des conducteurs pour lignes à haute et très haute tension [4].

Type conducteur (matière)	Diamètre [mm]	Section [mm ²]	Nombre de conducteurs par phase	Poids par tene [t/km]	Portée pour chaque tene de 400 kV [MVA]
Aluminium/acier	31.5	585	3	5.9	2037
Aluminium/acier	40.5	967	2	6.5	1860
Aluminium/acier	56.26	1866	1	6.3	1390
Alliage aluminium	31.05	570	4	6.3	2700
Alliage aluminium	44.00	1144	2	6.3	2090
Alliage aluminium	52.00	1600	2	8.8	2600

Sachant que les calculs de la portée ont été effectués avec un programme de calcul CIGRE, pour les conditions environnementales suivantes: température ambiante 30°C, vitesse du vent 2 km/h, direction du vent 90°, rayonnement solaire 900w/m². Les coefficients d'absorption et d'émission ont été réglés sur 0,5 et la température maximum de fonctionnement sur 75°C [4].

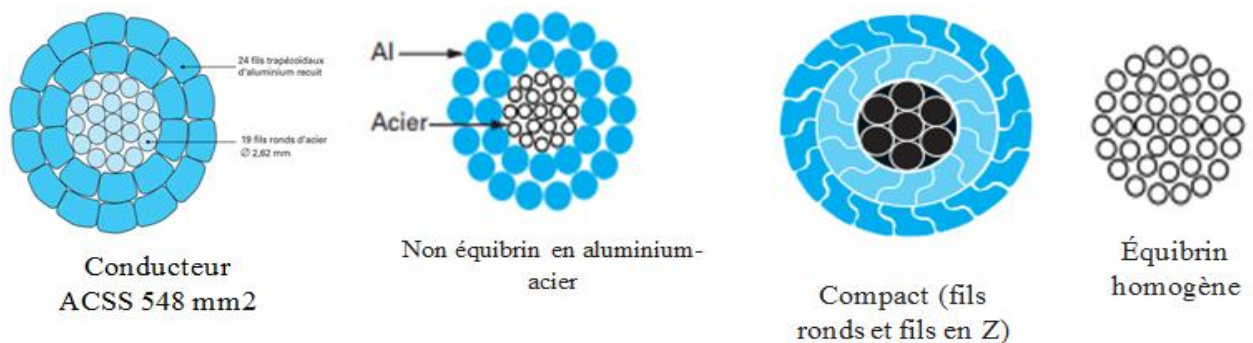


Figure I-9 : Conducteurs usuels [19]

I.7.2 Câble de garde

Le câble de garde est installé au sommet des pylônes ou des supports de lignes électriques à haute tension. Il n'est pas destiné à transporter du courant électrique, mais pour la protection des lignes contre les coups de foudre pour éviter une éventuelle surtension au niveau des conducteurs et mettre toute l'installation à la terre. Ils sont en général réalisés en almelec-acier.

Deux types des câbles de garde sont utilisés :

- Des câbles almélec-acier normaux.
- Des câbles almélec-acier comportant à l'intérieur des circuits de télécommunication.

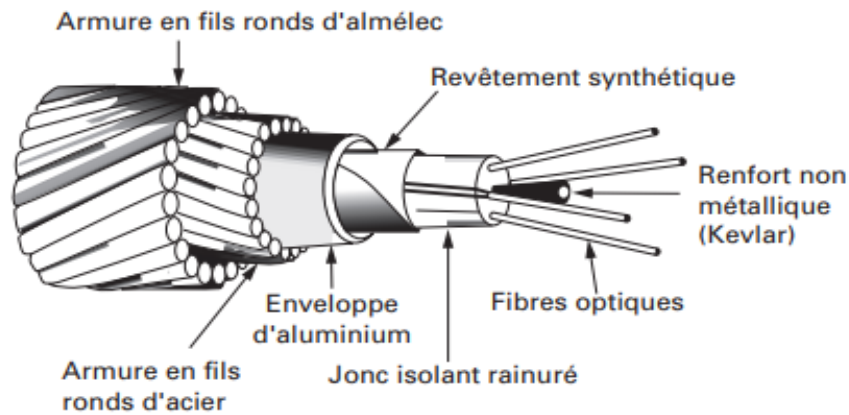


Figure I-10: Câble de garde à fibres optiques incorporées [19].

Un aperçu des principales caractéristiques des conducteurs de garde est reporté dans le Tableau I-3 :

Tableau I-3: caractéristiques des conducteurs de garde [4].

Type conducteur (matière)	Diamètre [mm]	Section [mm ²]	Poids [t/km]
Acier zingué	11.5	78.9	0.64
Acier recouvert d'aluminium	11.5	80.6	0.54
Acier recouvert d'aluminium	20.3	245.5	1.65
Acier + alliage d'aluminium	15.75	147.1	0.56
Acier + alliage d'aluminium	19.6	228	0.87
Acier + alliage d'aluminium + Aluminium (OPGW)	17.9	180	0.82
Acier + alliage d'aluminium + Aluminium (OPGW)	22.6	290	1.90
Acier + alliage d'Aluminium (OPGW)	19.2	157.4	0.92
Acier + alliage d'Aluminium (OPGW)	23.6	267.5	1.66

I.7.3 Supports de ligne

Les supports pour lignes électriques haut tension sont essentiellement constitués de charpentes métalliques boulonnées avec des fondations en général en blocs de béton armé.

Les supports autoporteurs sont réalisés avec 4 montants principaux, raccordés par des pylônes secondaires de stabilisation, culminant par des consoles placées dans la partie haute du support, transversalement par rapport à la direction de la ligne et sur lesquelles sont fixés le matériel

d'équipement et les isolateurs de jonction des conducteurs au support. Le support est raccordé de manière stable au terrain par des fondations séparées pour chaque montant ; on a donc 4 fondations par support (pieds). Chaque support est pourvu d'une prise de terre.

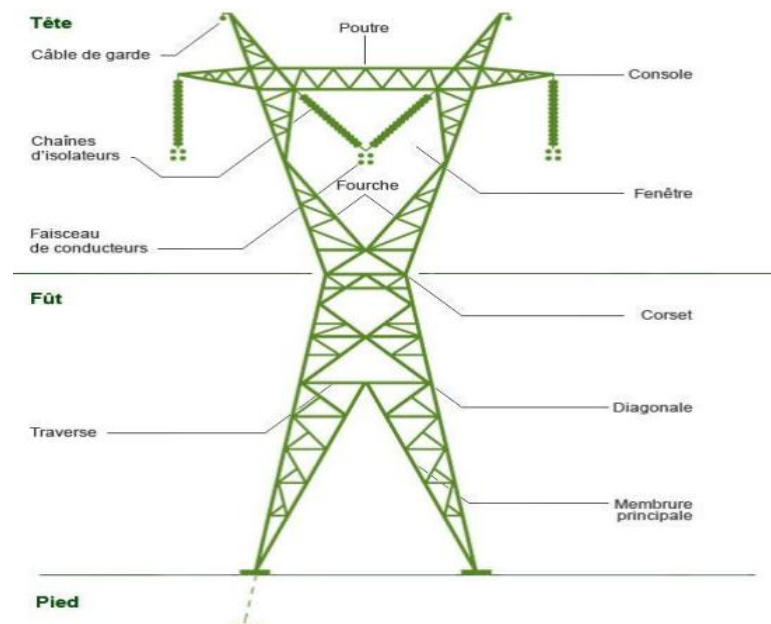


Figure I-11: pylône haut tension.

Les fondations sont généralement superficielles, d'une profondeur du plan de pose de 3 à 5 m par rapport au niveau du sol et réalisées avec une dalle et un fût pour chaque montant ; le montant est raccordé à la fondation par un pied en charpente.

Les fondations peuvent être de type profond réalisées, pour chacun des 4 pieds, avec des pannes mécaniques (1 à 2 m de diamètre et profondeur de 8 à 15 m). En montagne ou en présence de terrain rocheux, il est possible d'utiliser des fondations à ancrage dans le rocher.

Les pylônes du réseau haut tension sont conçus de manière à répondre de façon optimale aux critères de dimensionnement ainsi qu'aux particularités territoriales locales. Parmi les types de pylônes les plus couramment utilisés, on peut citer :

- Poteau simple terre : représenté schématiquement dans la Figure **a**.
- Poteau « Double drapeau », montré à la Figure **b**.
- Poteau « Danube », dont la structure est montrée à la Figure **c**.

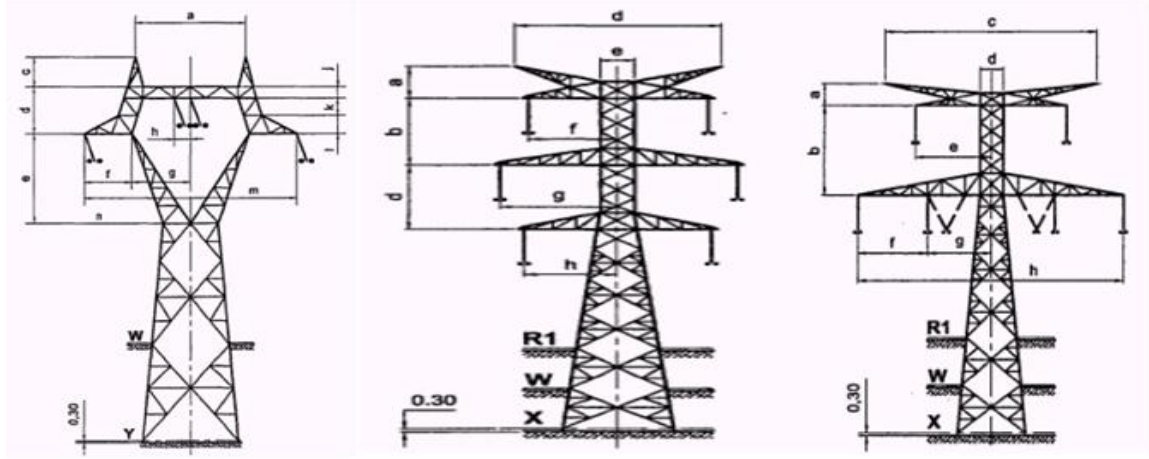


Figure I-12 : schéma du support

Selon la position le long du parcours, on utilise différents types de supports :

- le support d'alignement est utilisé dans les parties de ligne rectilignes ou qui présentent des angles de tracé jusqu'à 5° .
- Le support d'angle souple est utilisé dans le cas d'angles de tracé jusqu'à 30° . Dans ce cas on utilise des chaînes d'isolateurs en L et des géométries de support particulières.
- Le support d'ancrage est utilisé pour des angles de tracé supérieurs à 30° et en cas de charges verticales négatives (poteau tiré vers le haut).
- Le support d'arrêt terminal est utilisé au point d'interruption d'une ligne aérienne (à l'entrée de la ligne dans un poste, dans un passage de ligne aérienne à câble souterrain etc.); ces supports sont dimensionnés de façon à pouvoir supporter la charge mécanique due à l'ancrage des conducteurs d'un seul côté du poteau: cette charge est fortement déséquilibrée [4].

La géométrie d'un support de ligne électrique résulte d'un compromis entre plusieurs paramètres : l'empattement au sol, la disposition des points d'accrochage des conducteurs, ainsi que la résistance mécanique globale de la structure. Un ratio empattement/hauteur ne doit pas dépasser une valeur spécifique, définie comme une exigence particulière dans l'étude de conception de toute nouvelle famille de supports. À cela s'ajoutent des considérations esthétiques, qui peuvent conduire à la création de structures plus sobres, comme les supports monopodes [1].

Les principales configurations d'accrochage des conducteurs sur la tête des pylônes sont les suivantes :

- **Type Chat** : Utilisé pour des supports simple ou double circuit, ce type place les conducteurs approximativement sur un même plan horizontal. Cela facilite l'évitement des croisements ou superpositions de phases, mais entraîne un large étalement en largeur. Ce type de support n'est toutefois pas compatible avec le déroulage des conducteurs par hélicoptère.

- **Type Double drapeau** : Adapté aux pylônes doubles circuit, il permet une réduction de la largeur de la nappe de conducteurs, au prix d'une hauteur plus importante. Cette disposition accroît néanmoins le risque de télescopage entre les câbles de garde et les phases superposées.
- **Type Triangle** : Cette configuration combine les avantages des deux précédentes, avec une meilleure compacité. Toutefois, elle ne permet pas l'intégration de deux circuits sur un même support.

I.7.4 Isolateurs de lignes électriques

Les isolateurs permettent d'attacher les conducteurs à la structure métallique de support qui n'est pas sous tension, sans que se produisent de contournement électrique. Leur nombre dépend de la tension de la ligne, des conditions de pollution de l'air dans les zones traversées et de l'altitude du tracé des lignes. Ceux qui sont le plus utilisés sont traditionnellement les éléments simples reliés les uns aux autres formant une chaîne flexible ; ils sont formés d'une capot et d'une tige en acier avec du verre trempé comme élément isolant (Figure). Dans de nombreux Pays, on utilise la céramique à la place du verre trempé. L'isolateur peut être réalisé en porcelaine avec une tige isolante rigide [4].



Figure I-13 : Isolateur d'une ligne haut tension.

On distingue deux principaux types d'isolateurs :

I.7.4.1 Isolateurs de type rigide

Un isolateur rigide est relié au support par une ferrure fixe (Figure I.2). Tous les isolateurs rigides normalisés sont livrés avec une douille scellée de telle façon qu'ils puissent être vissés directement sur les ferrures correspondantes. Ce type d'isolateurs est utilisé pour les lignes aériennes qui ne dépassent pas le niveau de tension de 60 kV.

I.7.4.2 Isolateurs suspendus ou éléments de chaîne

C'est un isolateur constitué par un matériau isolant équipé de pièces métalliques de liaison, nécessaires pour le relier de façon flexible à d'autres éléments de chaîne, à la pince de suspension

du conducteur ou au support. Ces éléments sont soumis principalement à des efforts de traction. Ils sont généralement utilisés en suspension et forment des chaînes d'isolateurs soit verticales (chaînes d'alignement), soit horizontale (chaînes d'ancrage). Il existe deux types principaux d'éléments de chaîne : L'isolateur capot et tige. L'isolateur long fut.

- Isolateurs à capot et tige : est constitué d'un bloc isolant portant à sa partie supérieure un capot scellé en fonte malléable et à l'intérieur une tige en acier, avec cannelures et dont la tête conique est également scellée dans le verre ou la porcelaine. L'extrémité inférieure de cette tige est arrondie et a les dimensions voulues pour pénétrer dans le capot de l'élément suivant, et y être maintenue par une goupille. L'assemblage consiste à effectuer un scellement du capot et du diélectrique par du ciment, puis celui de la tige et du diélectrique.
- Isolateur à long fût : Ils sont constitués d'un cylindrique plein en céramique, en porcelaine ou en matériaux synthétiques, muni d'ailettes. A chaque extrémité est fixée une pièce métallique de liaison celle-ci peut être enveloppante en forme de capot scellé autour des extrémités tronconiques prévues sur le cylindre, ou bien en forme de tige scellée dans une cavité prévue à cet effet. Ils peuvent être utilisés unitairement ou en série de plusieurs éléments en fonction de leur longueur et du niveau d'isolement requis [5].

Parmi les matériaux isolants utilisés pour la fabrication des isolatrices hautes tensions, on retrouve plusieurs types d'isolants solides tels que le verre, la céramique ou encore la porcelaine. Toutefois, l'usage de la porcelaine tend à diminuer ces dernières années en raison de deux inconvénients majeurs : son poids élevé et la difficulté à détecter les amorçages. C'est pourquoi l'attention se porte de plus en plus vers les isolateurs en matériaux polymères, qui offrent une alternative plus légère et plus performante dans certaines conditions [5].

I.7.5 Accessoires

En se trouve aussi différents accessoires de quincaillerie sont fixés aux lignes électriques, aux poteaux et aux pylônes pour faciliter la transition en douceur de l'électricité d'un endroit à un autre. Parmi les accessoires les plus courants utilisés sur les lignes électriques et les supports, on trouve :

I.7.5.1 Matériel d'équipement

Les conducteurs sont reliés à la chaîne des isolateurs et celle-ci au support au moyen de pièces en acier zingué qui assurent la tenue mécanique de la liaison, en maintenant sa liberté de mouvement dans l'espace, avec le seul élément rigide placé sur le support. Le matériel d'équipement est réalisé en acier de résistance contrôlée, généralement moulé.

Le raccordement doit être réalisé sans phénomènes électriques de dérangement ou dispersion de puissance. Ce matériel d'équipement de raccordement est accompagné de cornes de garde et raquettes.

I.7.5.2 Cornes de garde, raquettes et anneau pare-effluves

Sur les chaînes d'isolateurs de raccordement des conducteurs au support sont appliqués des dispositifs (cornes de garde) fixes réalisées en acier zingué pour obtenir la distance minimum entre la partie sous tension (conducteurs) et celle qui est mise à la terre (support), afin de constituer la voie préférentielle de décharge à la terre des éventuelles anomalies sur la ligne à un point établi.

Ces dispositifs sont aussi conformés de manière à ce que le champ électrique au lieu d'attache soit modulé pour réduire au minimum les effluves et les émissions de dérangements sonores ou radios.

I.7.5.3 Amortisseurs de vibration

Les conducteurs dans la portée sous la force du vent, surtout celui qui est régulier et continu, vibrent avec des conséquences négatives sur leur résistance mécanique. En effet, à long terme des ruptures sont possibles au point d'attache aux chaînes de suspension, points fixes où la vibration se bloque. Pour cette raison, des masses ou bretelles antivibratoires de protection sont appliquées aux points d'attache des conducteurs.

I.7.5.4 Entretoises

Quand les conducteurs sont installés au nombre de deux, trois au quatre par phase, dans le but de réaliser un faisceau, ils doivent être tenus en position par des dispositifs de spéciaux placés dans la portée à des distances fixes. Les entretoises remplissent souvent des fonctions antivibratoires.

I.7.5.5 Dispositifs de mise à la terre

Tous les supports des lignes de haute tension sont reliés de manière stable à la terre à travers un raccordement de la charpente de support au réseau de la terre de chaque support et à celle des postes électriques d'extrémité, afin d'assurer la sécurité de la dispersion dans le terrain d'éventuelles surtensions de la ligne. Tous les supports sont reliés entre eux par le conducteur de garde, qui a donc le rôle de rendre la ligne équipotentielle.

I.7.5.6 Des dispositifs de signalisation pour la navigation aérienne

La ligne est une structure principalement aérienne, en hauteur par rapport à la surface du terrain. A cause de cela, des signalisations de couleur rouge ou blanche sont appliquées sur les supports et sur les conducteurs les plus hauts pour rendre l'installation visible à qui vole à basse

altitude. Dans certains cas, l'installation est aussi signalée de nuit par des lampes suspendues aux conducteurs les plus hauts, allumées par l'induction du champ électrique de la ligne [4].

I.8 Généralités sur le champ électromagnétique

I.8.1 Caractéristiques de champ électromagnétique

Les champs électriques et magnétiques sont présents partout dans notre environnement. Nous vivons en permanence dans un champ électromagnétique, généré par des sources naturelles et artificielles. Les champs électromagnétiques naturels sont souvent statiques, comme ceux produits par le Soleil ou la Terre. D'autres champs, d'origine humaine, proviennent notamment des télécommunications, des appareils électriques domestiques et médicaux, des lignes de transport d'électricité, ainsi que de divers équipements utilisés au quotidien. Par conséquent, l'ensemble de la population est exposé, à des degrés divers, à ces champs électriques et magnétiques.

I.8.1.1 Champ électrique

Le champ électrique résulte d'une répartition inégale de charges électriques de polarités opposées. Il peut être défini comme l'ensemble des lignes de force responsables de l'attraction ou de la répulsion des charges (en fonction de leurs signes respectifs). On peut dire de façon simplifiée que le champ électrique est lié à la tension. La tension est exprimée en Volt (V) et le champ électrique en Volt par mètre (V/m) ; 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 [6].

I.8.1.2 Champ magnétique

Le champ magnétique correspond à l'ensemble des lignes de force générées par le passage d'un courant électrique. Il se manifeste dès qu'un courant circule dans un conducteur. L'intensité de ce champ dépend principalement de la force du courant électrique ainsi que de la distance entre le conducteur et le point de mesure.

Par exemple, un appareil électrique branché mais éteint émet uniquement un champ électrique. Une fois activé, il génère à la fois un champ électrique et un champ magnétique.

Il existe plusieurs unités pour mesurer le champ magnétique. Son intensité peut être exprimée en ampères par mètre (A/m). Cependant, on utilise plus fréquemment la densité de flux magnétique, exprimée en Tesla (T) ou en Gauss (G), sachant que 1 Gauss équivaut à 0,1 millitesla (mT).

Le champ magnétique n'est pas perturbé par la présence d'objets conducteurs. Il traverse librement diverses structures, y compris les bâtiments et le corps humain, sans subir de déformation.

I.8.1.3 Champ électromagnétique

Le champ électromagnétique comporte à la fois un champ électrique et un champ magnétique oscillant à la même fréquence. Ces deux champs, perpendiculaires l'un par rapport à l'autre se propagent dans un milieu selon une direction orthogonale (figure I-14). La propagation de ces ondes s'effectue à une vitesse qui dépend du milieu considéré. Dans le vide, la vitesse de propagation est égale à 3.108 m/s [7].

Un champ électromagnétique se caractérise notamment par la fréquence et la longueur d'onde du rayonnement engendré par la propagation de ce champ. La fréquence et la longueur d'onde d'un rayonnement électromagnétique sont inversement proportionnelles, plus la fréquence est élevée, plus la longueur d'onde est courte, Et vice-versa.

Elles sont unies par la relation suivante: $\lambda = c / \nu$

Avec :

- λ : longueur d'onde de l'onde électromagnétique.
- c : vitesse de la lumière (3.108 m.s^{-1}).
- ν : la fréquence de l'onde.

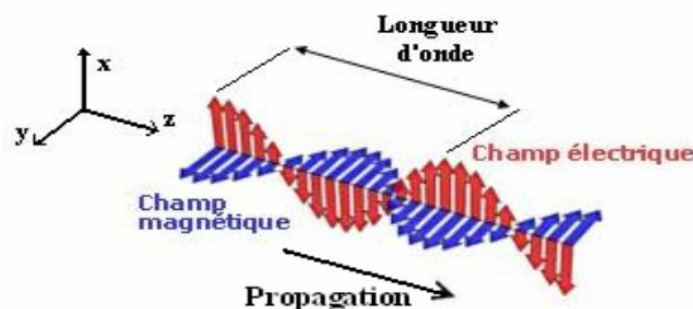


Figure I-14: Champ électromagnétique

I.8.2 Le spectre électromagnétique

En Algérie, l'électricité en courant alternatif est distribuée à une fréquence de 50 hertz (Hz), soit 50 cycles par seconde. Cela signifie que le courant change de polarité passant du positif au négatif à chaque demi-cycle. En Amérique du Nord et dans certains autres pays, la fréquence couramment utilisée est de 60 Hz.

Ces fréquences comprises entre 50 et 60 Hz correspondent à des longueurs d'onde relativement importantes. Beaucoup d'appareils libèrent des champs électromagnétiques de différentes fréquences. À titre de comparaison, un téléviseur fonctionne à des fréquences variant entre 55 et 890 MHz et les micro-ondes ont des fréquences supérieures à 1000 MHz [8]. La figure I-

15 présente le spectre de fréquence électromagnétique selon diverses sources. Les champs de fréquence extrêmement basse se situent dans la bande des 1 - 300 Hz, comparativement aux radiofréquences qui sont généralement représentées sur la bande des 10 000 Hz – 300 GHz. Les rayonnements ionisants se situent environ entre 10^{16} et 10^{22} Hz.

