

UNIVERSITE KASDI MERBAH OUARGLA

Faculté des Sciences Appliquées

Département de Génie Electrique



Thèse présentée en vue de l'obtention du diplôme de Doctorat LMD

Domaine : Sciences et Technologies.

Filière : Electrotechnique.

Spécialité : Réseaux électrique.

Présenté par :

REZZAG BARA ILIES

Thème :

Etude de la pollution électromagnétique des câbles électriques

Thèse soutenue publiquement le : 24/04/2024

Devant le jury composé de :

BOUDJELLA Houari	MCA	Université de Ouargla	Président
AYAD Ahmed Nour El Islam	MCA	Université de Ouargla	Directeur de thèse
LAROUCI Benyakhlef	MCA	Université de Ouargla	Co-directeur de thèse
ROUIBAH Taher	MCA	Université de Ouargla	Examineur
AYAD Abdelghani	Pr	Université de Sidi Bel Abbès	Examineur
BENDIMRAD Salhdine	MCA	Université de Sidi Bel Abbès	Examineur

Année universitaire 2023/2024

Dédicace.

Je souhaite dédier cette thèse à ...

À mon père, dont l'exemple de travail acharné, de persévérance et d'intégrité a été une source d'inspiration constante. Merci pour ton amour inconditionnel et ton soutien indéfectible.

À ma mère, dont la patience infinie, le dévouement et les encouragements m'ont guidé tout au long de ce parcours académique. Ton amour est ma force.

À ma femme, ma complice et ma source constante de motivation. Ton amour et ton soutien ont illuminé chaque étape de cette thèse.

À mes frères, compagnons de vie et confidents, qui ont partagé les joies et les défis de ce chemin. Leurs conseils avisés ont été précieux.

À mes amis, qui ont rendu cette aventure encore plus mémorable. Vos rires, votre compréhension et votre amitié ont enrichi ma vie.

À tous ceux qui ont contribué, de près ou de loin, à ce travail, je vous exprime ma gratitude sincère.

Ce travail est dédié à tous ceux qui ont été une partie essentielle de mon parcours.

Merci pour tout

Remerciement.

Je tiens à exprimer ma profonde gratitude à mon directeur de thèse, le Pr. **AYAD Ahmed Nour El Islam**, ainsi qu'à mon co-directeur de thèse, Dr. **LAROUCI Benyekhlef**, pour leur encadrement attentif, leurs conseils éclairés et leur patience infaillible. Leur direction a été cruciale dans la réussite de ce travail de recherche, et leur soutien constant, leurs précieux commentaires et leur engagement envers l'avancement de ce projet ont été inestimables

Je tiens à remercier sincèrement le président du jury, le Dr. **BOUDJELLA Houari**, ainsi que les membres du jury, le Dr. **ROUBAH Taher**, le Dr. **BENDIMRAD Salhdine**, le Pr. **AYAD Abdelghani**, pour avoir pris le temps d'évaluer ce travail et pour leurs commentaires constructifs.

Je souhaite exprimer ma reconnaissance envers tous ceux qui ont contribué de près ou de loin à la réalisation de cette thèse, en particulier à ma famille, mes amis et mes proches, pour leur soutien indéfectible.

Je tiens également à exprimer ma reconnaissance envers les enseignants et les ouvriers du département de génie électrique pour leur soutien tout au long de ce projet.

Enfin, un grand merci à tous les enseignants, chercheurs et personnes qui ont partagé leurs connaissances et expériences, contribuant ainsi à l'enrichissement de cette recherche.

Merci à tous pour votre précieux

Table des matières

Introduction general.....	1
Chapitre I : Généralité sur les câbles électriques de puissances souterrains	
I.1. Introduction	3
I.2. Constitution des réseaux électriques	3
I.3. Types des lignes électriques.....	3
I.3.1. Lignes électriques aériennes	4
I.3.2. Lignes électriques souterraines.....	5
I.3.3. Lignes électriques sous-marines.....	6
I.4. Câbles électriques souterrains	7
I.4.1. Structure d'un câble électrique souterrain	7
I.4.1.1. Conducteur (Ame conductrice).....	8
I.4.1.2. Différentes formes de conducteurs	10
I.4.1.3. Ecran semi-conducteur	10
I.4.1.4. Blindage métallique	10
I.4.1.5. Gaine de protection.....	11
I.4.1.6. Isolant diélectrique.....	11
I.4.2. Classification des câbles souterrains	12
I.4.3. Types de câbles souterrains	12
I.4.4. Techniques de pose.....	15
I.5. Pollution électromagnétique.....	16
I.5.1. Pollution électromagnétique liée aux câbles électriques	17
I.5.2. Risque et influence de champs magnétiques	17
I.5.3. Risque et influence de champs électriques	18
I.6. L'induction électromagnétique	18
I.6.1. Effets de proximité et pelliculaires.....	18
I.6.2. Présence des courants induits	18
I.7. La pollution magnétique générée par un câble souterrain.....	19