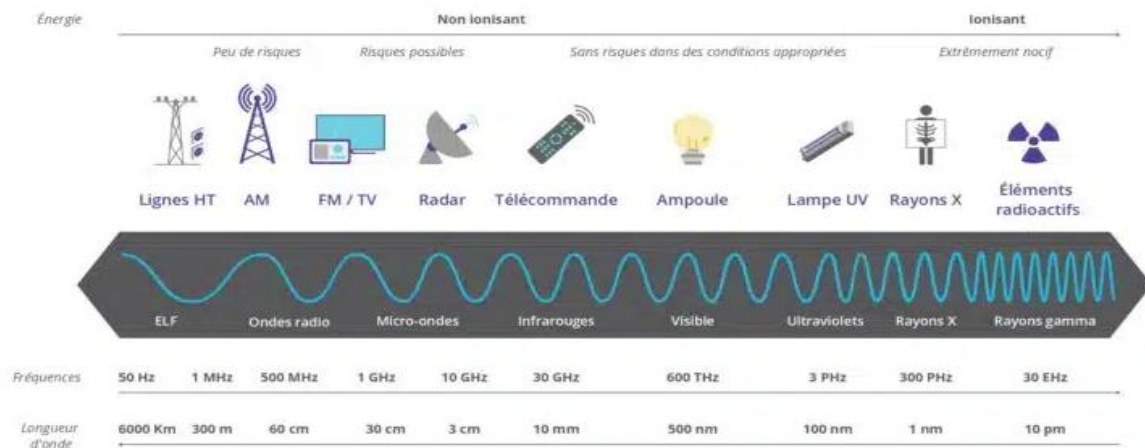


Figure I-15 : Spectre électromagnétique

Les rayonnements ionisants, tels que les rayons X et les rayons gamma, exercent des effets sur le système biologique qui diffèrent fortement de ceux des rayonnements non ionisants. En effet, les rayonnements ionisants sont capables de briser les liaisons moléculaires à l'intérieur des cellules, ce qui peut entraîner la formation de radicaux libres et causer des dommages cellulaires irréversibles. En revanche, les rayonnements non ionisants ne possèdent pas l'énergie suffisante pour provoquer de tels effets.

Par contre, lors d'exposition à des rayonnements de haute fréquence, tels les microondes, l'énergie émise des champs électromagnétiques est absorbée rapidement par le tissu biologique et peut ainsi produire de la chaleur. L'échauffement excessif des tissus peut entraîner des effets néfastes sur la santé. Les champs de 50 Hz, tels que ceux retrouvés près des lignes de transport d'électricité, ne permettent qu'un transfert minime d'énergie aux objets conducteurs, comme le corps humain. Par exemple, à intensité équivalente, l'énergie absorbée par une personne sera de plusieurs millions de fois inférieure lors d'une exposition aux champs émis par une ligne à haute tension de 50 Hz comparativement à ceux émis par un téléviseur. Lors de l'évaluation du risque, il faut donc distinguer entre une exposition aux champs électromagnétiques à haute fréquence et ceux à basse fréquence.

I.8.3 Sources de champ électromagnétique

Nous sommes exposés en permanence dans notre quotidien à de multiples champs électriques et magnétiques. Certains sont d'origine naturelle, d'autres sont créés par les activités

humaines, par exemple par le transport et la distribution de l'électricité, mais aussi par toutes les applications consommatrices d'électricité.

Les sources de champ électromagnétique sont diverses et nombreuses. Elles peuvent être naturelles ou artificielles.

I.8.3.1 Sources naturelles

La plupart des champs électromagnétiques naturels ont une fréquence de 0 Hz : ce sont des champs statiques, tels que le champ magnétique terrestre qui oriente l'aiguille aimantée de la boussole, et le champ électrique atmosphérique, qui peut atteindre des valeurs très élevées sous les nuages orageux et aux niveaux des pôles terrestres. Toutefois, d'autres sources naturelles produisent, quant à elles, des champs électromagnétiques qui varient dans le temps et dont certains ont une fréquence très élevée. On peut citer : l'électricité statique, la foudre et les rayonnements électromagnétiques à très haute fréquence.

I.8.3.2 Sources artificielle

Dans l'environnement électromagnétique à basse fréquence, les réseaux de haute tension ainsi que les appareils industriels et domestiques constituent les principales sources de champs électriques et magnétiques. On peut citer deux milieux qui représentent couramment des sources de champs à basse fréquence : environnements général et domestique et les lieux de travail [9].

➤ Environnements général et domestique : les champs électromagnétiques de basse fréquence proviennent principalement des lignes électriques à haute tension et des équipements électriques. Sous les lignes aériennes, les champs peuvent atteindre 12 kV/m (électrique) et 30 μ T (magnétique), tandis qu'à proximité des centrales ou sous-stations, ces valeurs peuvent monter jusqu'à 16 kV/m et 270 μ T. Dans les habitations, l'intensité des champs dépend de la distance aux lignes, du type et du nombre d'appareils utilisés, ainsi que de l'installation électrique. Les champs électriques domestiques sont généralement inférieurs à 500 V/m et les champs magnétiques à 150 μ T, bien que des pics plus élevés puissent survenir à proximité immédiate des appareils.

➤ Environnement professionnel : Dans les industries, les champs électriques peuvent excéder 25 kV/m et les champs magnétiques atteindre 2 mT dans certaines zones, comme les centrales. Des expositions extrêmes sont observées chez les soudeurs (jusqu'à 130 mT) et près de certains équipements comme les fours à induction (jusqu'à 50 mT). À l'opposé, les bureaux génèrent des champs bien moindres [9].

I.9 Le champ électromagnétique généré par les lignes électriques aériennes

Le champ électrique apparaît dans les lignes de transmissions s'il y a des tensions dans les phases des lignes et ne dépend pas du courant électrique qui les traverse. S'il y a des courants dans les conducteurs, en plus du champ électrique, un champ magnétique est formé autour de la ligne de transmission. L'intensité des champs électrique et magnétique est maximale à proximité de leur source et décroît rapidement avec l'éloignement au droit de la ligne.

I.9.1 Champ Electrique Rayonné par les lignes aériennes

Dans le cas des lignes de transport d'électricité, plus la tension est élevée, plus l'intensité du champ électrique généré est importante. Ce champ est une grandeur vectorielle, caractérisée par son intensité et sa direction, représentées par deux composantes : horizontale et verticale.

Le champ électrique est perturbé par la présence d'objets conducteurs tels que la végétation, les terrains irréguliers, les bâtiments. Le corps humain étant également conducteur, il se crée une distorsion du champ à la surface de celui-ci, principalement au niveau de la tête. L'exposition au champ électrique sera donc fonction des mouvements du corps ainsi que de la position de ce dernier. Elle dépendra également de la présence dans l'environnement de tout autre objet conducteur.

Plusieurs facteurs influencent l'intensité du champ électrique émis par les lignes à haute tension, notamment [10] :

- La distance entre les conducteurs et le sol.
- L'espacement entre les phases si nous avons deux circuits l'un à côté de l'autre ainsi que la configuration géométrique des conducteurs.
- Par le milieu environnant (si nous avons grand objet à proximité comme les arbres, Clôtures.
- La distance tangentielle à l'axe de la ligne de transmission.
- L'altitude du point de mesure par rapport à la terre et la tension de la ligne.

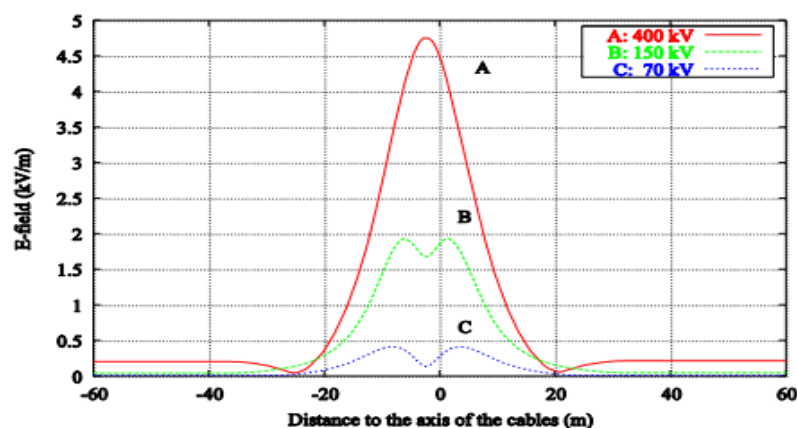


Figure I-16: Valeurs typiques du champ électrique à 1,5 m du sol [12]

I.9.2 Champ Magnétique Rayonné par les lignes aériennes

Le champ magnétique dépend des positions géométriques du point de mesure, de la distance qui sépare les phases des lignes et de leurs hauteurs géométriques par rapport au sol ; il ne dépend pas du niveau de tension mais il est directement proportionnel au courant transporté par la ligne. Le champ magnétique varie beaucoup plus avec la variation de la charge de la ligne et il est affecté par plusieurs facteurs :

- Les intensités des courants qui circulent dans les conducteurs.
- La garde au sol de la ligne ; nous pouvons remarquer que l'intensité du champ magnétique est maximale sous les conducteurs et diminue rapidement avec l'éloignement de la distance à l'axe du pylône.
- L'espacement des conducteurs par rapport à l'axe du pylône ainsi que la transposition des phases diminuent le champ magnétique. Par exemple, pour une ligne "non transposée" si les phases des deux côtés de la ligne sont dans le même ordre de haut en bas, nous avons un champ magnétique qui diminue avec l'inverse du carré de la distance de la ligne. Alors que pour les lignes "transposée" les permutations des phases des deux côtés de la ligne donnent une réduction du champ magnétique qui est inversement proportionnelle au cube de la distance [11].

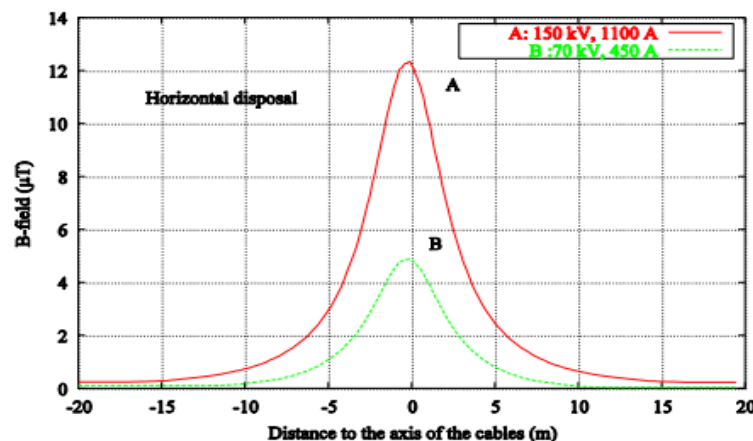


Figure I-17: Valeurs typiques du champ magnétique à 1,5 m du sol [12].

I.9.3 Niveaux de champs rayonnés

Le champ magnétique à la fréquence de 50/60 Hz, produit par les réseaux électriques, est proportionnel à l'intensité du courant circulant dans les conducteurs. Toutefois, son intensité diminue rapidement avec la distance, selon une relation inversement proportionnelle. De la même manière, le champ électrique émis par les lignes électriques décroît rapidement à mesure que l'on s'éloigne des câbles.

Le tableau I-4 présente les valeurs typiques des ordres de grandeur de champs électrique et magnétique induits par les lignes électriques aériennes, conformément aux données issues des sources de référence [13].

Tableau I-4 : valeurs typiques des ordres de grandeur de champs électrique et magnétique

lignes aériennes	Distance	Champ électrique (V/m)	Champ magnétique (μ T)
400 KV	Sous la ligne	5000	30
	A 30 m de l'axe	2000	12
	A 100 m de l'axe	200	1.2
225 KV	Sous la ligne	3000	20
	A 30 m de l'axe	400	3
	A 100 m de l'axe	40	0.3
90 KV	Sous la ligne	1000	10
	A 30 m de l'axe	100	1
	A 100 m de l'axe	10	0.1
20 KV	Sous la ligne	250	6
	A 30 m de l'axe	10	0.1
	A 100 m de l'axe	Négligeable	Négligeable
230 V	Sous la ligne	9	0.4
	A 30 m de l'axe	0.3	Négligeable
	A 100 m de l'axe	Négligeable	Négligeable

I.9.4 Les phénomènes de couplage électrique et magnétique

Le couplage magnétique et électrique dans les lignes électriques aériennes résulte des interactions électromagnétiques entre les conducteurs de lignes à haute tension et leurs environnements voisins, qu'il s'agisse d'autres circuits conducteurs ou de structures métalliques. Ce phénomène est essentiel à comprendre dans le cadre de la gestion des champs électromagnétiques dans les réseaux de transport d'électricité, notamment pour minimiser les risques de perturbations ou de dommages sur les équipements voisins.

On parle de couplage magnétique ou inductif pour le champ magnétique et de couplage électrique ou capacitif pour le champ électrique.

I.9.4.1 Couplage électrique (ou capacitif)

Au même titre que le courant dans une ligne peut induire des tensions par couplage magnétique dans une structure métallique adjacente, la tension de la ligne peut influencer par couplage électrique des objets conducteurs situés dans son voisinage.

Ce phénomène présente en règle générale moins d'inconvénients ou de risques que le

couplage magnétique mais il est plus facilement perceptible même sur des objets de petites dimensions. Il peut aussi être perçu par l'homme ou l'animal, principalement par le léger mouvement des cheveux ou des poils qu'il provoque.

La mise à la terre de l'objet subissant l'influence capacitive suffit à supprimer tout effet.

Dans le cas d'une liaison électrique souterraine, le champ électrique est confiné à l'intérieur des câbles et il n'y a pas de couplage capacitif. Seules les liaisons aériennes peuvent être à l'origine de couplages électriques.

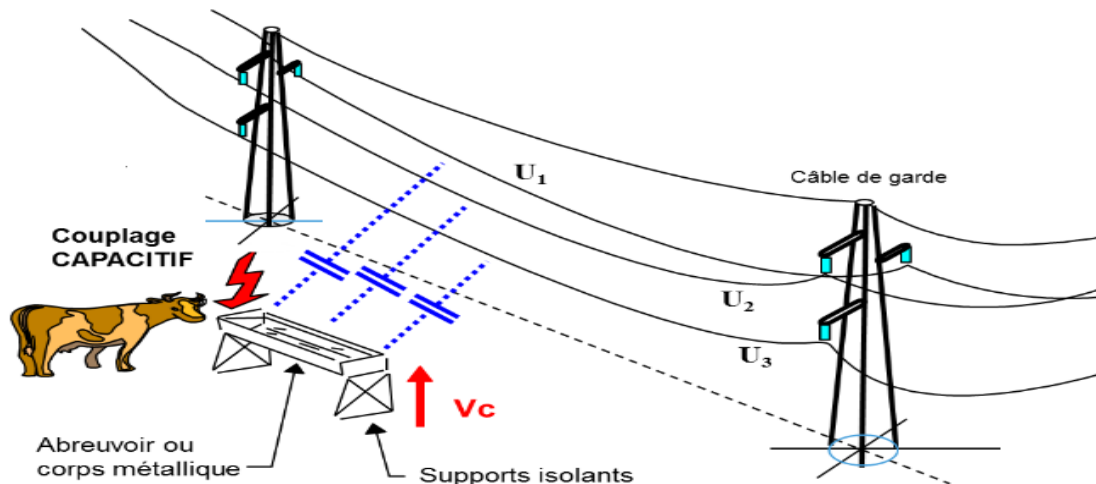


Figure I-18: Couplage capacitif (lié au champ électrique) [14]

I.9.4.2 Couplage magnétique (ou inductif)

Le couplage magnétique est directement lié au courant électrique circulant dans les conducteurs. En raison de l'effet d'induction électromagnétique, un champ magnétique variable est généré autour de la ligne. Ce champ magnétique peut induire une tension dans des conducteurs voisins et sur des éléments métalliques proches, même en l'absence de contact direct avec la ligne à haute tension. C'est le cas, par exemple, pour les canalisations métalliques (par exemple eau, gaz ...), les circuits de télécommunication sur support métallique, les charpentes métalliques de bâtiment, les barrières métalliques.

La magnitude du champ magnétique est proportionnelle à l'intensité du courant dans la ligne et dépend de la position relative de l'objet récepteur par rapport à la ligne de transmission.

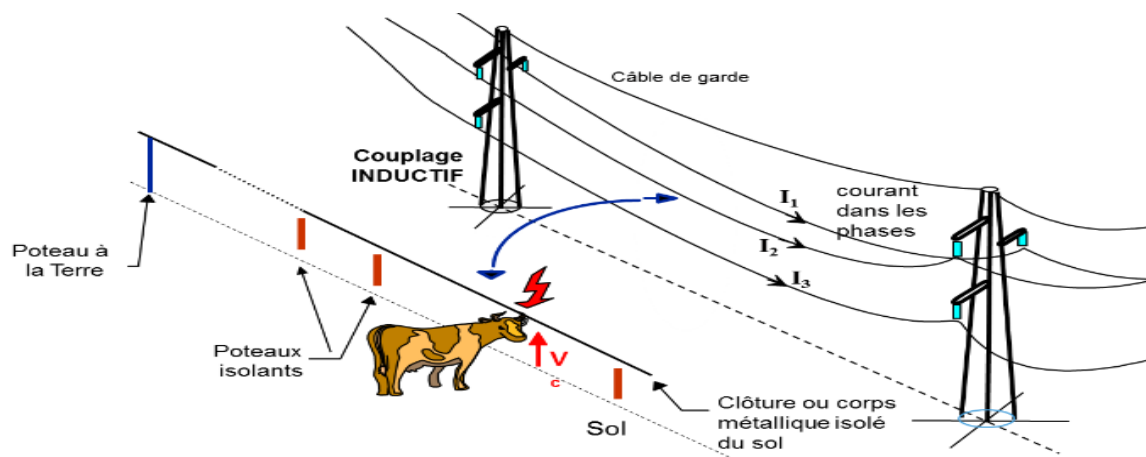


Figure I-19 : Couplage inductif (lié au champ magnétique) [14]

I.9.5 Interaction du champ électromagnétique à 50 Hz avec le corps humain

Les études récentes mettent en évidence que les champs électromagnétiques peuvent exercer des effets physiologiques sur les milieux biologiques. Lorsqu'un tissu ou une cellule biologique est exposé à un champ électromagnétique, une interaction se produit avec les charges électriques présentes, pouvant conduire à un effet biologique mesurable.

L'être vivant peut être globalement considéré comme un ensemble de processus électriques avec des mécanismes biochimiques complexes.

L'exposition à un champ électromagnétique entraîne l'induction de champs électriques internes ainsi que la génération de courants induits, susceptibles d'interférer avec les courants naturellement présents dans le corps.

L'intensité et la répartition spatiale de ces champs induits dépendent de plusieurs facteurs : la nature du champ externe (électrique ou magnétique), ses caractéristiques physiques (fréquence, amplitude, orientation, forme d'onde), ainsi que la morphologie, la taille et les propriétés électriques du corps exposé [11].

I.9.5.1 Interaction liée au champ électrique

Le champ électrique alternatif externe, généralement vertical (près du sol) dans les situations typiques, induit des parcours de courant alternatifs (principalement verticaux) dans le corps (Figure I-20). En effet, le champ électrique alternatif externe est fortement influencé par la présence d'un corps dans le champ. Comme le corps est beaucoup plus conducteur que l'air environnant, il y a des distributions de charges à sa surface qui annulent partiellement le champ électrique à l'intérieur du corps. Le champ électrique interne est quasi-nul en raison de l'effet combiné du champ externe et des charges de surface induites. En raison de la fréquence (50 Hz), il y a une migration permanente des charges qui produit un courant alternatif à l'intérieur du corps. Comme ces charges dépendent des conditions externes, il existe un champ électrique interne qui correspond uniquement à une

chute de tension ohmique due à la résistivité (inverse de la conductivité) des différentes parties du corps. Le soi-disant "courant d'induction électrostatique" suit des parcours plus ou moins verticaux à travers le corps. Certains de ces parcours traversent la moelle osseuse [11].

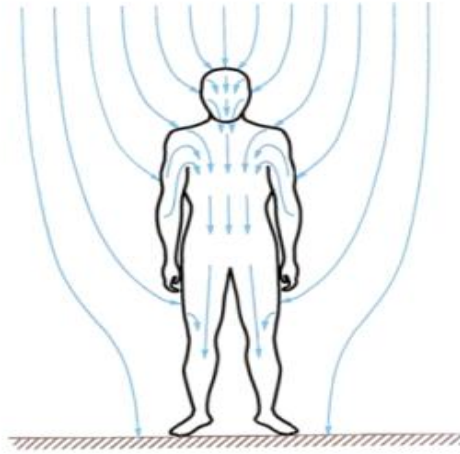


Figure I-20 : courant induit par un champ électrique [12]

I.9.5.2 Interaction lie au champ magnétique

Un champ magnétique externe alternatif induit un courant dans le corps et donc un champ électrique interne (donné par la loi d'Ohm), comme dans tout matériau conducteur. Le champ magnétique externe, horizontal dans les situations typiques, induit des boucles de courant dans le corps (figure I-21).

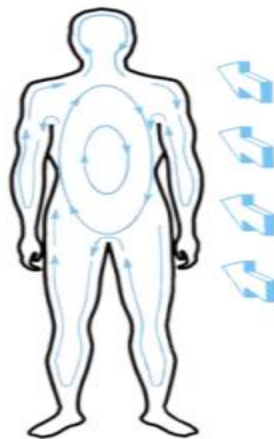


Figure I-21 : courant induit par un champ magnétique [12]

I.10 Effet du champ électromagnétique 50 Hz sur l'environnement et sante

Près de 40 ans que la science se penche sur la question des effets possibles du champ électromagnétique sur la santé humaine. Plusieurs centaines d'études épidémiologiques ont été réalisées auprès de divers groupes, tant chez les travailleurs du domaine de l'électricité que dans la population en général. En outre, un très grand nombre d'études expérimentales ont été menées en laboratoire sur les effets des champs électriques et magnétiques sur les cellules vivantes, sur diverses espèces animales et chez l'humain [15].

I.10.1 Effet du champ électromagnétique 50 Hz sur corps humain

L'exposition de la population aux champs électromagnétiques résulte de multiples sources. Que ce soit en milieu résidentiel, en milieu de travail ou lors de la fréquentation de lieux publics, l'intensité des champs électrique et magnétique variera en fonction du type de source émettrice et selon la distance à laquelle l'individu « exposé » se situe. Comme l'intensité du champ électrique peut être considérablement réduite par la présence d'objets faisant écran, l'intérêt des effets potentiels sur la santé liés à l'exposition au champ électromagnétique résultant des lignes de transport et de distribution de l'électricité s'est orienté vers le champ magnétique, qui passe librement à travers les structures et donc expose de façon plus constante la population générale. Ainsi, au cours des dernières années, les études ont principalement porté sur les effets du champ magnétique, tant au niveau du domaine de l'épidémiologie que des études expérimentales (chez l'humain, l'animal ou au niveau cellulaire). Il en va de même pour ce qui est des études d'exposition de la population où les niveaux de champ électrique ont été beaucoup moins évalués. Notons cependant que l'exposition personnelle au électrique est plus difficile à évaluer et que le peu d'études effectuées sur cette exposition est aussi lié aux difficultés techniques rencontrées lors de leur réalisation.

I.10.1.1 Effets directs à court terme

Les effets des champs électromagnétiques sur le corps dépendent de la fréquence et de l'intensité du champ. Pour les basses fréquences, dont celle de 50 Hz, il existe deux catégories d'effets à court terme sur l'organisme. La première concerne les effets sensoriels qui se manifestent par l'apparition de magnéto phosphènes (Tâches lumineuses dans le champ visuel liées à l'exposition au champ magnétique) et de modifications mineures passagères de certaines fonctions cérébrales, liés à une exposition de la tête. La seconde concerne les effets sur la santé qui se caractérisent par la stimulation des tissus excitables (muscles, nerfs, etc.) dans l'ensemble du corps. Ces différents effets sont réversibles et ne peuvent apparaître qu'à partir d'un certain niveau d'intensité de champ. Le respect des valeurs limites d'exposition fixées par le Code du travail garantit l'absence d'effets [16].

I.10.1.2 Effets directs à long terme

Les organisations de réglementation internationales concernant l'exposition professionnelle aux champs électromagnétiques précisent qu'elle ne traite pas des effets à long terme. En effet, il n'existe actuellement pas d'éléments scientifiques suffisamment probants permettant d'établir un lien de causalité avec certains effets avancés sur la santé. Toutefois, le Centre international de recherche sur le cancer (CIRC) a classé les champs magnétiques « extrêmement basses fréquences (50 Hz) » comme possiblement cancérogènes pour l'homme (catégorie 2B). Ce classement a été établi sur la base de résultats d'études épidémiologiques mettant en évidence un risque accru de leucémie chez des enfants résidant à proximité de lignes à haute tension. Cependant, les résultats d'autres études sont contradictoires et aucun mécanisme biophysique permettant de démontrer un possible lien n'a pu être mis en évidence [16].

I.10.1.3 Effets indirects (Courants de contact)

Les courants de contact sont des effets indirects des champs électriques et magnétiques. Ils peuvent se manifester lorsqu'une personne entre en contact avec un objet conducteur et que cette personne ou cet objet sont soumis à un champ électrique ou magnétique. Les mécanismes qui conduisent à l'apparition de ces courants de contact dépendent de la nature du champ et de l'isolement de la personne et de l'objet par rapport à la terre. À 50 Hz, le seuil de perception cutanée du courant est de 0,5 milliampère (mA), et une valeur déclenchant l'action de 1 mA a été définie dans le code du travail afin de se prémunir contre les effets néfastes liés aux courants de contact. Le risque de dépassement de cette valeur déclenchant l'action peut être maîtrisé en s'assurant que les objets conducteurs avec lesquels un contact peut être établi sont correctement reliés à la terre.

I.10.2 Recommandations et réglementations

L'ICNIRP (Commission Internationale pour la Protection contre les Radiations Non Ionisantes) est un organisme constitué d'experts scientifiques indépendants, dont le but est de surveiller et de disséminer les aspects importants des effets potentiels sur la santé des êtres humains à l'exposition des rayonnements non ionisants, dont les champs électromagnétiques très basses fréquences font partie. C'est en coopération avec l'OMS (Organisation Mondiale de la Santé) qu'ils publient des recommandations qui prennent en compte les effets sur la santé qui ont été scientifiquement établis.

I.10.2.1 Protection public

La protection du public contre les effets liés à l'exposition aux champs électromagnétiques repose sur le respect des valeurs limites d'exposition spécifiques.

L'implantation des ouvrages électriques est réglementée et prévoit, pour les réseaux électriques en courant alternatif, que la position des ouvrages par rapport aux lieux normalement accessibles aux tiers soit telle que le champ électrique résultant en ces lieux n'excède pas 5 kV/m et que le champ magnétique associé n'excède pas 100 μ T dans les conditions de fonctionnement en régime de service permanent. Le respect de ces niveaux d'exposition permet de garantir la non-apparition des effets directs décrits dans le paragraphe précédent.

Les entreprises du secteur des réseaux électriques doivent disposer de dispositifs de surveillance et de contrôle des ondes électromagnétiques. La réglementation impose au gestionnaire du réseau public de transport d'électricité, sous certaines conditions, de contrôler les champs électromagnétiques induits par les lignes dont la tension est supérieure à 50 kV.

I.10.2.2 Protection des travailleurs

La protection des travailleurs comporte des mesures de prévention d'ordre technique et organisationnel, ainsi que des programmes de protection individuelle. Il faut mettre en œuvre des mesures de protection adéquates lorsque l'exposition sur le lieu de travail a pour effet un dépassement des restrictions de base. En premier lieu, il convient, autant que faire se peut, de prendre des mesures de prévention technique, afin de réduire à des niveaux acceptables les champs émis par les équipements. Ces mesures comprennent notamment une conception satisfaisante du point de vue de la sécurité et, si nécessaire, l'utilisation de dispositifs d'inter verrouillage ou de mécanismes similaires destinés à la protection de l'opérateur.

Il est recommandé que des mesures d'ordre organisationnel, comme des restrictions d'accès et l'utilisation de signalisations auditives et visuelles, soient mises en œuvre en parallèle avec les mesures d'ordre technique. Si des mesures de protection individuelle, telles que des vêtements de protection, peuvent être utiles dans certaines conditions, elles ne sauraient constituer qu'un dernier recours pour assurer la protection des travailleurs ; il convient, autant que faire se peut, de donner la priorité aux mesures de prévention d'ordre technique et organisationnel. En outre, lorsque des équipements de protection individuelle tels que des gants isolants sont utilisés pour se protéger des chocs électriques, les valeurs limites d'exposition ne doivent pas être dépassées, l'isolation assurée par ces équipements ne protégeant que contre les effets indirects des champs.

Exception faite des vêtements de protection et autres équipements de protection individuelle, on peut appliquer les mêmes mesures à la population générale, lorsqu'il existe un risque que les niveaux de référence déterminés pour cette population soient dépassés.

Il est également indispensable d'établir et de mettre en application des règles permettant de prévenir [18]:

- les interférences avec des dispositifs ou équipements électroniques médicaux (en particulier, les stimulateurs cardiaques).
- la détonation des dispositifs électriques de mise à feu (détonateurs).
- les incendies et explosions résultant de l'inflammation de matières inflammables par des étincelles produites par un champ induit, un courant de contact ou une décharge disruptive [18].

I.10.3 Effet du champ électromagnétique 50 Hz sur les animaux modèles et de rente

Un certain nombre d'essais de terrain ont été conduits sur des bovins, ovins ou équins ainsi que chez des populations d'oiseaux sauvages vivant à proximité de lignes HT/THT.

En l'état actuel des connaissances, il est difficile de tirer des conclusions des résultats de ces essais de terrain compte tenu de la diversité des intensités du champ électromagnétique et des durées d'exposition, valeurs qui ne sont, dans certains cas, que des estimations en l'absence de données sur le temps réel passé par les animaux à proximité du champ le plus élevé généré par les lignes, et donc du degré d'exposition effectif. Les données sont également parcellaires dans le cas des animaux de rente, en productions porcine et avicole. Les données disponibles sur les animaux de rente sont encore trop limitées pour conclure quant aux effets des champs électromagnétiques sur leur comportement, à des intensités d'exposition inférieures à 100 μ T et en particulier pour des intensités de champ et des durées d'exposition bien définie.

Les travaux relatifs à l'effet des champs électromagnétiques extrêmement basse fréquence sur le comportement concernent plus particulièrement les espèces modèles de rongeurs. Elles montrent une diversité des paradigmes expérimentaux utilisés en milieu contrôlé, que ce soit sur l'intensité ou la durée d'exposition aux champs appliqués, sur les dispositifs de tests auxquels sont soumis les animaux ainsi que la nature des réponses observées (apprentissage, mémorisation, préférence, anxiété, etc.). La description des dispositifs d'exposition aux champs électromagnétiques est aussi, selon les études, relativement imprécise ce qui rend difficile de s'assurer d'une exposition efficace et par conséquent de la pertinence des effets rapportés. La variabilité dans les procédures expérimentales explique en partie la difficulté à conclure quant à des effets des champs électromagnétiques, en particulier dans le cas de champ électromagnétique extrêmement basse fréquence. Les données de la littérature sur les rongeurs incitent à rester prudents ; les effets ne sont observés qu'à des niveaux d'exposition très largement supérieurs à 100 μ T [17].

I.10.4 Effet du champ électromagnétique 50 Hz sur les plantes

Contrairement aux animaux, les plantes ne peuvent fuir les perturbations de leur environnement en raison de leur immobilité. Elles ont aussi une orientation constante par rapport aux champs électriques et champs magnétiques. Enfin, leur rapport surface/volume élevé expose un plus grand nombre de cellules aux variations de l'environnement [20] [21].

De nombreuses études en laboratoire ont démontré que les graines soumises à un magnétique extrêmement basse fréquence (16 à 60 Hz, 0,5 μ T à 2.000 mT) durant un prétraitement de quelques secondes à plusieurs minutes possédaient un meilleur taux de germination qui pouvait impacter la productivité ultérieure des plantes. Cet effet est cependant variable selon l'espèce végétale, voire la variété testée [20] [22].

Une étude de terrain menée en Autriche a révélé que les champs électrique et magnétique générés par une ligne haute tension (400 kV) n'affectaient pas la productivité du maïs, mais avaient en revanche un impact sur celle du blé d'hiver. Ces deux cultures ont été observées pendant plusieurs années à proximité de ces lignes [20] [23].

Sur une période de cinq ans, il a été observé que les plants de blé d'hiver situés à 40 mètres d'une ligne électrique produisaient en moyenne 7 % de grains en plus que ceux situés à seulement 2 mètres de celle-ci. Les distances testées étaient de 2, 8, 12 et 40 mètres, avec des intensités de champ électrique respectives de 4,0, 2,3, 1,0 et 0,2 kV/m, et de champ magnétique de 3,0, 2,9, 2,1 et 0,6 μ T. Les auteurs montrent également que les écarts de production étaient les plus prononcés durant les périodes de stress pour les cultures (années sèches ou humides). Ils soulignent par ailleurs que, dans l'ensemble, les effets liés à la distance par rapport aux champs électrique et magnétique demeurent limités en comparaison des variations dues au climat annuel et aux caractéristiques du sol. L'expérience a été lancée dix ans après l'installation de la ligne électrique aérienne, ce qui, selon les auteurs, réduit l'influence des perturbations du sol causées par les travaux. Par ailleurs, des mesures complémentaires ont été mises en place afin de limiter les variations du profil pédologique entre les parcelles expérimentales.

De manière similaire à ce qui a été observé avec le palmier à huile en Malaisie, l'exposition prolongée pendant 7 ans à un champ magnétique accru (de 0,30 à 1,39 mT) et à un champ électrique (de 0,14 à $60,9 \times 10^{-2}$ kV/m) émis par une ligne haute tension (275 kV, 50 Hz) a entraîné une augmentation de l'activité peroxydase (enzyme impliquée notamment dans la réduction du stress oxydatif et la construction de la paroi cellulaire) ainsi qu'une élévation des niveaux de pigments chlorophylliens chez la plante.

Ces modifications sont interprétées comme des indicateurs d'un stress physiologique induit par l'exposition aux champs électrique et magnétique à très basse fréquence, en particulier directement sous la ligne haute tension. Toutefois, l'étude ne fournit aucune donnée concernant l'impact de cette exposition sur la productivité de la plante en fonction de sa distance par rapport à la ligne [20] [24].

I.10.5 Conclusions pour les effets directs chez les animaux et les plantes

Une étude française a mesuré les champs électriques et magnétiques générés par des lignes haute tension de 50 Hz situées à proximité d'exploitations agricoles (moins de 200 mètres). Les valeurs relevées directement sous les lignes n'ont pas dépassé 8 μT pour le champ magnétique et 5 kV/m pour le champ électrique, conformément à la méthode de mesure standard. L'intensité de ces champs décroît rapidement avec l'éloignement de la ligne.

La valeur des champs magnétiques était inférieure à 3 μT et des champs électriques inférieurs à 43 V/m dans les bâtiments fréquentés par les animaux dans les exploitations proches des lignes. Les mesures correspondantes dans les exploitations à l'écart des lignes (plus de 200 m) donnent des valeurs maximales de 0,19 μT pour le champ magnétique et de 14,5 V/m pour le champ électrique.

De plus, des champs magnétiques pouvant atteindre 24 μT (entre 40 Hz et 10 kHz) sont générés à proximité des appareils électriques dans les bâtiments, notamment à ± 30 cm de la source. Ces appareils, qui peuvent fonctionner en continu ou de manière intermittente, créent des champs à des intensités variables, en fonction de la position des animaux dans le bâtiment.

En prenant en compte les champs potentiellement générés par les lignes, le rapport de l'ANSES (Agence Nationale De Sécurité Sanitaire) concluait qu'aucun effet n'a été démontré sur la santé et les performances des animaux des exploitations exposées directement à ces champs.

Par rapport au rapport ANSES (Agence Nationale De Sécurité Sanitaire) [25], la littérature scientifique reste partagée sur les effets ou les non effets des champs magnétiques extrêmement basse fréquences de quelques μT sur le fonctionnement des animaux mais aucun mécanisme plausible d'action n'a pu être démontré. Aucune étude menée après 2014 n'a permis d'examiner les effets directs des champs électriques et magnétiques à basse fréquence sur le long terme chez les animaux de ferme, dans des conditions parfaitement contrôlées, ni les effets des champs magnétiques intermittents, en fonction de la quantité de courant circulant dans la ligne. Deux études théoriques ont toutefois démontré qu'il est improbable que des champs magnétiques à basse fréquence de quelques μT aient un impact sur le fonctionnement cellulaire des animaux, en prenant en compte les champs induits et les connaissances biophysiques actuelles [20].

Chez les plantes, les champs magnétiques à basse fréquence de quelques μT peuvent altérer certains paramètres biologiques, bien que les effets sur la production végétale ne soient pas systématiquement démontrés. Plusieurs études se sont intéressées aux effets à long terme (durée de la culture du végétal), et tiennent probablement compte des variations intermittentes des champs magnétiques. Une étude a toutefois révélé que le rendement de l'une des deux plantes testées était significativement affecté par la proximité de la ligne, avec une réduction de la production de 7 % pour le blé d'hiver [20].

I.11 Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons découvert comment fonctionne le réseau électrique, en particulier les lignes électriques aériennes. Nous avons vu leurs différents types, leurs composants (comme les conducteurs, les isolateurs et les supports), ainsi que leur rôle dans le transport de l'électricité.

Nous avons aussi étudié le champ électromagnétique produit par ces lignes, et comment il peut agir sur l'environnement, les êtres humains, les animaux et les plantes. Des effets à court et long terme ont été présentés, ainsi que les mesures de protection pour limiter les risques.

En résumé, ce chapitre nous a permis de mieux comprendre le lien entre les lignes électriques et leur impact sur la santé et la nature, tout en soulignant l'importance de respecter les normes de sécurité.

Chapitre II

Formulation Mathématique Des Phénomènes Electromagnétiques

II.1 Introduction

Pour simuler un dispositif magnétique, il faut des caractéristiques électriques, magnétiques et géométriques des milieux. Les calculs du champ électromagnétique d'un câble deviennent simples avec les équations de Maxwell. Le deuxième chapitre aborde les équations de Maxwell et les modèles mathématiques des phénomènes électromagnétiques, ainsi que les méthodes numériques comme la méthode des éléments finis pour visualiser et calculer le champ magnétique.

II.2 Calcul du champ électromagnétique

L'étude magnétique de n'importe quel dispositif électrique nécessite la connaissance des champs électromagnétiques $\vec{B}$ et du $\vec{H}$ dans chaque parties est très nécessaire pour accès au calcul donc des valeurs du flux, l'effet inductif ou capacitif etc., elles sont en fonction du champ et de l'induction magnétique. Le calcul du champ magnétique est basé essentiellement sur l'exploitation des lois de l'électromagnétisme et la résolution des équations différentielles aux dérivées partielles de Maxwell qui constituent le modèle de départ.

II.2.1 Equations de Maxwell

James Maxwell (1831-1878), physicien écossais de talent exceptionnel, d'avoir unifié en 1865 ces deux théories de l'électricité et du magnétisme distinctes en une seule et unique dite « Électromagnétisme », cette théorie unifiée les quatre équations de Maxwell. La plupart des phénomènes électromagnétiques sont régis par les équations aux dérivées partielles de Maxwell qui doivent être adaptées au milieu à plusieurs domaines du dispositif à étudier. Tout dispositif électromagnétique En tout point de l'espace obéit aux équations suivantes:

$$\text{div} \vec{D} = \rho \quad \text{Loi de Maxwell-Gauss} \quad (\text{II-1})$$

$$\text{rot} \vec{E} = -\frac{\partial \vec{B}}{\partial t} \quad \text{Loi de Maxwell-Faraday} \quad (\text{II-2})$$

$$\text{rot} \vec{H} = \vec{J} + \frac{\partial \vec{D}}{\partial t} \quad \text{Loi de Maxwell-Ampère} \quad (\text{II-3})$$

$$\text{div} \vec{B} = 0 \quad \text{Loi de conservation du flux magnétique} \quad (\text{II-4})$$

Avec :

$\vec{E}$: Champ électrique en (v/m).

$\vec{B}$: Induction magnétique en (T).

$\vec{H}$: Champ magnétique en (A/m).

$\vec{J}$: Densité de courant en (A/m²).

$\vec{D}$: Induction électrique en (C/m²).

ρ : Densité de charge volumique en (C/m³).

$\frac{\partial \vec{D}}{\partial t}$: Densité de courant de déplacement en (A/m²).

A ces relations il faut rajouter les relations constitutives supplémentaires afin d'améliorer les équations de Maxwell en fonction des propriétés caractéristiques des milieux, qui s'écrivent sous les expressions suivantes :

- Propriétés magnétiques.
- Caractérisation diélectrique.

II.2.1.1 Propriétés magnétiques

Un milieu magnétique est caractérisé par les relations magnétiques, qui permettent d'exprimer l'induction magnétique en fonction du champ d'excitation pour les milieux isotropes on a :

$$\vec{B} = \mu_0 \vec{H} + \vec{B}_r \quad \text{Relation magnétique} \quad (\text{II-5})$$

$$\text{Ou} \quad \vec{B} = \mu \vec{H} \quad \text{Induction du champ magnétique} \quad (\text{II-6})$$

$$\mu = \mu_0 \mu_r \quad \text{Pour un milieu magnétique} \quad (\text{II-7})$$

$\mu_r = 1$ pour un milieu amagnétique.

μ_r perméabilité relative du milieu considéré.

$\mu_0 = 4\pi 10^{-7}$ perméabilité du vide (H/m).

II.2.1.2 Caractéristiques diélectrique

Induction du champ électrique est donnée par :

$$\vec{D} = \epsilon \vec{E} \quad \text{Relation diélectrique} \quad (\text{II-8})$$

Où : $\epsilon = \epsilon_0 \epsilon_r$ Avec

ϵ_0 : Permittivité de l'air et

ϵ_r : Permittivité relative du milieu considéré en (F/m).

Pour un milieu conducteur, la densité de courant est donnée par la loi d'Ohm généralisée :

$$\vec{J} = \sigma \vec{E} \quad (\text{Loi d'ohm}) \quad (\text{II-9})$$

Les densités des courants sont reliées entre eux par leurs milieux (conductivité électrique, perméabilité magnétique, etc.) à travers les équations exprimant les lois du comportement du milieu. L'expression détaillée des densités des courants sont données par:

$$\vec{J} = \vec{J}_s + \vec{J}_{ind} \quad (\text{II-10})$$

J_s : la densité de courant imposée dans l'inducteur

J_{ind} : la densité du courant induit.

$$\vec{J}_{ind} = \sigma [\vec{E} + \vec{v} \wedge \vec{B}] \quad (\text{II-11})$$

Où : σ : la conductivité électrique en (S/m).

v : le vecteur vitesse en (m/s).

$\sigma \vec{E}$: exprime le courant résultant du champ électrique $\vec{E}$.

$\sigma(\vec{v} \wedge \vec{B})$: exprime le courant résultant du mouvement.

II.2.1.3 Relations de continuité entre deux milieux différents

Si le système est composé de deux milieux différents, Les champs électriques et magnétiques des différents milieux sont liés à l'interface par des relations de continuité afin de relier deux milieux de propriétés électromagnétiques différentes. Soient deux milieux M1 et M2.

On appelle $(\vec{E}_1, \vec{B}_1, \vec{H}_1, \vec{D}_1)$ les différents champs de M1 et $(\vec{E}_2, \vec{B}_2, \vec{H}_2, \vec{D}_2)$: et de M2. Soit $\vec{n}_{\rightarrow 12}$ la normale unitaire à la frontière entre M1 et M2 dirigée de M1 vers M2 (Figure II.1).

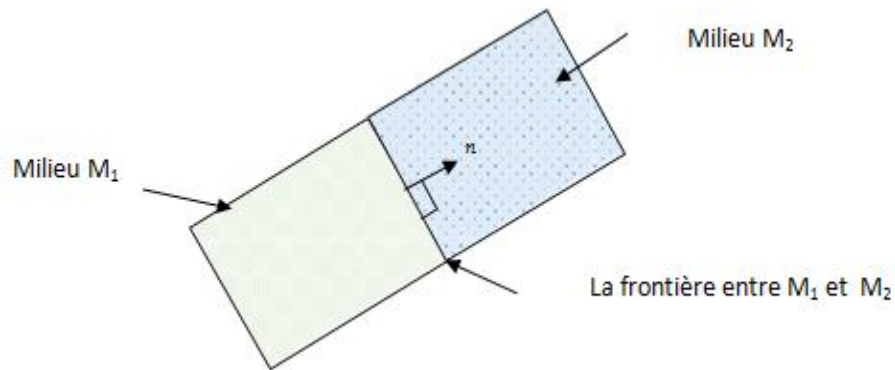


Figure II-1 : Interface entre deux milieux différents

Dans le cas général, un dispositif électrotechnique comporte des milieux différents (fer, air, aluminium, cuivre, ...etc.). Avant d'aborder la résolution du problème, il est nécessaire de connaître le comportement des champs électromagnétiques à travers l'interface entre deux milieux différents. En effet, la composante normale de l'induction B est continue au passage entre deux milieux différents.

II.2.1.4 Conditions de passage

La limite de séparation entre deux milieux de propriétés physiques différentes notés 1 et 2, les conditions de passage (transmission) permettent alors d'exprimer les relations entre deux grandeurs sur ces frontières, les grandeurs électromagnétiques pourraient être discontinues. Ces conditions sont traduites par les équations du type :

La continuité de la composante normale de l'induction magnétique

$$\vec{n} \cdot (\vec{B}_2 - \vec{B}_1) = 0 \quad (\text{II-12})$$

La discontinuité de la composante tangentielle du champ magnétique due aux courants surfaciques s'ils existent.

$$\vec{n} \wedge (\vec{H}_2 - \vec{H}_1) = \vec{J} \quad (\text{II-13})$$

La continuité de la composante tangentielle du champ électrique.

$$(\vec{E}_2 - \vec{E}_1) \wedge \vec{n} = 0 \quad (\text{II-14})$$

Discontinuité de la composante normale du vecteur d'induction électrique D , en présence de charges superficielles ρ_s

$$\vec{n} \wedge (\vec{D}_2 - \vec{D}_1) = \rho_s \quad (\text{II-15})$$

Ici $\vec{n}$ est le vecteur normal à l'interface dirigé du milieu vers un autre, $\vec{J}_s$ est la densité surfacique de courant à l'interface et ρ_s Densité de charge électrique surfacique à l'interface.

D'après les équations précédentes, on constate qu'il y a une continuité des composantes respectivement normale de l'induction magnétique $\vec{B}$ et tangentielle du champ électrique $\vec{E}$ et une discontinuité des composantes respectivement tangentielle du champ magnétique $\vec{H}$ et, normale de l'induction électrique $\vec{D}$ par la présence du courant et des charges surfaciques, à la traversée de la surface de séparation des deux milieux 1 et 2. Le système d'équations contient beaucoup d'inconnues et se prête donc mal à une résolution numérique.

II.3 Modèles électromagnétiques

La formulation mathématique des équations électromagnétiques à partir des équations de MAXWELL donne plusieurs modèles simplifiés comme :

- Modèle électrostatique.
- Modèle électrocinétique.
- Modèle magnétostatique.
- Modèle magnétodynamique.

II.3.1 Modèle Electrostatique

Dans ce modèle la répartition des charges électriques ne dépend pas de temps (régime stationnaire : cas de courant continu) de ce fait le champ magnétique crée ne varie pas dans le temps :

$$\frac{\partial \vec{B}}{\partial t} = \vec{0} \quad (\text{II-16})$$

Les équations de ce modèle se simplifient comme suit :

$$\begin{cases} \text{div} \vec{D} = \rho \\ \text{rot} \vec{E} = \vec{0} \\ \vec{D} = \epsilon \vec{E} \end{cases} \quad (\text{II-17})$$

La relation nous permet de définir le champ électrique en fonction du potentiel scalaire électrique V , telle que :

$$\vec{E} = -\overrightarrow{\text{grad}} V \quad (\text{II-18})$$

Le modèle se résume alors à l'équation suivante :

$$\text{div}(\epsilon \text{grad } V) + \rho = 0 \quad (\text{II-19})$$

II.3.2 Modèle magnétostatique.