Table des matières

I.8. Défauts dans les câbles électriques	22
I.8.1. Techniques des diagnostics des câbles souterrains	23
I.8.1.1. L'inspection visuelle.....	23
I.8.1.2. Spectroscopie d'impédance	23
I.8.1.3. Réflectométrie.....	24
I.9. Conclusion.....	24
 Chapitre II : Modélisation mathématique des câbles de puissance souterrains	
II.1. Introduction.....	26
II.2. Évaluation du champ produit par un câble souterrain	26
II.2.1. Quatre équations de Maxwell	26
II.2.2. Modélisation des phénomènes électromagnétiques	29
II.3. Modèle numérique	30
II.3.1. Conditions aux frontières	32
II.3.2. Résolutions des équations aux dérivées partielles	32
II.3.2.1. Méthode des Eléments Finis (MEF)	33
I.4. Modèle analytique	35
II.4.1. Modèle d'énergie	37
II.4.2. Champ magnétique généré par un seul conducteur	38
II.5. Simulation du modèle numérique	38
II.5.1. Description du logiciel numérique	39
II.5.2. Procédure de simulation sous COMSOL Multiphysiques	40
II.6. Validation des résultats par les méthodes expérimentales.....	41
II.6.1. Mesure du champ électromagnétique sur les lignes de transport d'énergie.....	41
II.6.2. Évaluation du champ de dispersion à l'aide d'un capteur magnétique	42
II.6.3. Banc d'essai expérimental de caractérisation thermique	43
II.7. Conclusion	44

**Chapitre III : Mesures de la pollution magnétique générée par des câbles souterrains
400kV et 220kV**

III.1. Introduction	45
III.2. Structure de la centrale à gaz Hassi Messaoud.....	45
III.3. Câble de puissance souterrain HTB 400 kV.....	48
III.4. Description de l'appareil de mesure du champ magnétique	50
III.4.1. Objectif et caractéristiques.....	50
III.4.2. Mesure des champs magnétiques.....	51
III.5. Description du schéma de mesure	52
III.6. Présentation des mesures électriques en fonction du temps.....	52
III.7. Résultats expérimentaux du champ magnétique	56
III.7.1. Mesure pour un câble électrique de 400 kV	56
III.7.2. Mesure pour un câble électrique de 220 kV	57
III.7.2.1. Présentation des appareils de mesure des paramètres électriques.....	58
III.7.2.2. Câbles souterrains 220 kV dans l'installation électrique	59
III.7.2.3. Résultats expérimentaux pour un câble électrique 220 kV.....	59
III.7.2.3.1. Mesure de la puissance électrique pour une tension nominale 220kV	59
III.7.2.3.2. Résultats expérimentaux du champ magnétique.....	59
III.8. Conclusion.....	61

**Chapitre IV : Simulation des câbles électriques souterrain de puissance à 400kV et
220kV**

IV.1. Introduction	62
IV.2. Câble électrique souterrain de puissance 400kV.....	62
IV.2.1. Présentation géométrique et structurelle du câble souterrain 400kV	62
IV.2.2. Représentation géométriques d'une ligne électrique souterraine	64
IV.2.3. Structure d'un câble électrique 400kV	64
IV.2.4. Maillage du domaine d'étude	65
IV.2.5. Résultats de simulation des câbles triphasés souterrains HTB 400 kV	66
IV.2.5.1. Densité de flux magnétique à proximité des CES	66

Table des matières

IV.2.5.2. Distribution des lignes de la DFM	66
IV.2.5.3. Evaluation de la densité de flux magnétique des CES.....	67
IV.2.5.4. Comparaison des résultats de simulation de mesure du champ magnétique et expérimental.....	79
IV.2.5.5. Résultats des simulations du champ électrique.....	70
IV.2.5.6. Mesure du champ électrique	71
IV.2.5.7. Cas d'un court-circuit des câbles souterrains.....	72
IV.2.5.8. DFM dans les CES en présence d'un court-circuit.....	72
IV.2.5.9. Mesure de la DFM en présence d'un court-circuit	73
IV.3. Câble électrique souterrain de puissance 220 kV.....	74
IV.3.1. Présentation de la structure du câble souterrain 220 kV	74
IV.3.2. Propriétés géométriques, physique et électrique	74
IV.3.3. Résultats de la simulation pour des câbles souterrains HTB 220kV	76
IV.3.3.1. Conditions normales dans un câble souterrain triphasé.....	76
IV.3.3.2. Influence de la variation de la puissance électrique demandée	78
IV.3.3.3. Impact du changement de la distance sur la structure horizontale.....	79
IV.3.3.4. Conditions anormales dans les câbles souterrains (Défaut).....	81
IV.3.3.5. Court-circuit établie au câble HTB 220 kV	81
IV.4. Conclusion.....	82
Conclusion Générale.....	83