Dans ce type le terme $\partial B / \partial t$ est nul. Ceci s'explique par le fait que le champ magnétique est produit par des sources indépendantes du temps.

II.3.2.1 Modèle magnétostatique scalaire.

Les courants électriques seront nuls, il vient alors que les champs ne dépendent pas du temps. On obtient alors les relations :

$$\text{Rot } H = 0 \quad \text{Courants nuls}$$

$$\text{Div } B = 0 \quad \text{Conservation du champ}$$

$B = \mu H + Br$ la loi du milieu,

H : Dérive d'un potentiel scalaire magnétique Φ , d'où la nomination du modèle magnétostatique scalaire, tel que : $H = -\text{grad}(\Phi)$

Le modèle se ramène alors à l'équation :

$$\text{Div}(\mu \text{grad}(\Phi)) = \text{Div} Br \quad (\text{II-20})$$

II.3.2.2 Modèle magnétostatique vectorielle.

Ce modèle est caractérisé par des courants électriques non nuls. On a alors l'équation :

$$\text{rot}\left(\frac{1}{\mu} \text{rot}(\vec{A})\right) = \vec{J} + \text{rot}\left(\frac{1}{\mu} Br\right) \quad (\text{II-21})$$

II.3.2.3 Formulation en termes de potentiel vecteur

Le potentiel vecteur magnétique $\vec{A}$ permet de simplifier les calculs et de diminuer le nombre d'inconnus. Ces formulations sont bien connues et très utilisées dans le domaine du calcul du champ électromagnétique. La relation de la conservation du flux magnétique permet de définir une fonction vectorielle A appelée potentiel vecteur magnétique telle que:

$$\vec{B} = \text{rot}(\vec{A}) \quad (\text{II-22})$$

En effet, puisque le rotationnel du gradient de toute fonction scalaire (f) est nul, d'où la nécessité d'imposer la condition de jauge afin d'assurer l'unicité de la solution. Nous proposons d'utiliser la jauge de coulomb pour assurer l'unicité de la solution :

$$\text{div}(\vec{A}) = 0 \quad (\text{II-23})$$

La formule du modèle magnétostatique vectoriel:

$$\text{rot}\left(\frac{1}{\mu} \text{rot}(\vec{A})\right) = \vec{J} \quad (\text{II-24})$$

II.3.2.3.1 Le calcul du champ magnétique des lignes électriques

Lorsque le courant n'est pas conservé, nous obtenons une accumulation de charge. Donner par $\text{div} J = -\frac{\partial \rho}{\partial t}$ dans le domaine temporel et $\text{div} J = -j\omega\rho$ dans le domaine fréquentiel. La combinaison avec la loi de Gauss $\text{div} D = \rho$ pour obtenir un ajustement de la loi de conservation du courant :

$div(J + j\omega D) = 0$ et $div(J + \frac{\partial D}{\partial t}) = 0$ lors de l'utilisation du champ électrique:

$$div(J + \epsilon \frac{\partial E}{\partial t}) = 0 \quad (II-25)$$

La deuxième partie de notre dérivation commence par la loi de maxwell -Ampères. Il y a une relation directe entre le champ magnétique H qui encercle un conducteur et le courant :

$$rot H = \dot{J} = J + j\omega D = \sigma E + j\omega \epsilon E = (\sigma + j\omega \epsilon) E \quad (II-26)$$

$$div(rot H) = div \dot{J} = div(J + j\omega D) = 0 \quad (II-27)$$

Nous avons maintenant appliqué la loi du gauss et la loi de maxwell Ampère.

$$rot H = rot (\mu^{-1}B) = \dot{J} = (\sigma + j\omega \epsilon) E \quad (II-28)$$

Si nous substituons la nouvelle équation de $B = (A)$ en équation de Maxwell-Faraday d'induction électromagnétique $rot E = -j\omega B$ on obtient :

$$rot E = -j\omega (rot A) = rot (-j\omega A) \quad (II-29)$$

La combinaison des équations précédentes donne :

$$rot (\mu^{-1}rot A) = (\sigma + j\omega \epsilon) (-j\omega A) \quad (II-30)$$

Après remplacement on obtiendra la formule de l'équation différentielle partielle finale pour l'effet inductif pour la variable A en magnétostatique suivante :

$$-\omega^2 \epsilon A + j\omega \sigma A + rot (\mu^{-1}rot A) = 0 \quad (II-31)$$

II.3.2.3.2 Le calcul du champ électrique des lignes électriques

La résolution du modèle en 2D par la loi de la conservation du courant dans le domaine fréquentiel électrostatique. Cela inclut les éléments suivants:

$$\begin{cases} E = -gradV \\ div \vec{D} = \rho \\ div J = -j\omega \rho \end{cases} \quad (II-32)$$

La loi de Faraday s'évalue à zéro:

$$\text{rot}(E) = -j\omega B = 0 \quad (\text{II-33})$$

Inclure le courant de déplacement dans la définition du courant, cela vous donne $\text{div } J' = 0$ et $J' = \sigma E + j\omega D$ pour la loi de conservation actuelle et la définition actuelle, respectivement. Nous obtiendrons l'équation différentielle partielle suivante pour la variable V :

$$-\text{div}((\sigma + j\omega\epsilon) \nabla V) = 0 \quad (\text{II-34})$$

L'interface « Electric Currents » utilise cette loi de conservation pour déterminer la valeur de V dans les domaines. Pour les limites de ce modèle, plusieurs conditions de Dirichlet sont utilisées. L'alimentation des trois phases est comme suite :

$$V_a = V_0 \quad V_b = V_0 e^{-\frac{j2\pi}{3}} \quad V_c = V_0 e^{+\frac{j2\pi}{3}}$$

II.4 Déclaration des conditions aux limites

Pour l'application des méthodes numériques (éléments finis) on distingue essentiellement deux types de conditions aux limites (conditions de Dirichlet et de Neumann).

Si le vecteur potentiel magnétique A est constant sur la frontière, ce qui veut dire que l'induction magnétique B est parallèle à ce contour qui présente alors une équipotentielle. On rencontre cette condition lorsqu'une partie ou tout le contour se trouve à une distance suffisamment éloignée des sources d'excitation, pour pouvoir négliger les valeurs du vecteur potentiel magnétique sur cette partie de la frontière par rapport aux valeurs de ce même potentiel à l'intérieur du domaine (c'est-à-dire on suppose que $(A = 0)$). Cette condition est la condition du Dirichlet.

Dans le cas où on a la dérivée du vecteur potentiel magnétique A par rapport au temps est différent de zéro, c'est-à-dire la condition aux limites de Neumann. Donc on spécifie les dérivées des valeurs que la solution doit vérifier sur les frontières/limites du domaine.

II.5 Les techniques de résolutions des équations aux dérivées partielles

Les méthodes de résolution des équations aux dérivées partielles dans les milieux linéaires nous pouvons citer :

- la méthode des différences finies(MDF)
- la méthode des éléments finis(MEF)
- la méthode des volumes finis(MVF)

- la méthode des intégrales de frontières(MIF)
- la méthode des circuits couplés(MCC).

L'objectif d'utilisation des méthodes numériques de discrétisation à pour but de ramener la résolution du système d'équations différentielles dans le domaine d'étude, compte tenu des conditions aux limites, à celle d'un système d'équation algébriques dont la solution conduit à la détermination des champs électromagnétiques et du déplacement.

II.5.1 Méthode des Eléments Finis (MEF) :

La méthode des éléments finis est consacrée pour les géométries complexes et aux matériaux non linéaires. Elle subdivise le domaine d'étude en domaines élémentaires appelés éléments finis, voir la figure (II.3). L'inconnue de chaque élément est exprimée par des fonctions d'interpolation simples en fonction des valeurs de l'inconnue en chacun des sommets de cet élément. En tenant compte des conditions de continuité à l'interface et au passage entre les milieux.

Pour des structures bidimensionnelles, les éléments de maillage sont triangulaires, pour les problèmes tridimensionnels les éléments sont tétraédriques ou prismatique.

La méthode des éléments finis en 3D en se basant sur l'approche résidus pondérés qui ne tient pas compte de l'aspect énergétique du problème traité. La méthode consiste à dissocier le domaine étudié en éléments finis, et approcher l'inconnu dans chaque élément par des fonctions d'interpolation. Ces fonctions sont généralement des polynômes de Lagrange de premier ou deuxième degré. L'interpolation dans un élément est effectuée en fonction de ses valeurs nodales, ce qui impose la continuité de l'inconnu sur les interfaces des éléments.

Le principe de la méthode des éléments finis est la transformation de l'équation aux dérivées partielles (EDP) qui régit le problème traité à un système d'équation algébrique dont la résolution permet de définir l'inconnu à un ensemble de points (nœuds) de la discrétisation. Consiste à découper la géométrie en un nombre fini du domaine (sous domaine).

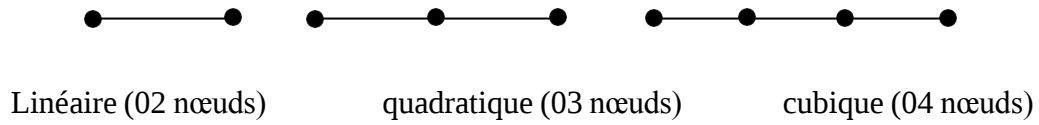
Il existe différents types d'éléments :

- élément linéique (1D).
- élément surfacique (2D).
- élément volumique (3D).

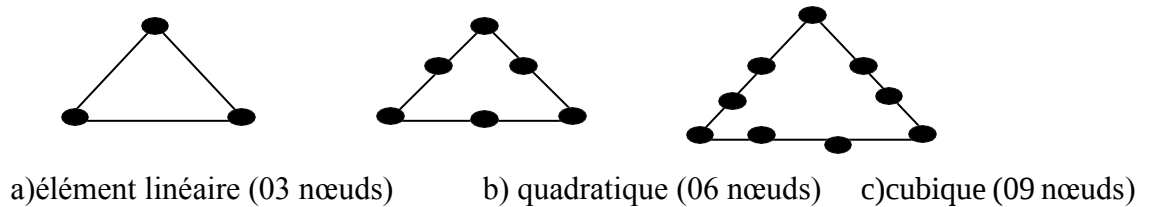
Pour notre cas le domaine d'étude, soit à deux dimensions, on rencontre le plus souvent des

éléments linéaires, quadratiques ou cubiques. Pour aboutir à une meilleur exactitude de la solution, on procède à raffiner le maillage.

A-Problème à une dimension (élément droit) :



B-Problème à deux dimensions (triangle ou quadrilatère)



C-Problème à trois dimensions

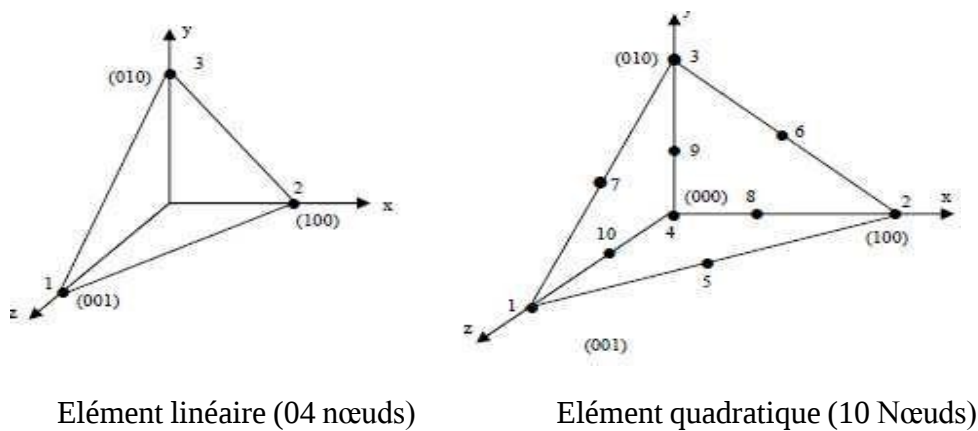


Figure II-2 Discrétisation du domaine d'étude (maillage)

II.5.1.1 Fonction d'approximation

Le potentiel vecteur magnétique $A \rightarrow$ dans un milieu peut être trouvée par des fonctions d'approximations (dites fonctions de formes), l'expression varie d'un type d'élément à un autre. Ces fonctions doivent garantir la continuité du potentiel aux interfaces de discrétisation. Généralement on utilise des fonctions polynomiales.

II.5.1.2 Formulation Intégrale

L'essentiel c'est d'avoir un système algébrique est la mise sous forme intégrale de l'équation aux dérivées partielles.

Comme avantage cette formulation nous permet d'avoir les expressions des éléments des différentes matrices et vecteurs du système algébrique élémentaire (dans un domaine).

La formulation intégrale peut être développée de deux manières:

Variationnelle et Résidus pondérés.

II.5.1.2.1 Formulation Variationnelle

Elle consiste à minimiser une fonctionnelle qui représente généralement l'énergie du système à résoudre. Le principe de base de cette méthode Variationnelle exige la connaissance de la fonctionnelle d'énergie du système. Cette fonctionnelle est résolue à partir du principe de l'action hamiltonienne qui définit l'existence d'une fonctionnelle de type intégral donné par :

$$\mathfrak{S}(A) = \int_{\Omega} L d\Omega \quad (\text{II-35})$$

L : la fonction de Lagrange qui assemble entre les énergies cinétique et potentielle du système. Ainsi que Ω c'est le domaine d'étude.

II.6 Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons défini les étapes pour réaliser une modélisation numérique des phénomènes électromagnétiques dans les câbles électriques aériennes, en utilisant la méthode des éléments finis. Nous avons discuté des équations EDP et des méthodes de résolution. Ce chapitre ouvre la voie à une étude en 3D à l'aide du logiciel COMSOL Multiphysics. La déclaration des propriétés et paramètres de simulation est cruciale. Diverses techniques existent pour quantifier le champ électromagnétique, et la simulation numérique assure un bon calcul de la distribution ce dernier.

Chapitre III

Résultats De Simulation Des Lignes Aériennes En 3D

III.1 Introduction

Il existe diverses méthodes numériques pour simuler les champs magnétiques et les champs électriques, et plusieurs logiciels ont été conçus pour aider les chercheurs à réaliser ces simulations et calculs. Pour notre étude et simulation, nous utilisons le logiciel COMSOL afin de calculer le champ électrique et magnétique autour des lignes de transport haut tension, en particulier celle de 400 kV, à travers plusieurs modèles.

L'objectif principal de ce chapitre est de présenter les simulations des champs électrique et magnétique générés par une ligne de transport électrique de 400 kV à l'aide du logiciel COMSOL. Le transport de l'électricité à haute tension, en particulier à 400 kV, est essentiel pour l'acheminement efficace de l'énergie sur de longues distances. Cependant, ces lignes de haute tension génèrent des champs électromagnétiques pouvant avoir des impacts sur l'environnement, la santé publique et l'efficacité du transport de l'énergie.

L'accent sera mis sur la modélisation de ces champs dans différents scénarios (courant de charge, hauteur des lignes, configuration du terrain, etc.), ainsi que sur l'étude des résultats, afin de mieux comprendre les effets de ces champs sur l'environnement, les personnes vivant à proximité des lignes haute tension, mais aussi sur les infrastructures sensibles telles que les pipelines métalliques de transport de pétrole et de gaz.

Les simulations permettent de mieux appréhender ces effets, de garantir la conformité aux normes de sécurité, et d'optimiser la gestion des infrastructures de transport d'énergie. En particulier, l'interaction entre les champs électromagnétiques générés par les lignes haute tension et les pipelines peut induire des courants parasites, susceptibles d'accélérer la corrosion ou de perturber les systèmes de surveillance et de protection cathodique. L'étude de ces interactions est donc essentielle pour prévenir les risques techniques et environnementaux associés.

III.2 Simulation sous COMSOL

III.2.1 Présentation du logiciel COMSOL

COMSOL Multiphysics est un logiciel de simulation basé sur la méthode des éléments finis, permettant de résoudre des équations physiques complexes. Il offre une large gamme de modules permettant de traiter différents types de phénomènes physiques, y compris les champs électromagnétiques. Ce logiciel est particulièrement adapté pour des simulations multiphysics, où plusieurs phénomènes interagissent simultanément, comme c'est le cas avec les champs électriques et magnétiques autour d'une ligne de transport haute tension.

COMSOL offre également des outils pour la création de maillages adaptés à la géométrie du

modèle, l'analyse des résultats (visualisation des lignes de champ, courbes de potentiel, etc.), et l'étude de l'influence de paramètres physiques sur les résultats (propriétés des matériaux, conditions aux limites, etc.).

Les avantages de COMSOL dans ce contexte incluent sa flexibilité, sa capacité à traiter des configurations complexes et son interface conviviale qui facilite l'intégration des différents aspects physiques dans une même simulation.

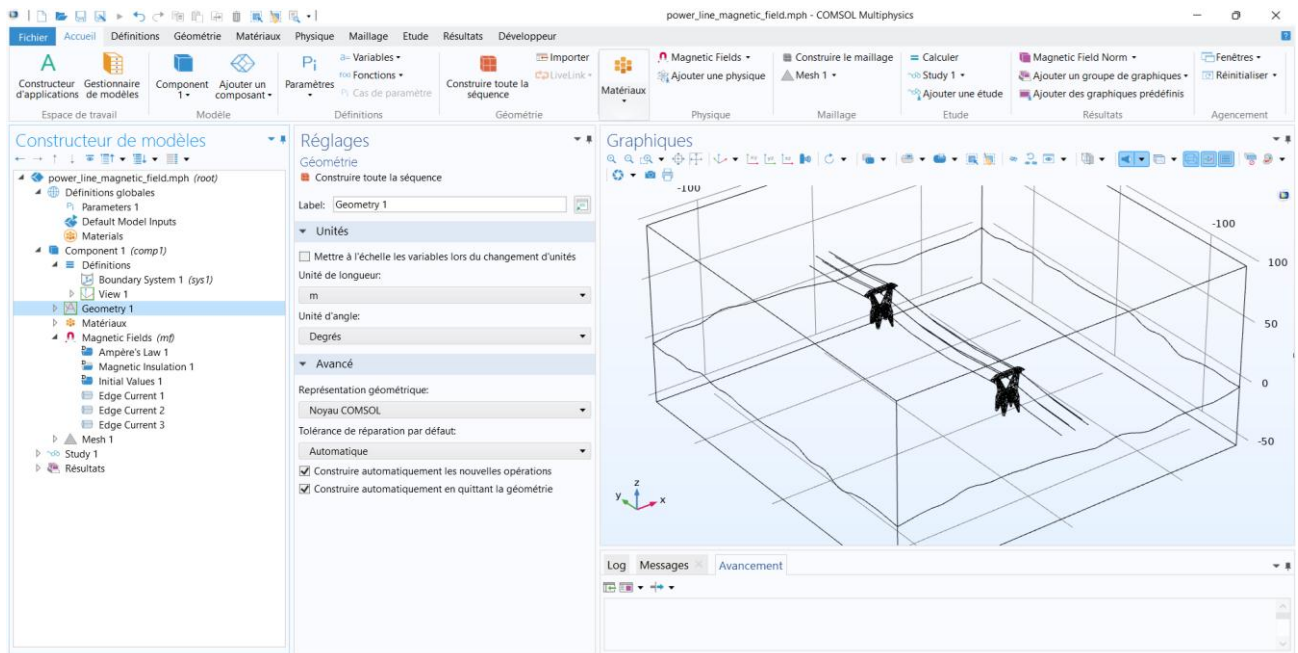


Figure III-1 : L'interface du logiciel COMSOL Multiphasiques

III.2.2 Etapes du processus de simulation sous COMSOL

La résolution d'un problème à l'aide du logiciel COMSOL suit une succession de calcul, qui se décompose suivant les quatre étapes de la résolution par la méthode des éléments finis :

- Création de la géométrie ;
- Définition des propriétés physiques des matériaux du système à étudier
- Définition des conditions aux limites
- Etablissement du maillage
- Résolution numérique
- Visualisation des résultats

Ces étapes de calcul s'effectuent indépendamment, ce qui permet une grande souplesse d'utilisation et une diminution du temps de calcul.

III.3 Simulation du champ électromagnétique autour des lignes aériennes

Dans cette section, nous allons utiliser les modèles prédéfinis fournis par COMSOL pour simuler le système de transport haute tension, en l'occurrence, une ligne de transport électrique de 400 kV. L'utilisation de modèles prédéfinis permet de gagner du temps et d'obtenir des résultats fiables, car ces modèles sont optimisés pour une large gamme de configurations.

III.3.1 Choix du modèle dans COMSOL

COMSOL propose plusieurs modèles prédéfinis adaptés à la simulation des champs électromagnétiques. Pour la simulation des champs électrique et magnétique autour d'une ligne haute tension, nous utiliserons le modèle prédéfini " Power Lines Electric Field " pour le champ électrique et " Power Lines Magnetic Field " pour le champ magnétique.

III.3.1.1 Modèle «Power Lines Electric Field»

Pour le champ électrique la tension est fixée à 400 kV dans ce modèle. Dans les lignes de transmission à haute tension, les lignes de phase sont généralement constituées de plusieurs conducteurs regroupés ensemble afin d'augmenter la section transversale. Par simplicité, un seul conducteur pour chaque ligne de phase est utilisé dans ce modèle, avec un rayon de 10 cm afin de simuler le rayon effectif d'un conducteur regroupé.

Les pylônes possèdent également deux lignes de protection au-dessus des lignes de phase, destinées à protéger la tour des coups de foudre. Ces lignes de protection ont un rayon légèrement plus petit, qui dans ce modèle est fixé à 1cm.

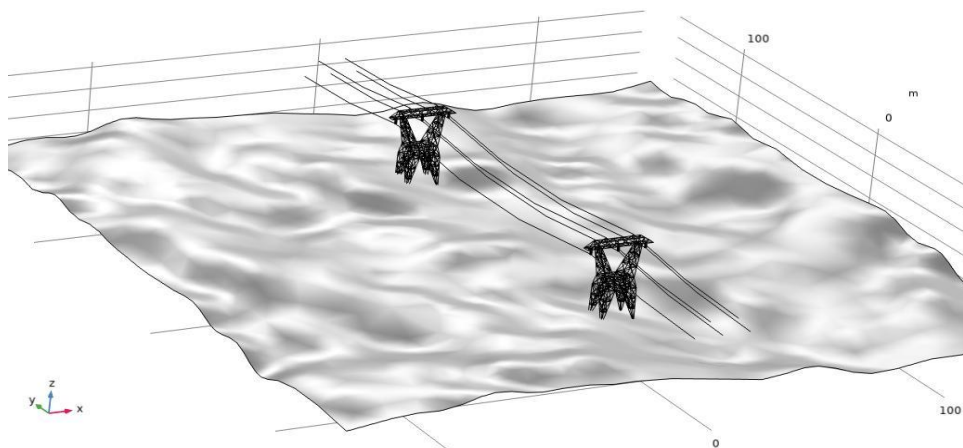


Figure III-2 : Ligne aérienne de transport électrique

III.3.1.2 Modèle «Power Lines Magnetic Field»

Pour le champ magnétique dans ce modèle le courant est fixé à 1000 A avec même paramètres géométriques de model précédent. Dans notre cas nous allons changer le courant de 800 A jusqu'à 2000 A.

III.4 Modèles géométriques de la ligne 400 KV simple terne de COMSOL

Le modèle géométrique de ligne 400 kV avec un seul conducteur par phase pour la configuration horizontale est présentée sur la figure III-3 :

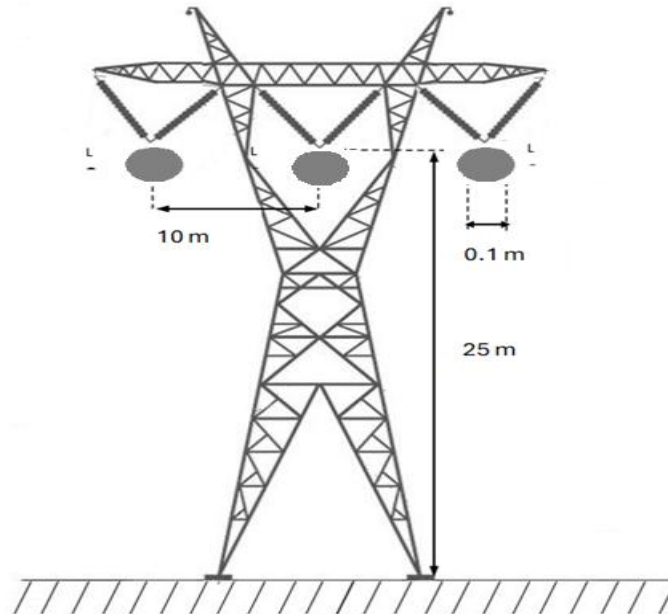


Figure III-3: Ligne 400kV simple terne COMSOL

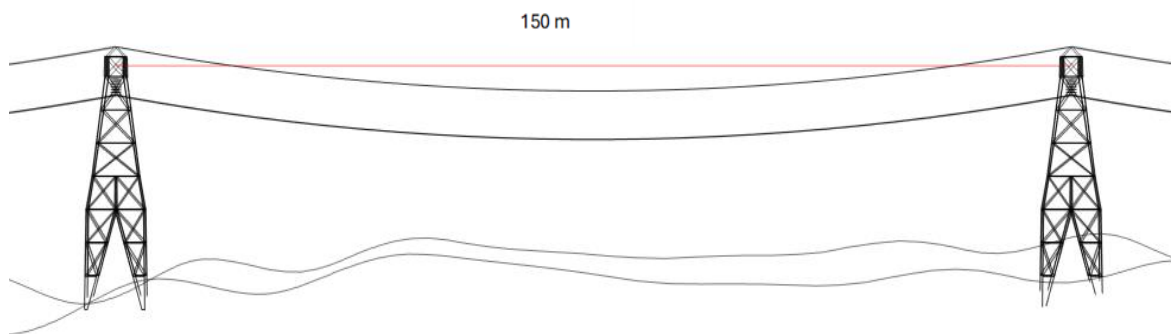


Figure III-4: Distance entre les deux pylônes

III.4.1 Paramètres de la ligne 400 kV

La ligne étudiée est une ligne triphasée, où chaque phase est représentée par un seul conducteur. Les conducteurs sont disposés selon une configuration en nappe horizontale, c'est-à-dire que les trois conducteurs sont positionnés parallèlement, avec une distance de 10 m entre

chaque conducteur, dans un plan horizontal. Le rayon géométrique équivalent des conducteurs est de $r=0,1$ m.

Dans cette analyse, plusieurs valeurs de courant de charge sont prises en compte : $I=800$ A, 1000 A, 1200 A, 1400 A, 1600 A, 1800 A, 2000 A. Ces valeurs permettent d'étudier le comportement de la distribution des champs électrique et magnétique autour des lignes aériennes sous différentes conditions de charge.

III.4.2 Maillage du domaine d'étude

Le maillage peut être défini comme la division d'une région géométrique en une série de sous-domaines (des éléments finis), généralement sous forme de polygones en 2D ou de tétraèdres/hexaèdres en 3D. Le maillage constitue donc une discrétisation de l'espace, qui permet de résoudre numériquement des équations aux dérivées partielles définies sur ce domaine. Ce processus de discrétisation transforme le problème physique continu en un ensemble d'équations algébriques discrètes, qui peuvent être résolues à l'aide d'algorithmes numériques.

Les maillages des deux modèles des champs électriques et champs magnétiques sont représentés sur la figure III-5 (A pour le champ magnétique et le B pour le champ électrique). Le domaine d'étude contient deux parties essentielles sont l'air et le sol.

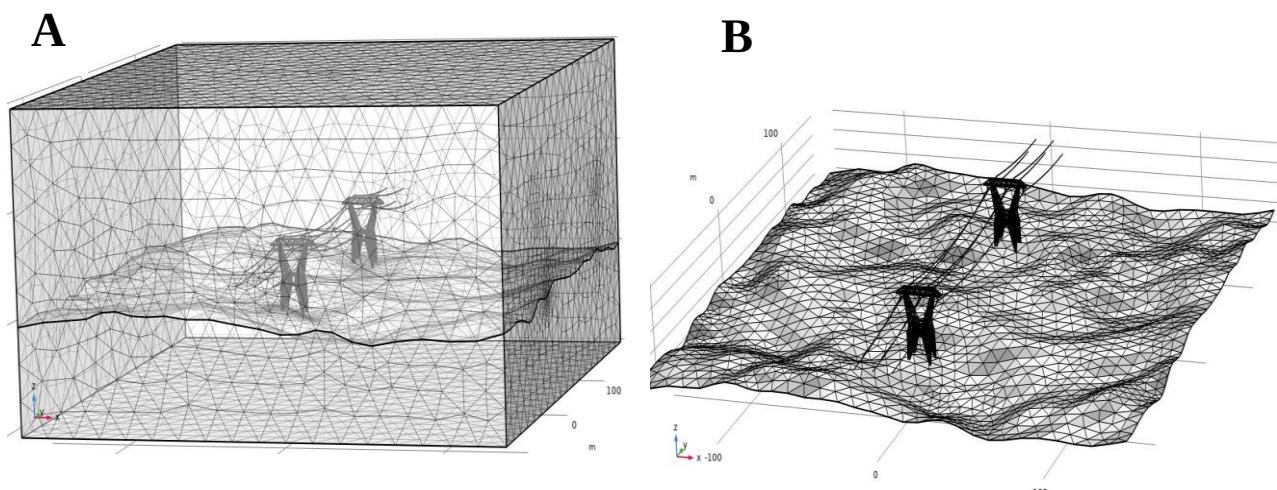


Figure III-5 : Maillages des domaines étudiés

III.4.3 Configuration spatiale de la Ligne de mesure

Dans le cadre de cette étude, des mesures des champs électrique et magnétique seront réalisées à la surface du sol sur une bande de 100 mètres de part et d'autre de la ligne de transport d'électricité. Les figures III-6 A, B et C permettent de visualiser la configuration spatiale de la ligne de mesure mise en place pour les relevés des champs électriques et magnétiques.

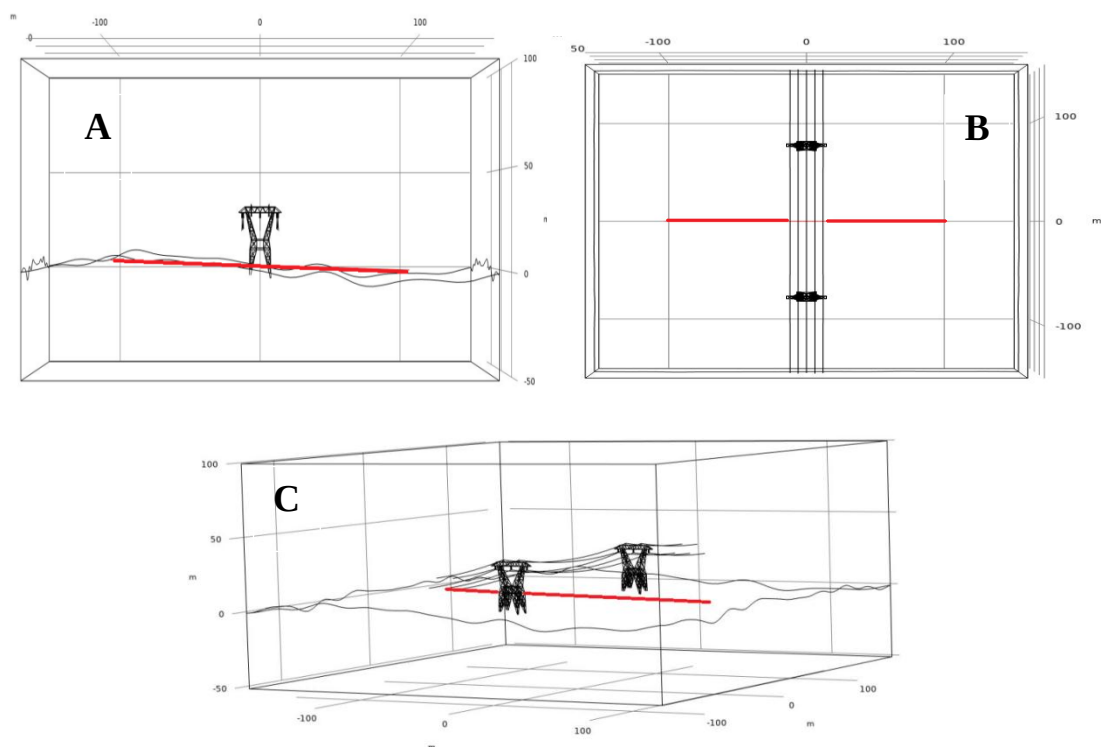
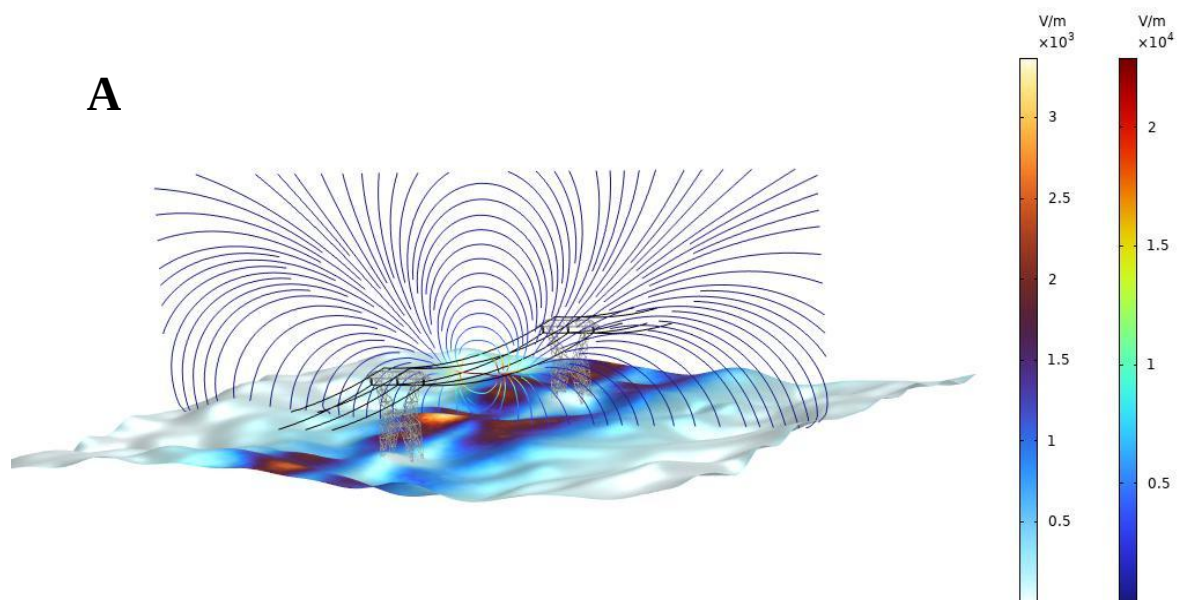
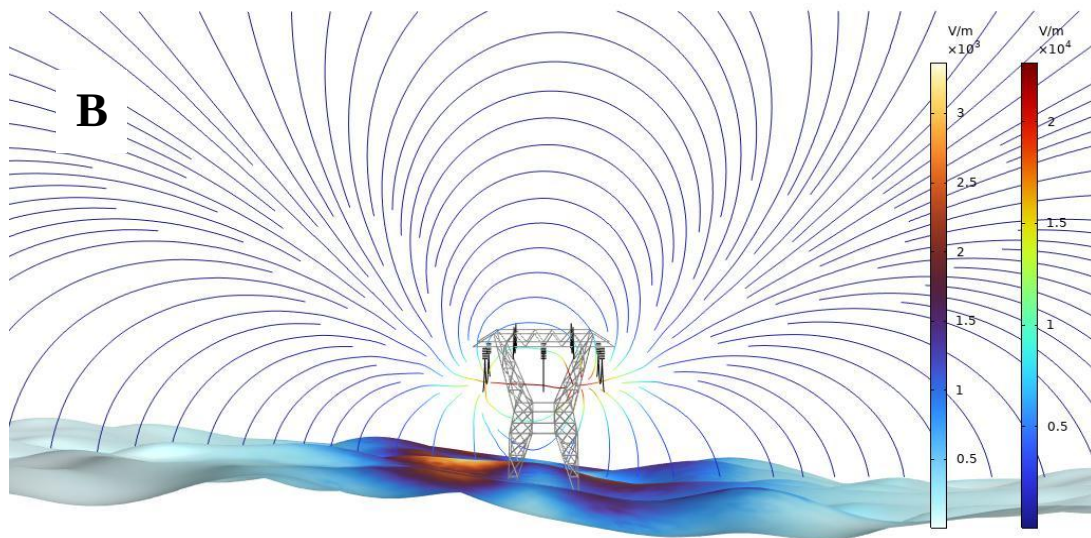


Figure III-6 : Configuration spatiale de la ligne de mesure

III.5 Résultats de simulation d'une ligne aérienne 400 kV

III.5.1 Champ électrique





A- Vue 3 dimension B- Vue de face 2 dimension

Figure III-7: Distribution du champ électrique autour les lignes aériennes

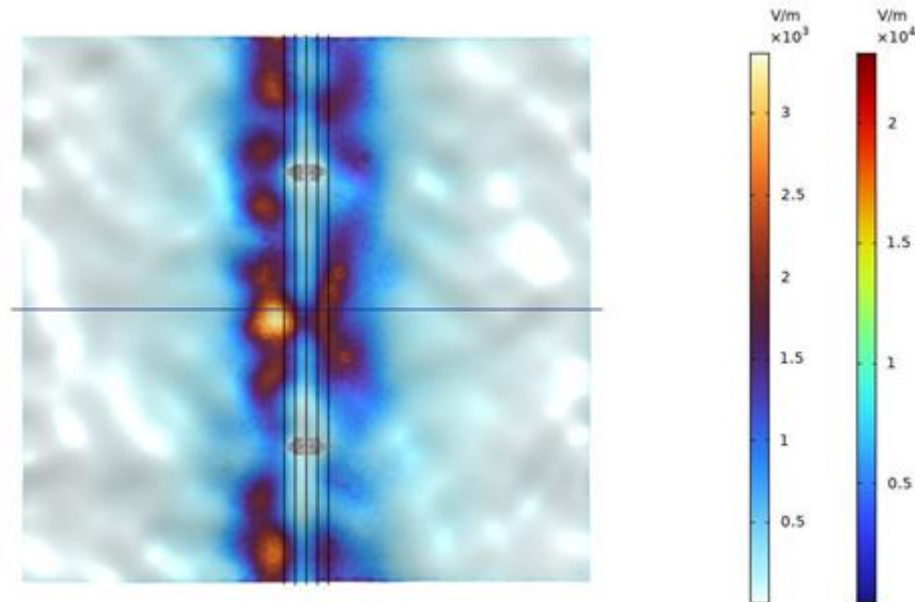


Figure III-8: Propagation du champ électrique au niveau du sol sous les lignes aériennes

Les figures III-7 et III-8 montrent une simulation du champ électrique autour d'une ligne 400KV avec deux pylône pour les positions ($x = [100 ; -100]$; $y=0$; $z=0$). Les lignes de champ montrent la répartition du champ électrique émanant des conducteurs, les zones colorées indiquent l'intensité du champ au sol. Les couleurs chaudes signalent des zones de forte intensité, et les couleurs froides, des zones plus faibles.

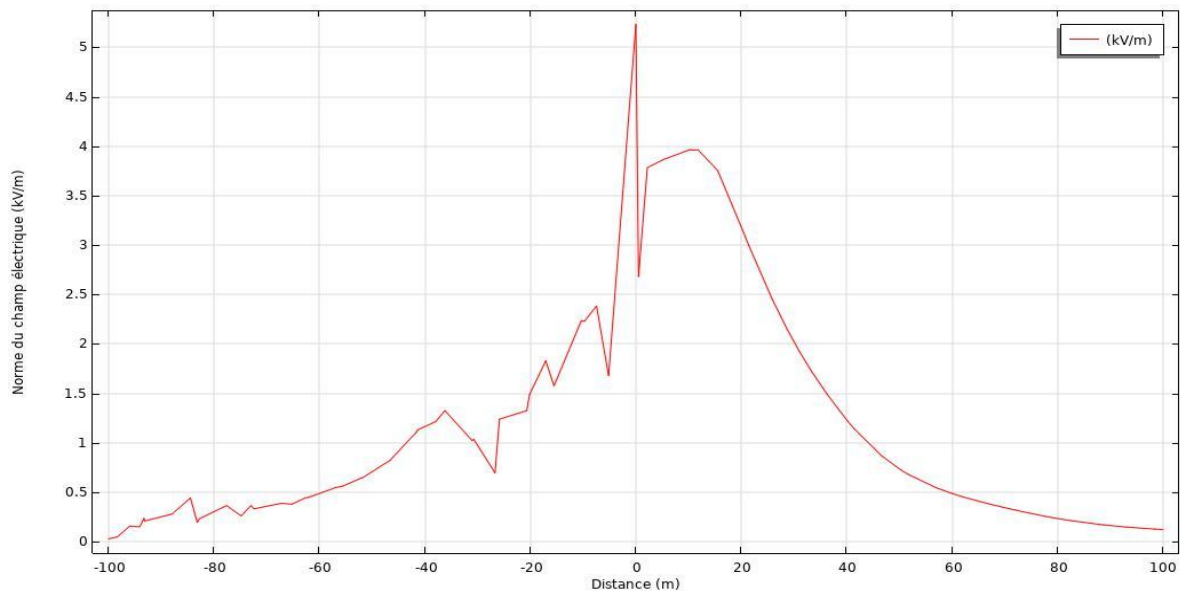


Figure III-9: Mesure du champ électrique au niveau du sol sous les lignes aériennes 400KV

Tableau III-1 : mesure du champ électrique selon l'axe x

Direction selon x	Sous la ligne	A 30 m	A 100 m
Champ électrique en (kV/m)	5.25	1.2	0.02

Suivant les résultats présentés dans la figure III-9, qui illustrent le calcul de la densité du champ électrique en fonction des différentes distances, Le champ électrique commence à une valeur basse, augmente, puis présente un pic très net autour de 0 m, atteignant des valeurs supérieures à 5 kV/m. Après ce pic, il diminue progressivement à mesure que la distance augmente, s'approchant de 0 kV/m vers 80-100 m. Cette variation est accentuée par des fluctuations côté gauche de la ligne dues aux caractéristiques déformées du terrain, telles que les irrégularités topographiques et la conductivité du sol, qui influencent localement la distribution du champ électrique.

III.5.2 Champ magnétique

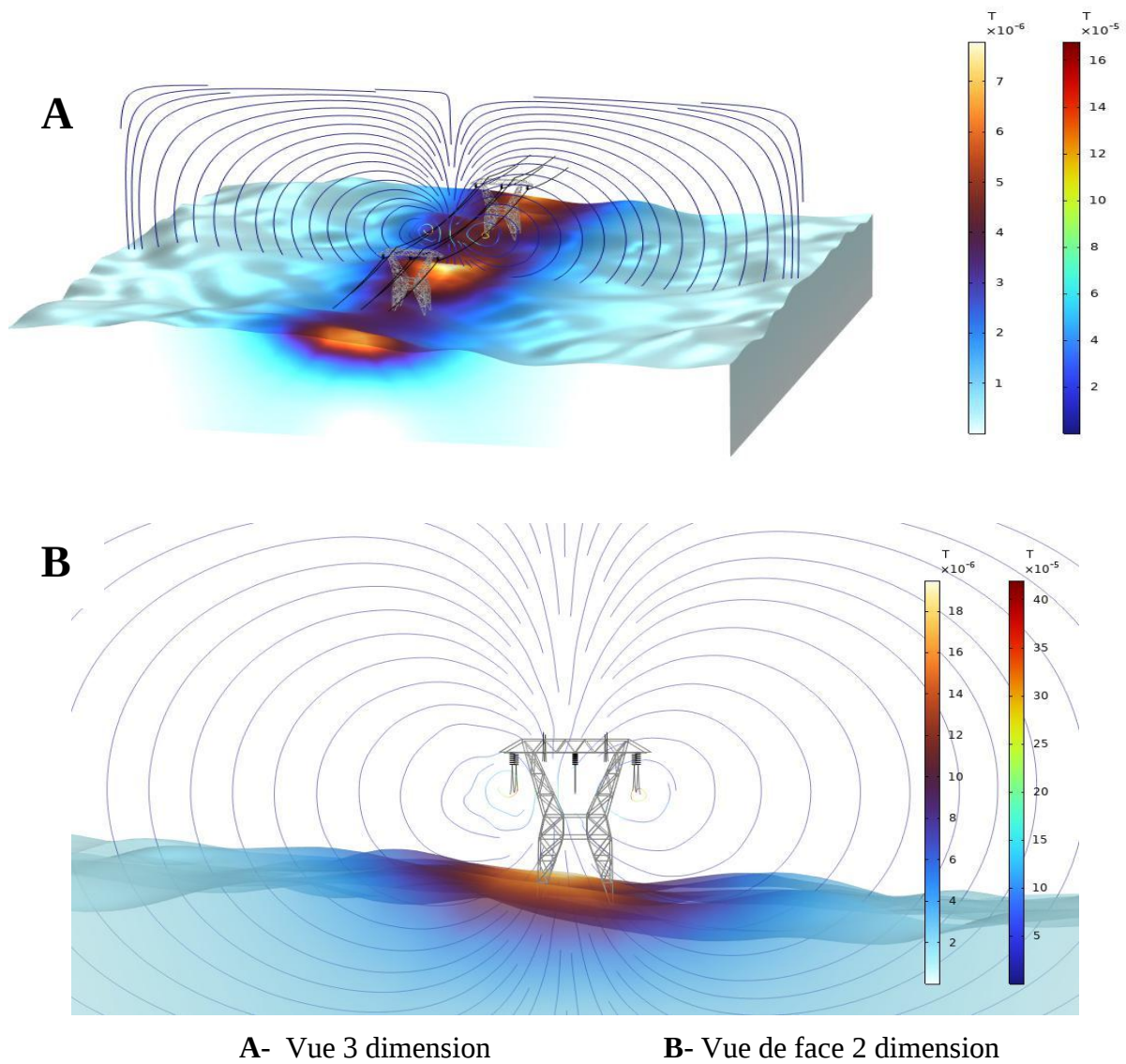


Figure III-10: Représentation des lignes de la densité du flux magnétique

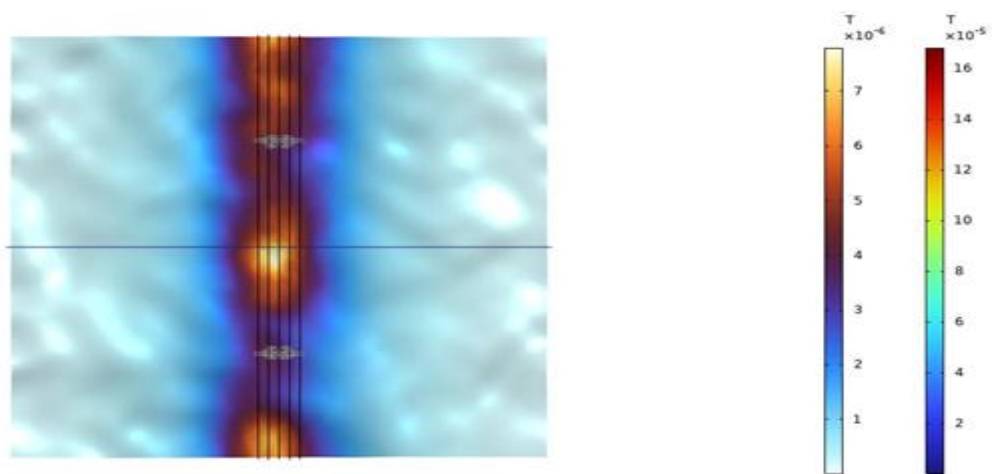


Figure III-11: Propagation du champ magnétique au niveau du sol sous les lignes aériennes

Les figures III-10 et III-11 illustrent une simulation du champ magnétique généré par des courants électriques circulant dans des conducteurs aériens, La distribution du flux magnétique avec un contour uniforme autour des conducteurs de manière symétrique, La carte colorée superposée montre l'intensité du champ magnétique en différents points de l'environnement, avec une échelle en couleurs allant du bleu (faible intensité) au rouge (forte intensité).

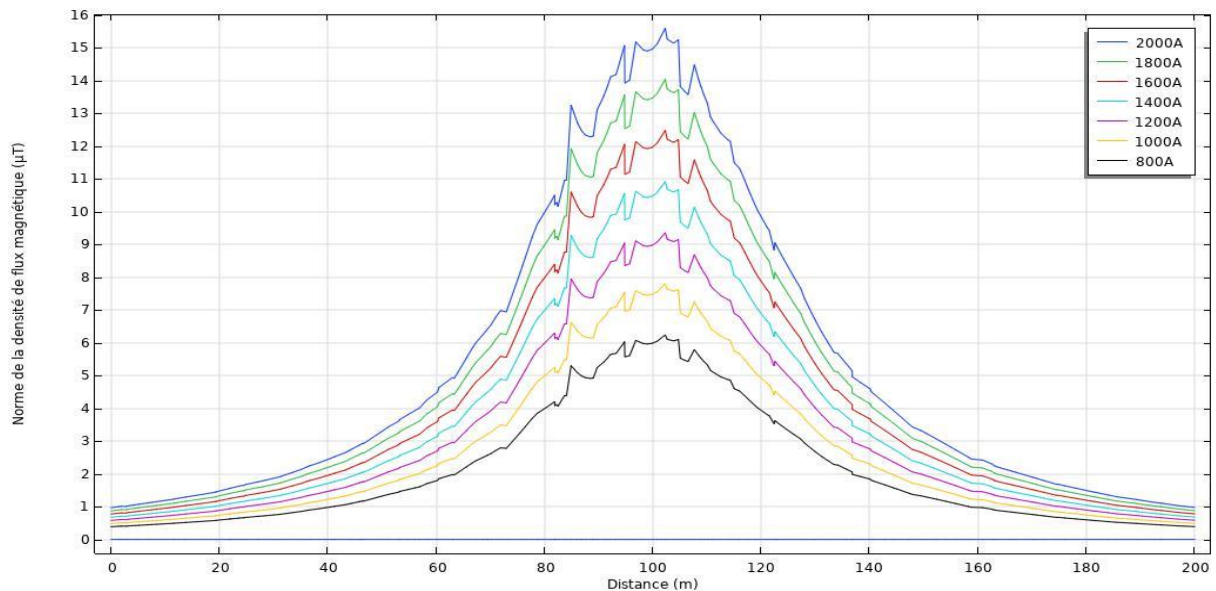


Figure III-12: Variation de l'induction magnétique d'une ligne 400 kV en fonction du courant à 100 m de distance.

Tableau III-2 : Variation de la densité du flux magnétique en fonction de la distance et l'intensité du courant.

	Densité du flux magnétique (μT)						
Distance selon x	800 A	1000 A	1200 A	1400 A	1600 A	1800 A	2000 A
Sous la ligne	6	7.5	9	10.6	12	13.5	15
A 30 m	2.6	3.3	3.9	4.6	5.3	5.9	6.5
A 100 m	0.4	0.5	0.6	0.7	0.8	0.9	1

La figure III-12 illustre l'allure du champ magnétique en fonction de la distance, pour différents niveaux de courant de charge, les résultats montrent que la densité de flux magnétique augmente avec l'intensité du courant électrique et que le champ magnétique atteint un maximum directement sous les câbles, puis diminue progressivement à mesure que l'on s'éloigne de ces derniers, le champ est plus intense à proximité des conducteurs et devient négligeable à grande distance.

III.6 Présence d'un défaut dans les lignes électriques 400 KV

III.6.1 Défaut d'un court-circuit triphasé

La présence d'un défaut de court-circuit triphasé d'une valeur de 30 kA.

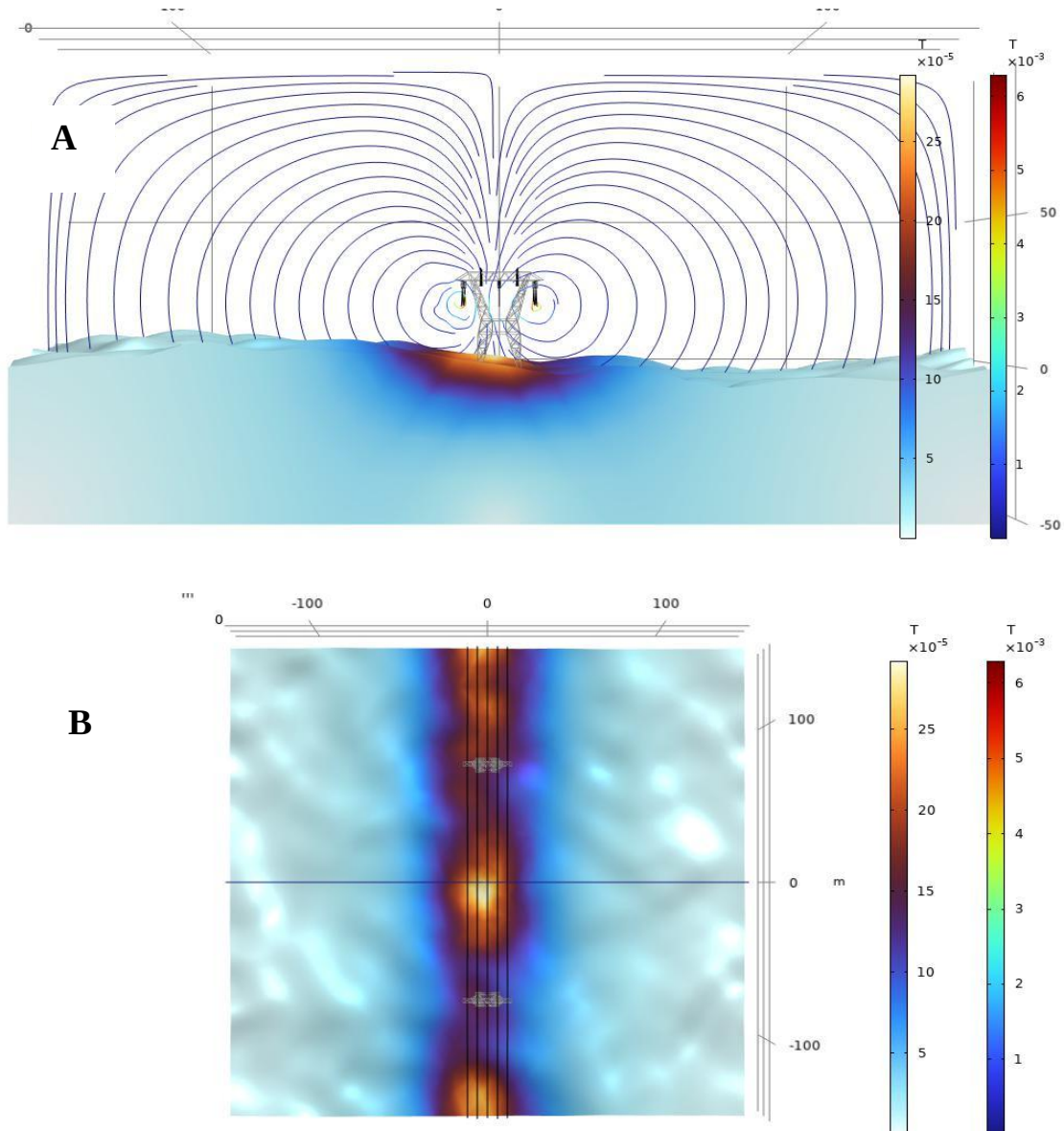


Figure III-13 : l'influence de la présence d'un court-circuit sur la distribution des lignes magnétiques.

Les figures A et B représente la distribution du champ magnétique généré lors d'un événement de court-circuit de forte intensité (30 kA), et met en évidence son impact sur l'environnement proche, à la fois dans le milieu aérien et souterrain.

On observe une bande verticale étroite et très intense, de couleur rouge vif à orange, qui s'étend le long de La ligne. Cette bande représente la zone où le champ magnétique est le plus fort et intense ; Autour de cette bande centrale, le champ magnétique s'atténue progressivement. Les

couleurs passent du rouge/orange au jaune, puis au bleu clair et enfin à un bleu plus pâle ou blanc cassé, indiquant une diminution de l'intensité du champ à mesure qu'on s'éloigne de la ligne électrique.

On distingue également des lignes bleues foncées représentant les lignes de champ magnétique, qui paraissent provenir d'un point central et se déployer en arcs de cercle dans l'espace aérien, traduisant la répartition spatiale du champ. La densité de ces lignes est nettement plus élevée à proximité de la ligne, ce qui indique une intensité magnétique plus forte dans cette zone, avant de diminuer progressivement à mesure que l'on s'éloigne de la ligne électrique.

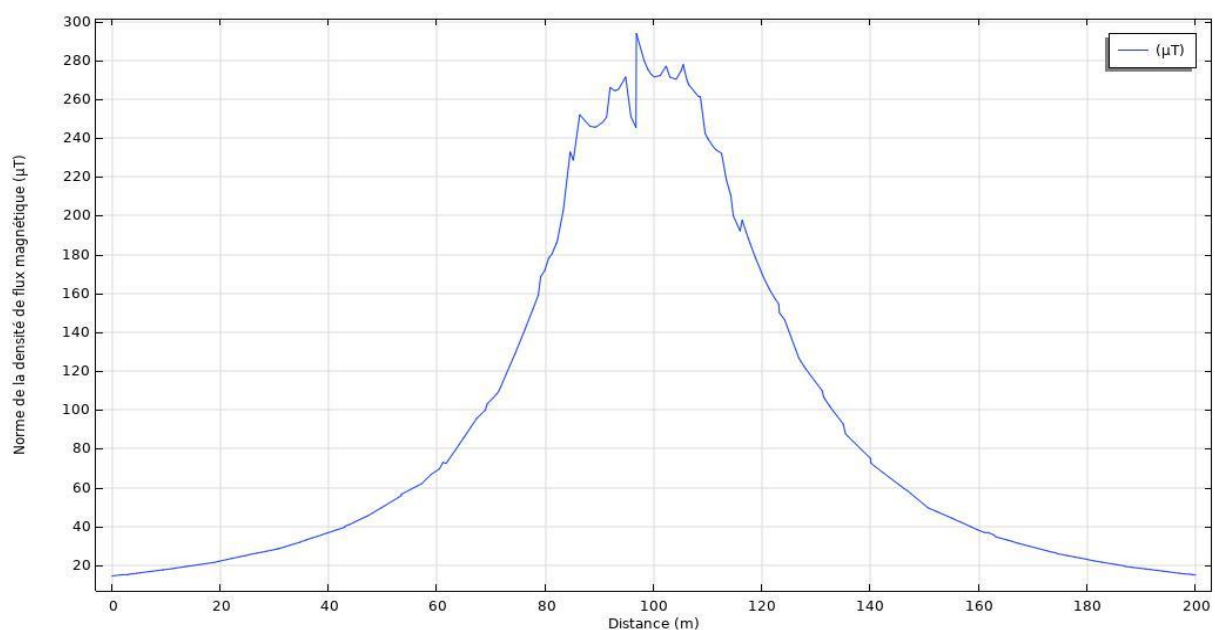


Figure III-14 : Mesure de la densité du flux magnétique (court-circuit de 30 KA)

La présence d'un court-circuit sur une ligne de transport à 400 kV engendre une perturbation importante dans la distribution des courants et tensions le long de la ligne. Lors d'un défaut, notamment un court-circuit monophasé, biphasé ou triphasé, une chute brutale de l'impédance locale se produit, provoquant une augmentation significative du courant à l'endroit du défaut. Cette intensité est d'autant plus élevée que le point de court-circuit est proche de la source d'énergie. La simulation avec COMSOL permet de visualiser la répartition spatiale d'un champ magnétique très intense avec une multiplication de l'amplitude de 50 fois pendant un court-circuit, et d'identifier les zones critiques autour des lignes à haute tension voir les figure II-14.

III.6.2 Défaut de surtension

La présence d'un défaut d'une surtension triphasé d'une valeur de 1200kV.

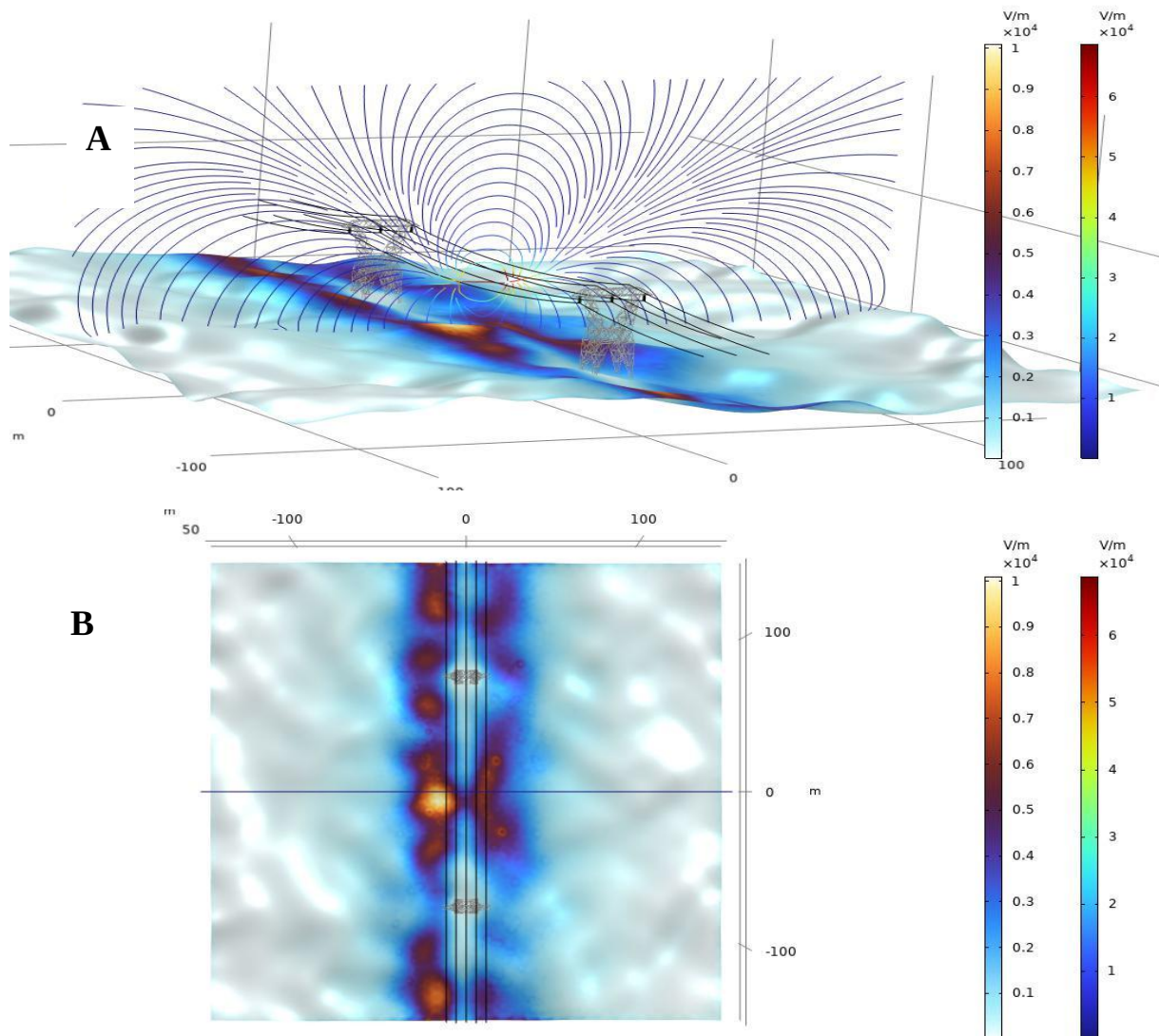


Figure III-15 : Champ électrique en 3D lors de la présence d'une surtension

Les résultats montrent que le champ électrique atteint une forte concentration et une intensité maximale directement sous les conducteurs, puis décroît rapidement avec l'éloignement. Cette amplification locale du champ est due à un défaut de surtension appliquée, provoquant une élévation significative de la densité de flux électrique dans cette zone. Les zones de haute intensité, visualisées en rouge, correspondent aux secteurs où le gradient de potentiel électrique est maximal, indiquant une concentration accrue des lignes de champ, ce qui peut favoriser des phénomènes tels que la décharge partielle ou la dégradation des matériaux isolants.

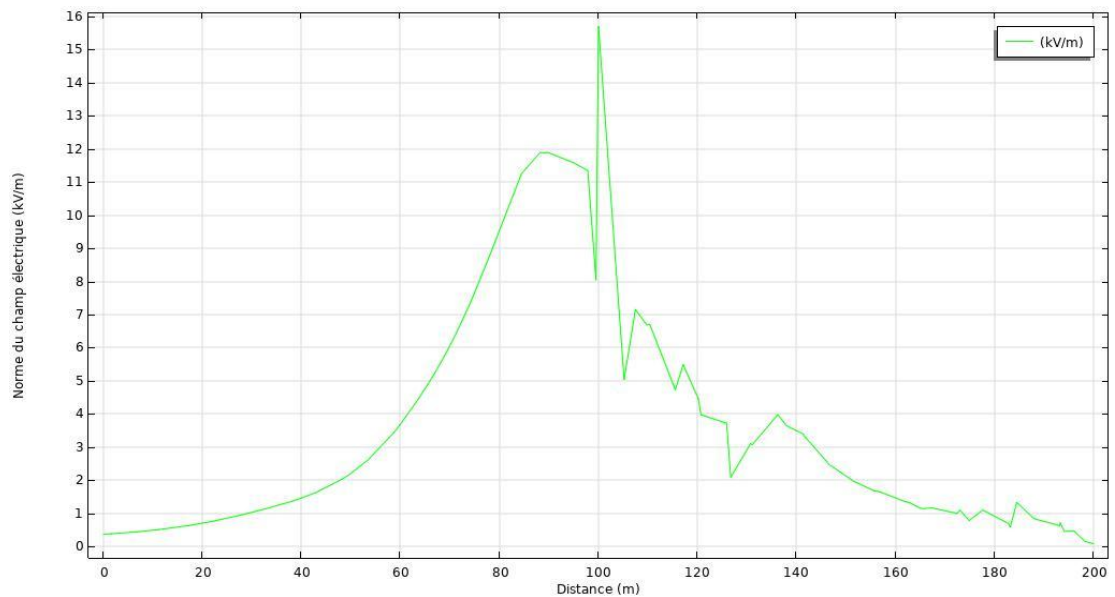


Figure III-16 : Mesure du champ électrique lors de la présence d'une surtension

Lors de la survenue d'une surtension sur une ligne de transport à 400 kV, le champ électrique autour des conducteurs augmente de manière significative. En conditions normales, la distribution du champ électrique autour des conducteurs est fonction de la géométrie de la ligne, de la hauteur par rapport au sol, et des potentiels appliqués. Cependant, en cas de surtension, le potentiel instantané appliqué aux conducteurs augmente brusquement, ce qui provoque :

- Une augmentation de l'intensité du champ électrique autour des conducteurs,
- Une modification de la distribution spatiale du champ, notamment dans les zones proches des isolateurs et des armements métalliques,
- Une concentration du champ électrique aux zones de courbure ou de discontinuité géométrique (effet de pointe).
- Une propagation du champ vers le sol et les structures avoisinantes, en particulier lorsque les conducteurs sont à faible hauteur.

III.6.3 Défaut de manque phase

L'ouverture d'une phase influe directement sur la concentration des lignes du champ électrique et champ magnétique voir les figures suivantes III-17 et III-19 :

III.6.3.1 Champ électrique

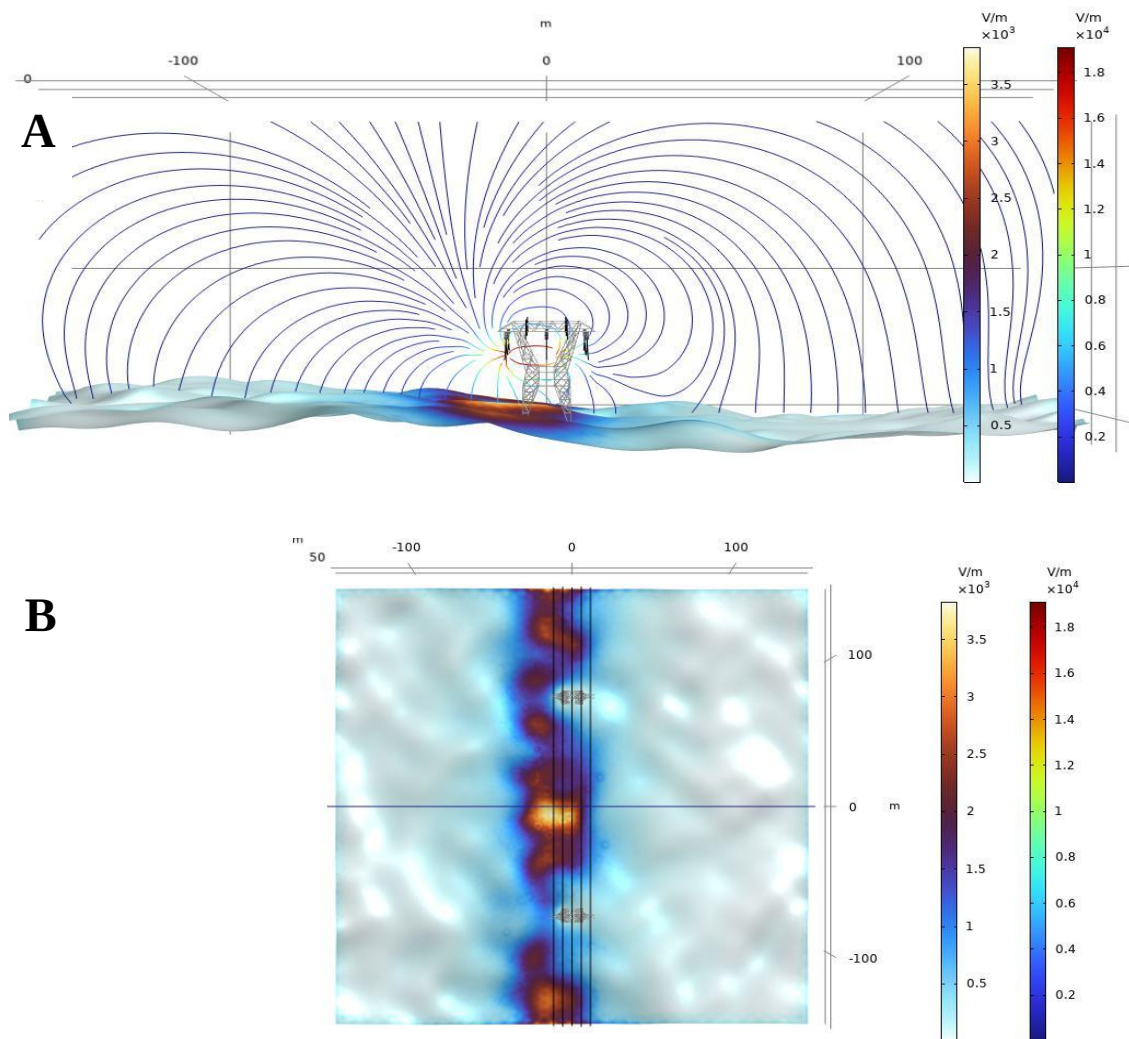


Figure III-17 : Distribution du champ électrique lors d'une ouverture d'une seule phase

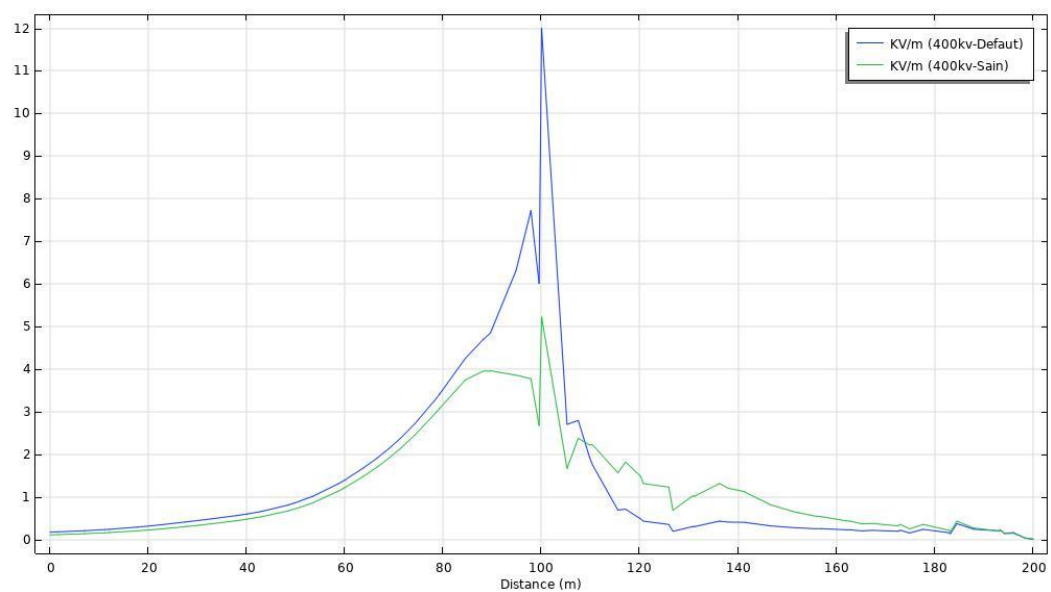


Figure III-18 : Mesure du champ électrique lors d'ouverture d'une phase

III.6.3.2 Champ magnétique

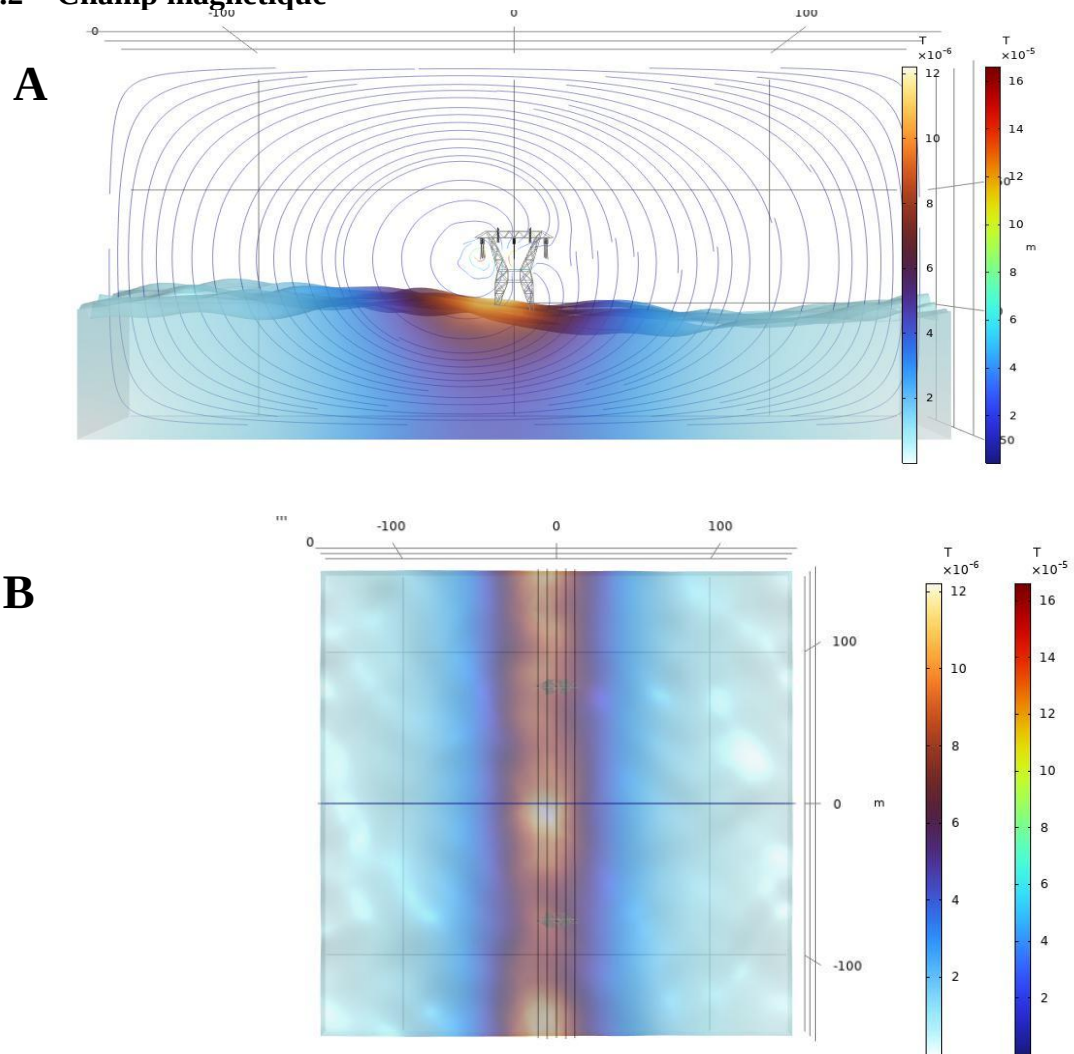


Figure III-19 : Distribution du champ magnétique lors d'une ouverture d'une seule phase

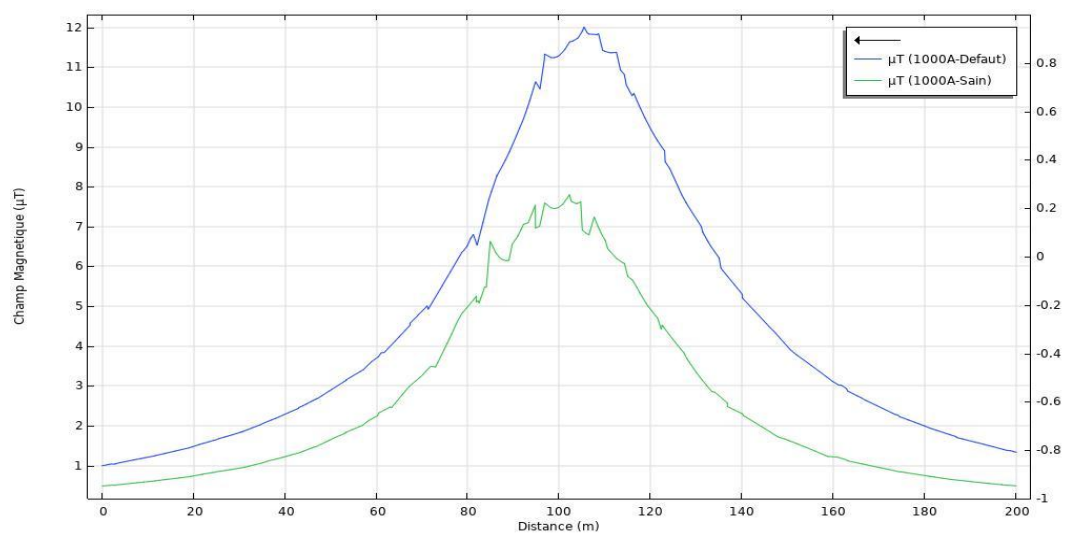


Figure III-20 : Mesure du champ magnétique lors d'une ouverture d'une seule phase

L'ouverture d'une seule phase dans une ligne triphasée provoque un déséquilibre significatif dans la distribution des champs électromagnétiques. Normalement, les champs électriques et magnétiques autour des trois conducteurs sont équilibrés et répartis de manière symétrique. Mais lorsque l'une des phases est ouverte (coupée), la situation change :

➤ Champ électrique (E):

Le champ électrique devient déséquilibré, comme le montrent les figures III-17 A et B, avec une concentration plus importante autour des deux phases actives, ce qui peut entraîner une augmentation du stress électrique sur les isolateurs, ainsi qu'un risque d'amorçage localisé ou de décharge corona dans certaines zones.

➤ Champ magnétique (B) :

Le champ magnétique devient également déséquilibré, comme le montrent les figures III-19 A et B. Lorsqu'une phase est ouverte, son courant devient nul, donc elle n'émet plus de champ magnétique.

Les deux phases restantes continuent de transporter du courant, mais le champ magnétique global devient asymétrique, provoquant une distorsion des lignes de champ et une augmentation locale du champ dans certaines directions. On observe clairement la déformation des lignes de champ et les points de surintensité locale, surtout à proximité des armements ou des isolateurs.

III.7 Présence d'un pipeline très proche de la ligne haute tension 400 kV

Lorsqu'un pipeline métallique (gaz, pétrole, eau...) est situé à proximité d'une ligne de transport à haute tension (400 kV), il est soumis à un champ électromagnétique induit dû aux courants alternatifs dans les conducteurs de puissance. Ce phénomène peut engendrer des effets significatifs, notamment en matière de courants induits, corrosion accélérée, et sécurité des personnes.

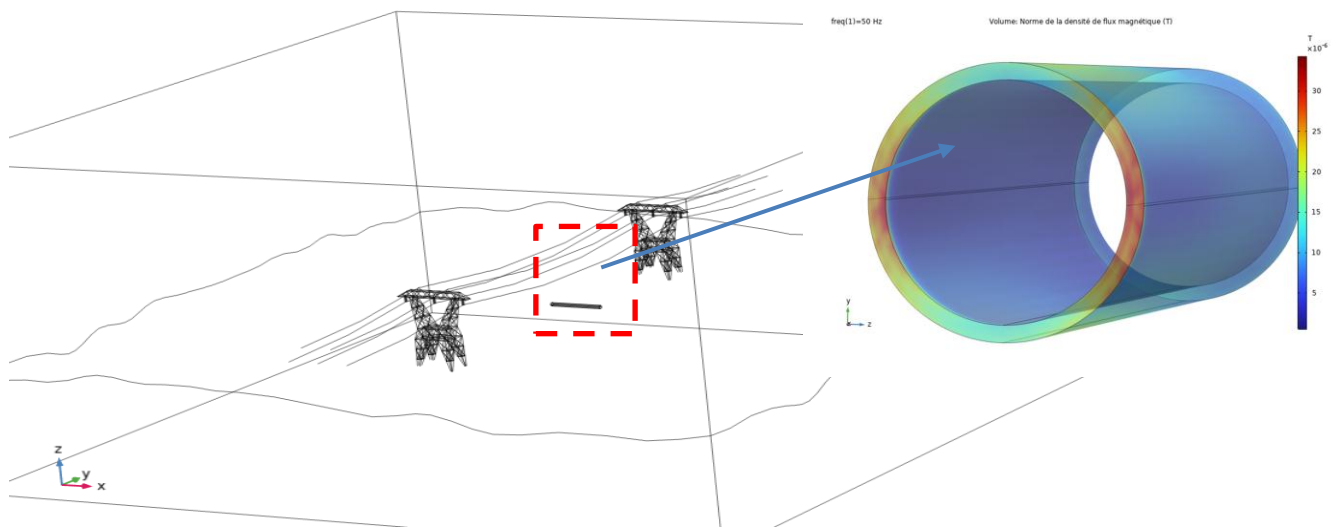


Figure III-21 : Le passage d'un pipeline sous une ligne 400kV

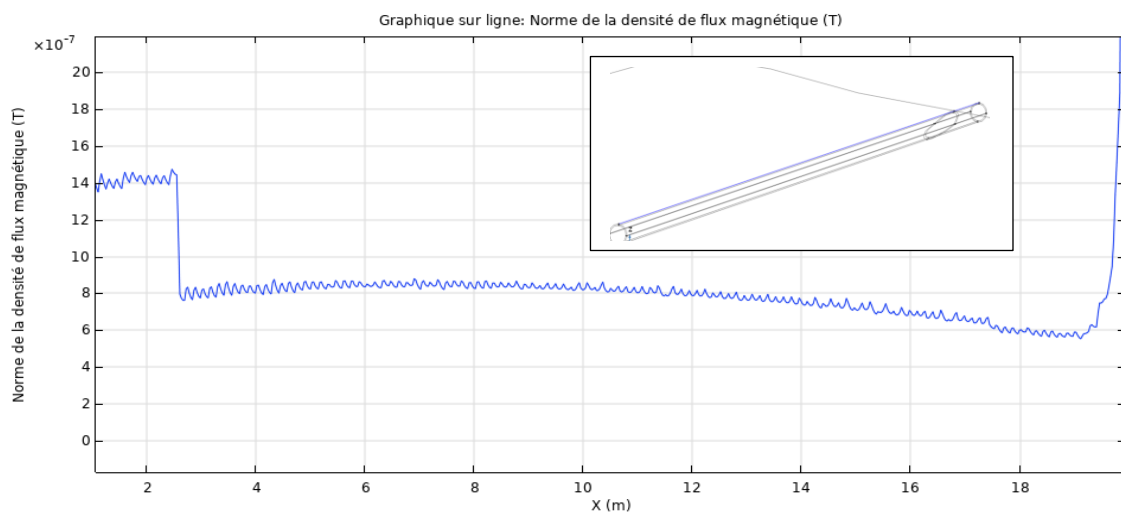


Figure III-22 : Calcul de l'induction magnétique sur une partie de pipeline sous la ligne 400 KV

Le champ magnétique est généré par le courant alternatif (AC) circulant dans les conducteurs. Ce champ varie dans le temps et induit des courants de Foucault dans les structures métalliques voisines, y compris le pipeline. L'amplitude du champ dépend de plusieurs facteurs :

- Distance entre la ligne et le pipeline (plus il est proche, plus l'induction est forte).
- Disposition géométrique (pipeline parallèle, croisé ou perpendiculaire à la ligne).
- Niveau du courant transporté (plus élevé sous forte charge ou défaut).

La cohabitation de plusieurs tronçons de pipeline situés à différentes positions (latérales et verticales) sous ou à proximité immédiate d'une ligne de transport haute tension (400 kV) complexifie le comportement du champ électromagnétique induit, notamment en régime permanent et en cas de défaut.

III.8 Présence d'un pipeline perpendiculaire avec la ligne

Lorsqu'un pipeline métallique de grande longueur traverse perpendiculairement une ligne électrique haute tension (400 kV), il est exposé à une distribution complexe et asymétrique du champ électromagnétique généré par la ligne. Cette configuration est fréquente dans les zones rurales ou industrielles où les réseaux de transport d'énergie et de fluides coexistent.

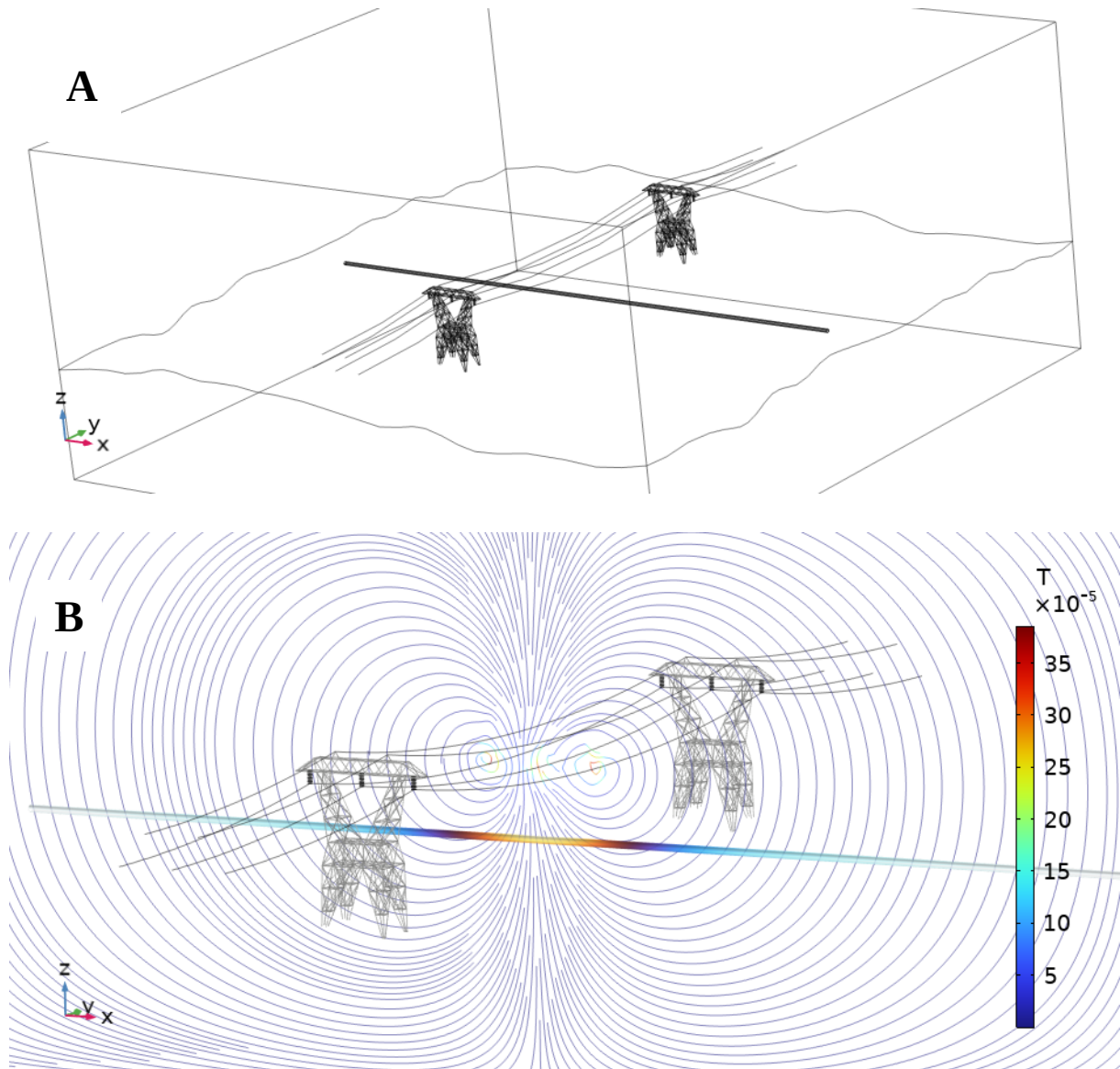


Figure III-23 : Présence d'un pipeline long perpendiculaire à la ligne 400 kV

On observe dans la figure III-23 (B) que la partie du pipeline directement sous les lignes électriques est colorée en orange/rouge, indiquant une densité de flux magnétique élevée. Plus on s'éloigne de cette zone centrale, plus le pipeline devient bleu, signifiant une faible densité de flux magnétique.

Cette illustration met en évidence le couplage inductif entre les lignes électriques à haute tension et le pipeline. Les courants circulant dans les lignes électriques génèrent un champ

magnétique qui induit à son tour des courants et des tensions dans le pipeline, avec une intensité maximale là où le pipeline est le plus proche des lignes ou directement en dessous.

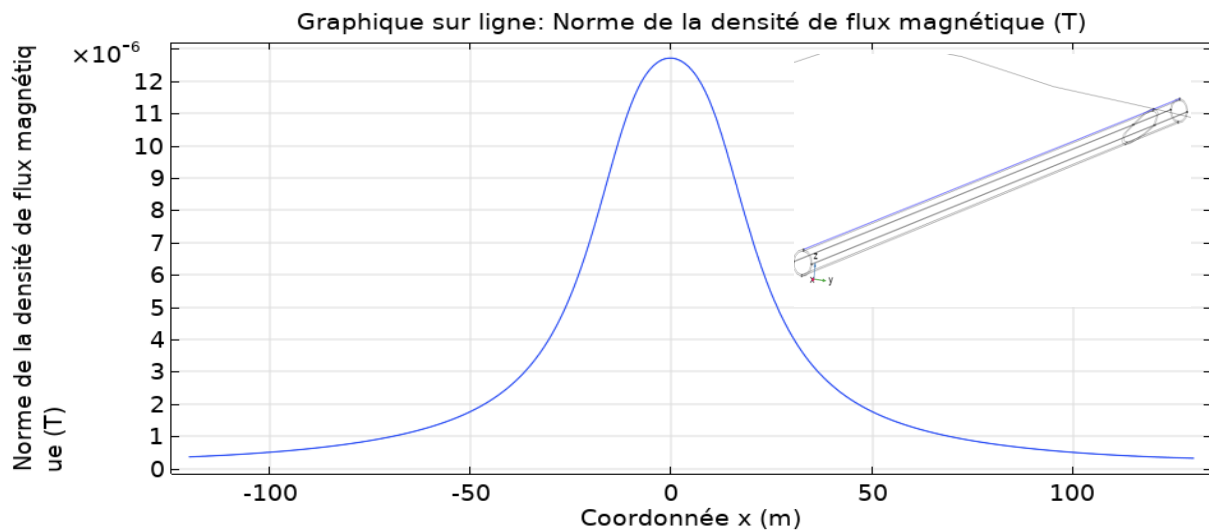


Figure III-24 : Mesure de l'Induction magnétique au niveau de pipeline

La courbe présentée dans la figure III-24 montre que l'intensité du champ magnétique au niveau du pipeline diminue rapidement à mesure que l'on s'éloigne de l'axe central, situé à l'aplomb de la ligne électrique. Aux environs de ± 50 mètres, le champ est déjà significativement atténué, et à ± 100 mètres, son intensité devient négligeable.

III.9 Présence de plusieurs pipeline en parallèle à la ligne aérienne 400 KV

La présence de plusieurs pipelines métalliques parallèles à une ligne de transport 400 kV représente un cas complexe de couplage électromagnétique, où les effets inductifs, capacitifs et résistifs s'accumulent et peuvent provoquer des phénomènes indésirables.

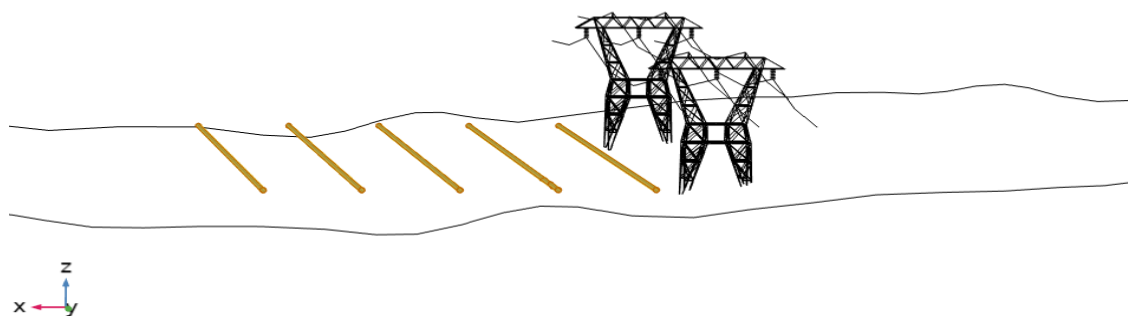


Figure III-25 : présence de plusieurs pipelines en parallèle à la ligne aérienne 400 kV

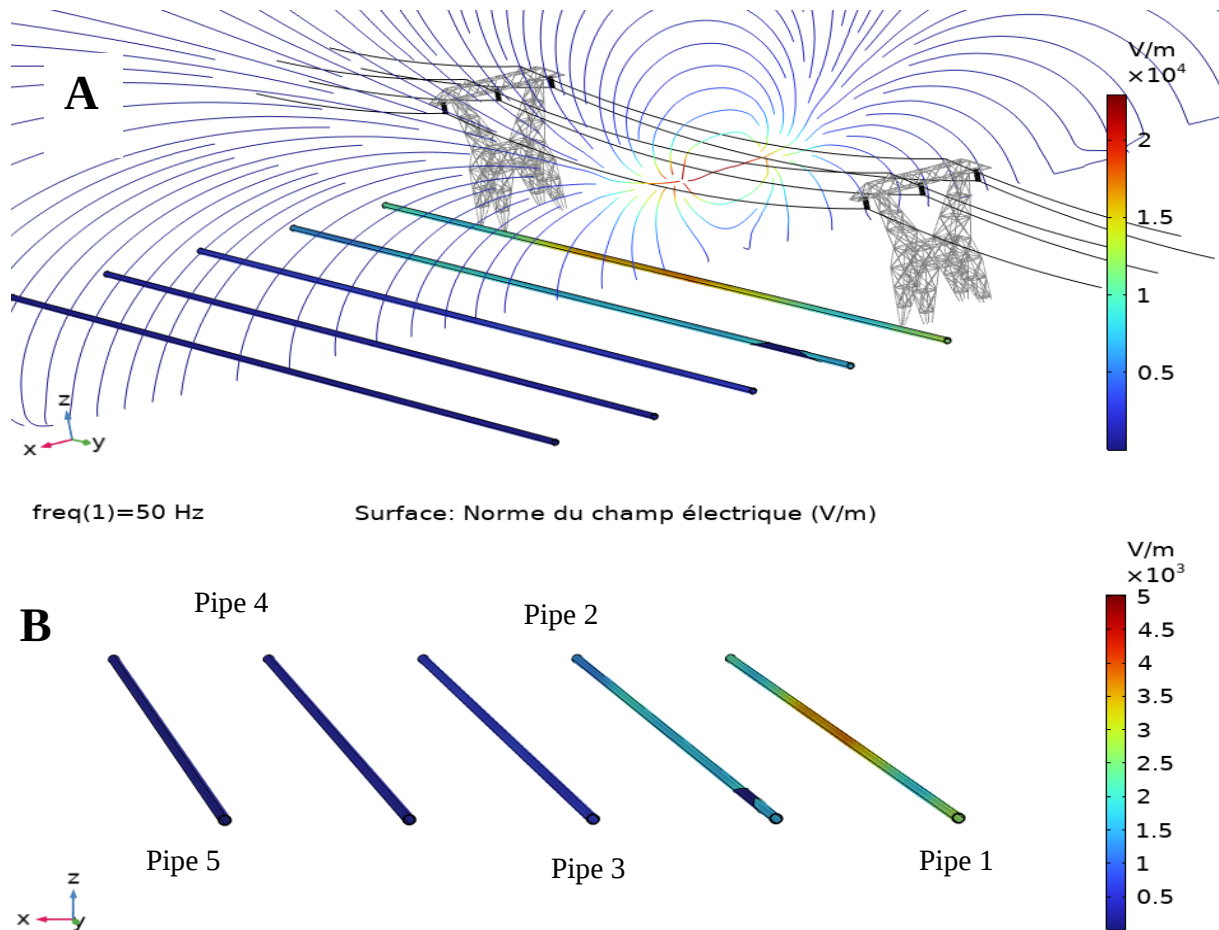


Figure III-26 : L'induction magnétique au niveau des pipelines disposés en parallèle

Les figures III-26 (A et B) illustrent la cartographie de la distribution du champ électrique au niveau des pipelines. On observe que le pipeline le plus proche, situé directement sous les lignes électriques, présente une variation de couleur significative, avec des zones jaunes, orange et rouges au centre, indiquant une forte intensité du champ électrique. Il s'agit de la section la plus fortement affectée.

Les pipelines situés plus loin sont majoritairement bleus, ce qui signifie que l'intensité du champ électrique y est beaucoup plus faible. La diminution de l'intensité du champ avec la distance est clairement visible.

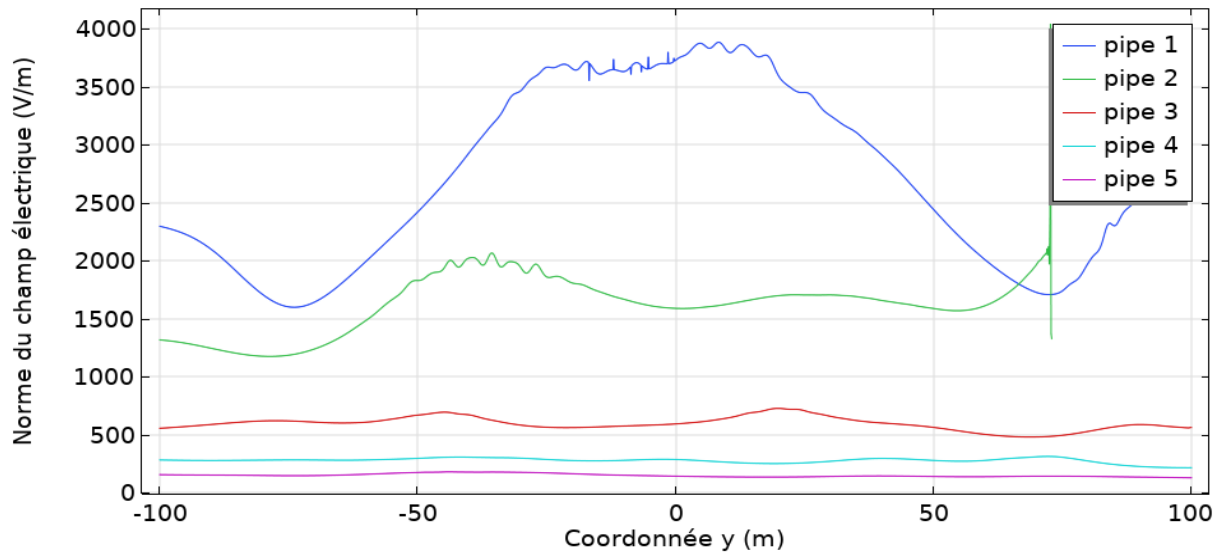


Figure III- 27 : mesure du champ électrique dans la partie supérieure de chaque pipeline

La figure III-27 présente les courbes de la norme du champ électrique mesurée le long de la surface supérieure de cinq pipelines distincts. Chaque courbe de couleur différente correspond à un pipeline, tel qu'indiqué dans la légende. On observe que le pipeline 1, représenté par la ligne bleue, est soumis à la plus forte intensité de champ électrique, avec un pic atteignant environ 3500 à 3800 V/m au centre de la distribution. Le pipeline 2 (ligne verte) montre une intensité plus modérée, inférieure à 2000 V/m, avec des variations ondulatoires. Le pipeline 3, en rouge, présente un profil plus plat, avec des valeurs inférieures à 1000 V/m. Les pipelines 4 et 5 enregistrent des champs encore plus faibles, respectivement inférieurs à 500 V/m et 250 V/m. Ces résultats mettent en évidence la forte dépendance du champ électrique à la position spatiale du pipeline par rapport à la ligne électrique, ainsi que la décroissance progressive de l'intensité du champ avec l'éloignement.

III.10 Présence de plusieurs parties de pipelines a des différentes positions sous la ligne 400 KV

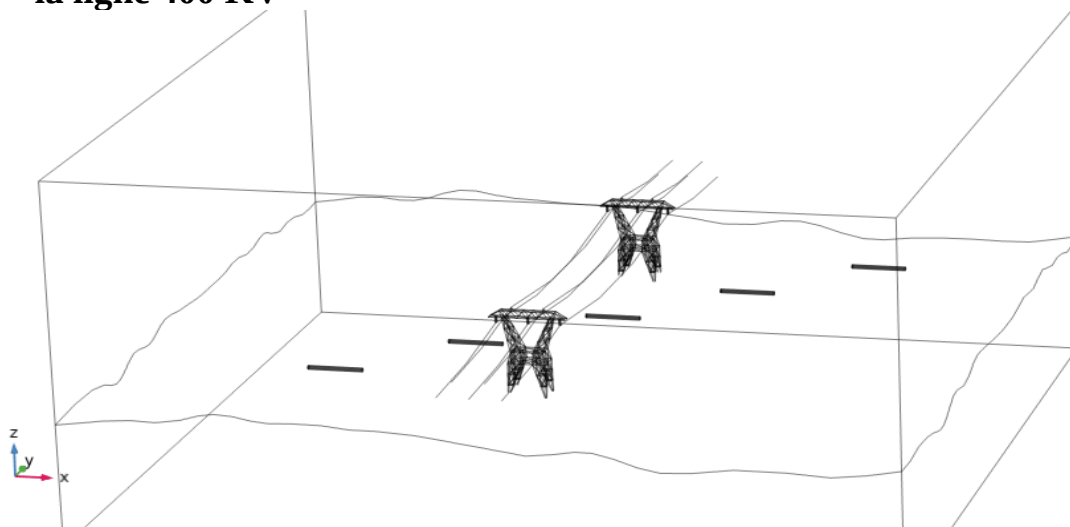


Figure III-28: Plusieurs passages de pipelines sous la ligne de 400 kV selon un angle perpendiculaire

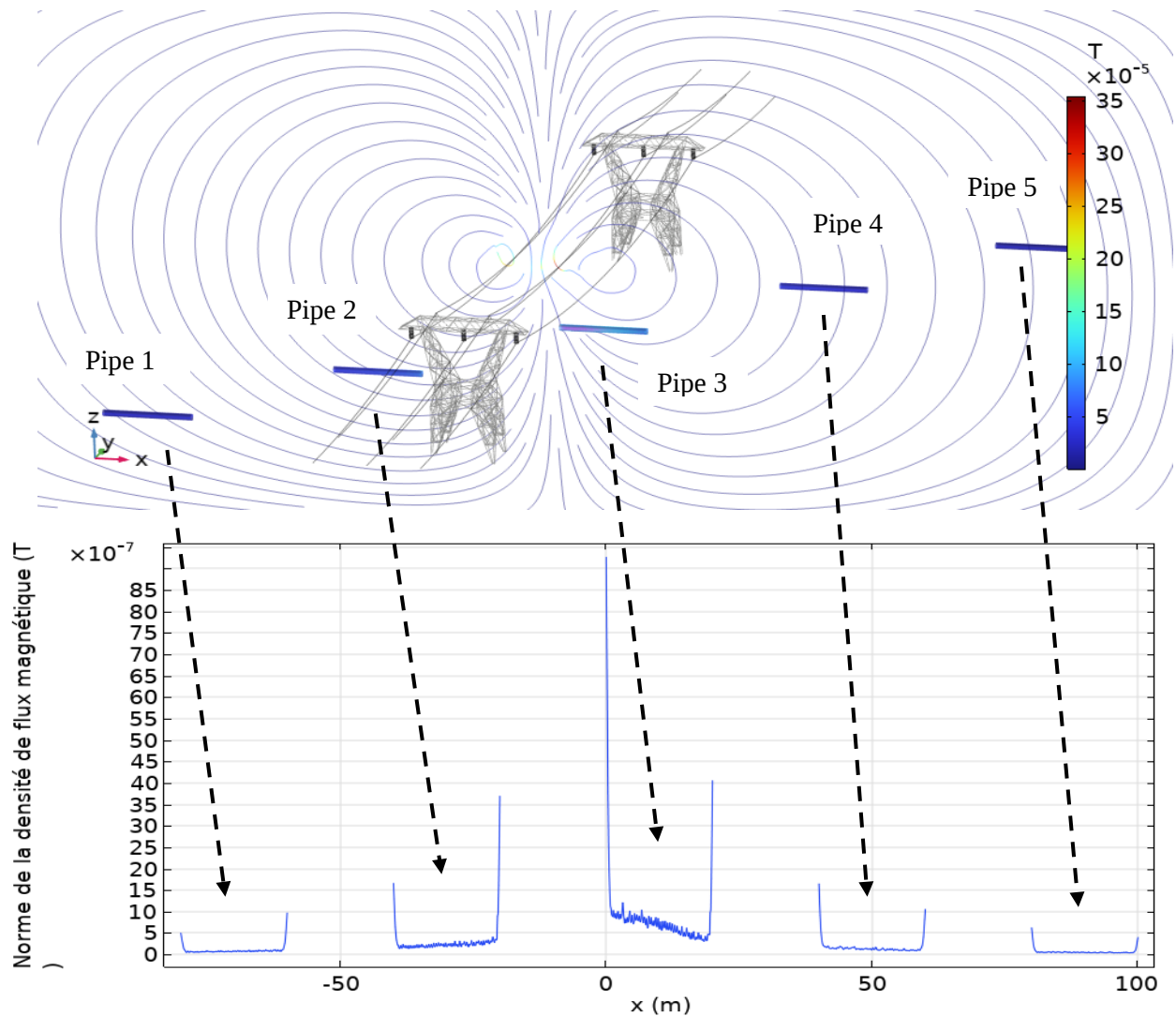


Figure III-29 : Calcul du champ magnétique induit sur les tronçons de pipelines

La figure III-29 présente les courbes de la norme du champ magnétique mesuré le long de la surface supérieure de cinq tronçons de pipelines distincts, disposés perpendiculairement à la ligne électrique. Il apparaît que le pipeline situé au centre de la ligne, désigné comme Pipe 3, est soumis à l'intensité de champ magnétique la plus élevée, atteignant $1 \mu\text{T}$. Les pipelines 2 et 4 présentent des niveaux d'intensité modérés, inférieurs à $0,5 \mu\text{T}$. En revanche, les pipelines 1 et 5 enregistrent des valeurs nettement plus faibles, proches de zéro. Ces résultats mettent en évidence une forte dépendance du champ magnétique à la position spatiale du pipeline par rapport à la ligne à haute tension, ainsi qu'une décroissance progressive de l'intensité du champ avec l'éloignement de l'axe central de la ligne.

Il est à noter que les pics observés sur les courbes correspondent à un effet de pointe, traduisant une concentration locale du champ magnétique.

III.11 Conclusion

L'utilisation du logiciel COMSOL dans le cadre de la simulation des champs électrique et magnétique présente de nombreux avantages. Il constitue une solution à la fois efficace et flexible pour le calcul de ces champs à proximité des lignes électriques de transport à haute et très haute tension.

Les résultats obtenus ont permis de visualiser l'intensité et la répartition des champs dans l'environnement proche des lignes, mettant en évidence les zones de forte exposition, en particulier sous les conducteurs. Ces analyses confirment que les champs magnétiques dépendent de l'intensité du courant ainsi que de la distance par rapport aux câbles. L'intensité du champ est maximale directement sous les lignes, puis diminue rapidement à mesure que l'on s'en éloigne.

Notre étude montre également que la présence d'un pipeline à proximité d'une ligne à haute tension est soumise à l'influence des champs électromagnétiques, susceptibles d'induire des tensions significatives dans les canalisations. Le pipeline, étant un bon conducteur d'électricité, est particulièrement sensible à l'influence du champ magnétique : les charges électriques présentes à la surface du métal subissent un mouvement alternatif synchronisé avec la fréquence de la tension électrique. Ce phénomène engendre ainsi une densité de courant induit à l'intérieur du pipeline.

Ces résultats sont essentiels pour évaluer l'exposition aux champs électromagnétiques dans les zones habitées et pour respecter les normes de sécurité imposées par les réglementations en vigueur.

Conclusion Générale

Conclusion générale

Ce mémoire de fin d'étude met en évidence l'intérêt des outils de simulation comme COMSOL pour modéliser avec précision les champs électromagnétiques générés par les lignes aériennes 400 kV. Les résultats montrent que le champ électrique est principalement influencé par la tension et la géométrie, tandis que le champ magnétique dépend directement de l'intensité du courant. Les deux champs atteignent leurs valeurs maximales sous les lignes et décroissent avec la distance, mais le champ magnétique persiste plus loin. La simulation de défauts (court-circuit, surtension, manque de phase) a permis d'observer les variations importantes des champs dans des situations anormales, renforçant la nécessité de leur surveillance. Ces analyses sont cruciales pour garantir la sécurité des populations, respecter les réglementations et optimiser la conception des infrastructures électriques.

L'interférence de ces lignes de transmission à haute tension avec les pipelines transportant des produits pétroliers et gazeux peut causer un véritable problème que ce soit sur la sécurité du personnel travaillant sur site ou sur public et menace l'intégrité de l'équipement de protection cathodique, le revêtement du pipeline et la canalisation d'acier. Il favorise aussi le phénomène de corrosion par courant alternatif ce qui conduit à des pertes économiques

L'objectif, dans ce mémoire, était de répondre à un besoin industriel très important, en matière de diagnostic de la corrosion par courant alternatif due à l'interférence des lignes de transmission à haute tension (400 kV) et les pipelines enterrés.

Afin de résoudre ce problème d'interférence, plusieurs méthodes sont proposées afin d'atténuer la tension induite au niveau du pipeline :

- Augmentation de la distance entre la conduite et les lignes à haute tension.
- Configuration optimum des fils de phases et de terre.
- La mise à la terre de la conduite.
- La compensation de la tension induite.
- Installation de joints isolants.
- Réparation des défauts de recouvrement.
- Echange du sol aux alentours de la conduite.
- Utilisation de câbles de mise à la terre parallèles.

Référence

- [1] BELKHIRI YAMINA-Etudes des Phénomènes d'Induction Electromagnétiques Liés au Voisinage des Ouvrages THT de Transport de l'Electricité -thèse de doctorat-université Batna-2018.
- [2] Cahier de charge de la Société Algérienne de Gestion du Réseau de Transport de l'Electricité (GRTE), "Câbles, matériels de ligne", Décembre, 2010.
- [3] CHIBANE Samira-Dimensionnement d'une Ligne Aérienne à Haute Tension-université tiziouazzou-2012.
- [4] B. Cova, RETE T&D, G. Pirovano, S. Meregalli -CESI (Centre électrotechnique expérimental italien)-A5/5058607-Rv.02.
- [5] BOUCHAMA Karima Malak et KOUARTA Ouail -Étude du contournement électrique des isolateurs pollués- Université 8 Mai 1945 Guelma-2024.
- [6] Véronique Beauvois, Yves Beckers, Frédéric Rollin- université d'ulière - Effets potentiellement générés par l'exploitation d'une ligne électrique aérienne à haute tension sur les exploitations agricoles situées à proximité-2020.
- [7] Halliday et *al*, 2007; Stöcker et *al*, 2007; Perrin et Souques, 2010.
- [8] RTE. Les champs électromagnétiques de très basse fréquence.
- [9] Effet des écrans passifs et actifs sur la réduction du champ électromagnétique rayonné par une ligne THT 500 kV - AGTAWWAD HANA - OUIFI ABDENOUR-mémoire de master 20186 UNIVERSITE BADJI MOKHTAR- ANNABA.
- [10] Salma Abu Izzeddin, Kamal Berbari, Hiba Obeid "Electromagnetic Fields from Power Transmission Lines", American University of Beirut, Lebanon, Mai 2006.)
- [11] TOURAB WAFA; Caractérisation de l'environnement électromagnétique au voisinage des lignes électriques haute tension ; diplôme de DOCTORAT ; UNIVERSITE BADJI MOKHTAR - ANNABA;2016.
- [12] Lilien and Al-Effects of extremely low frequency electromagnetic fields (ELF) on human beings-gastartikel- 2008.
- [13] AFSSET Agence française de sécurité de l'environnement et du travail. Exposition aux champs électromagnétiques ,2008.

- [14] <https://www.clefdeschamps.info/courant-parasite-et-champ-electromagnetique-quelle-difference>.
- [15] Hydro-Québec-Dr Michel Plante Direction – Santé et sécurité Le réseau électrique et La santé Les champs électriques et magnétiques.
- [16] Institut national de recherche et de sécurité- Équipements et installations de transport et de distribution d'électricité-champ electromagnetique-ED4210
- [17] ANSES-Conséquences des champs électromagnétiques d'extrêmement basses fréquences sur la santé animale et les performances zootechniques- 2015- Édition scientifique
- [18] Institut national de recherche et de sécurité lignes directrices pour l'établissement de limites d'exposition aux champs électriques et magnétiques variables dans le temps .fréquences de 1 Hz à 100 kHz-pr47.222.
- [19] André CHANAL et Jean-Pierre LÉVÊQUE -Lignes aériennes : matériels Conducteurs et câbles de garde-technique de l'ingénieur.
- [20] Véronique Beauvois, Yves Beckers, Frédéric Rollin -Effets potentiellement générés par l'exploitation d'une ligne électrique aérienne à haute tension sur les exploitations agricoles situées à proximité-université Uliege-2020.
- [21] E. P., TSCHEULIN Th., VANBERGEN A. J., VIAN A., BALIAN E., GOUDESEUNE L., 2018. The impacts of artificial Electromagnetic Radiation on wildlife.
- [22] Pietruszewski, S., Martínez, E., 2015. Magnetic field as a method of improving the quality of sowing material.
- [23] Kolbabová, T., Malkemper, E.P., Bartoš, L., Vanderstraeten, J., Turčáni, M., Burda, H., 2015. Effect of exposure to extremely low frequency magnetic fields on melatonin levels in calves is seasonally dependent).
- [24] Mahmood, M., Bee, O.B., Mohamed, M.T.M., Subramaniam, S., 2013. Effects of electromagnetic field on the nitrogen, protein and chlorophyll content and peroxidase enzyme activity in oil palm.
- [25] ANSES, 2015. Conséquences des champs électromagnétiques d'extrêmement basses fréquences sur la santé animale et les performances zootechniques. Avis de l'Anses. Rapport d'expertise collective. Août 2015).

Résumé

Ce mémoire porte sur l'évaluation des champs électromagnétiques à basse fréquence générés par les lignes de transport d'électricité à haute tension, en particulier celles de 400 kV. L'objectif principal est d'analyser l'impact de ces champs sur la sécurité, la santé humaine et la compatibilité électromagnétique avec les infrastructures environnantes. À travers une modélisation numérique, nous avons simulé les champs électrique et magnétique produits sous différentes conditions de charge, ainsi qu'en présence de défauts électriques tels que les surtensions et les court-circuits.

Une attention particulière a été portée à l'étude de l'influence de ces champs sur les pipelines métalliques situés à proximité des lignes de transport. Plusieurs configurations d'agencement ont été analysées, notamment les dispositions parallèles et perpendiculaires entre les lignes électriques et les pipelines. Les résultats obtenus permettent de mieux comprendre les risques potentiels d'interférences et de proposer des recommandations pour une cohabitation sûre entre les lignes de transport et les infrastructures sensibles.

Mots clés : Ligne Electrique Aérienne THT/HT, Champ Electromagnétique, Basse Fréquence, Pipelines.

المخلص

تتناول هذه المذكرة تقييم المجالات الكهرومغناطيسية ذات التردد المنخفض الناتجة عن خطوط نقل الكهرباء ذات الجهد العالي، وبشكل خاص الخطوط التي تعمل بجهد 400 كيلوفولت. يهدف هذا العمل إلى دراسة تأثير هذه المجالات على السلامة العامة، صحة الإنسان، والتوافق الكهرومغناطيسي مع البنى التحتية المجاورة. قمنا من خلال المحاكاة العددية بنمذجة المجالات الكهربائية والمغناطيسية المتولدة في ظروف تحميل مختلفة، وكذلك في حالة وجود أعطال كهربائية مثل حالات زيادة الجهد والدوائر القصيرة (القصور الذاتي). كما تم التركيز على دراسة تأثير هذه المجالات على أنابيب نقل المواد الموجودة بالقرب من خطوط النقل، وذلك باختبار عدة أوضاع مختلفة، موازية ومتعامدة مع خطوط الكهرباء.

الكلمات المفتاحية: خطوط الطاقة الهوائية THT/HT، المجال الكهرومغناطيسي، التردد الأساسي، خطوط الأنابيب.

Abstract

This thesis focuses on the assessment of low-frequency electromagnetic fields generated by high-voltage power transmission lines, specifically those operating at 400 kV. The main objective is to evaluate the impact of these fields on public safety, human health, and electromagnetic compatibility with nearby infrastructure.

Through numerical simulations, we modeled the electric and magnetic fields under various load conditions, as well as in the presence of electrical faults such as overvoltage and short circuits. Particular attention was given to studying the influence of these fields on nearby pipelines. Several spatial configurations were analyzed, including parallel and perpendicular alignments between power lines and pipelines.

The results provide valuable insights into potential electromagnetic interference risks and contribute to the development of technical recommendations for the safe coexistence of power transmission lines and sensitive infrastructure.

Keywords: Overhead Power Line THT/HT, Electromagnetic Field, Low Frequency, Pipelines.