Liste des figures

Chapitre I : Généralité sur les câbles électriques de puissances souterrains

Figure I.1. Structure d'un réseau électrique	4
Figure I.2. Ligne aérienne.....	5
Figure I.3. Ligne électrique souterraine	6
Figure I.4. Ligne électrique sous-marine	7
Figure I.5. Câble électrique souterrain HTB	8
Figure I.6. Influence de la température ambiante sur le courant nominal	9
Figure I.7. Diverses configurations de conducteur	10
Figure I.8. Classification des câbles selon le nombre de phase et la forme	12
Figure I.9. Constitution d'un câble souterrain isolé au polyéthylène réticule légende.....	13
Figure I.10. Câble moyenne tension MT	14
Figure I.11. Câbles basse tension BT	14
Figure I.12. Techniques de pose géométriques des câbles souterrains	15
Figure I.13. Lignes électriques de puissances souterraines (structure horizontale)	16
Figure I.14. Pollution magnétique d'une ligne souterraine	19
Figure I.15. Valeurs moyennes des champs électrique et magnétique à proximité des lignes électriques aériennes ($f = 50$ Hz).....	20
Figure I.16. Câbles localement endommagés	22
Figure I.17. Définition du tangent delta : $\tan(\delta)$	24
Figure I.18. Principe de la réflectométrie	24

Chapitre II : Modélisation mathématique des câbles de puissance souterrains

Figure II.1. La continuité entre les différents milieux.....	29
Figure II.2. Maillage à plusieurs dimensions d'un domaine d'étude	33
Figure II.3. Champ magnétique généré par un conducteur	35
Figure II.4. La loi de l'ampère pour un conducteur cylindrique (courant sortant)	36
Figure II.5. Vecteur de champ magnétique	37
Figure II.6. L'interface du logiciel COMSOL Multiphasiques.....	39
Figure II.7. Diagramme des étapes de résolution du problème dans COMSOL Multiphasiques	40
Figure II.8. Mesures de champ électromagnétique pour des lignes de transmission	42
Figure II.9. Capteur de mesure du champ de dispersion pour câbles multiconducteurs	43
Figure II.10. Banc d'essai pour caractériser l'isolation d'un câble souterrain	44

Chapitre III : Mesures de la pollution magnétique générée par des câbles souterrains 400kV et 220kV

Figure III.1. Schéma simplifié de l'emplacement du câble souterrain dans la centrale électrique à gaz Hassi Messaoud	45
--	----

Liste de figures

Figure III.2 : Poste de transformation 220/400 kV de la centrale à gaz Ouargla Hassi Messaoud.....	46
Figure III.3. La liaison entre les lignes électriques aérienne et souterraines.....	46
Figure III.4. Poste blindé de tension 400 Kv.....	47
Figure III.5. Schéma synoptique du système SCADA dans la salle de contrôle et surveillance..	47
Figure III.6. Affichage du schéma synoptique du Groupe 03.....	48
Figure III.7. Coupe transversale d'un câble de puissance 400 kV, marque ILJIN.....	48
Figure III.8. L'emplacement de câble souterrain dans le caniveau.....	49
Figure III.9. Installation d'un Teslamètre au niveau d'un câble souterrain 400 Kv.....	49
Figure III.10. PHYWE Teslameter, digital.....	50
Figure III.11. Schéma descriptif de la position des deux points de mesures.....	52
Figure III.12. Une courbe représentant les changements de tension électrique en 24 heures en Groupe 01.....	53
Figure III.13. Variation de courant électrique durant une journée pour le tranche 01.....	53
Figure III.14. La puissance électrique générée en fonction du temps de la tranche 01.....	54
Figure III.15. La tension électrique durant 24 heures pour la tranche 03.....	54
Figure III.16. Changements de courant électrique durant 24 heures en tranche 03.....	55
Figure III.17. La puissance électrique générée en 24 heures en tranche 03.....	55
Figure III.18. Représentation de résultat de mesure de l'induction magnétique.....	56
Figure III.19. Schéma simplifié de l'emplacement de la ligne souterraine dans la centrale électrique.....	57
Figure III.20. Les appareils de mesure des paramètres électriques.....	58
Figure III.21. L'interface du logiciel de surveillance des lignes de transport.....	58
Figure III.22. Câbles électriques souterrains à la sortie des caniveaux 220Kv.....	59
Figure III.23. La courbe de puissance électrique en 24 heures.....	60
Figure III.24. Mesure du champ magnétique d'un câble souterrain 220 kV à l'aide d'un Teslamètre.....	60

Chapitre IV : Simulation des câbles électriques souterrain de puissance à 400kV et 220kV

Figure IV.1. Câble souterrain à HTB 400 kV.....	62
Figure IV.2. Différentes structures d'une ligne en 2 Dimensions.....	64
Figure IV.3. Les différentes couches du câble électrique HTB 400 kV.....	65
Figure IV.4. Maillage du domaine d'étude pour CES de HTB.....	65
Figure IV.5. La distribution de la DFM des CES à HTB.....	66
Figure IV.6. Les lignes du champ magnétique dans les câbles électriques HTB.....	67
Figure IV.7. DFM à proximité des CES (Valeur du courant : 900 A).....	68
Figure IV.8. Comparaison entre les valeurs de simulation et expérimentaux de la DFM.....	69

Liste de figures

Figure IV.9. Distribution du champ électrique dans les CES pour 200 A	70
Figure IV.10. Calcul du champ électrique près des CES	71
Figure IV.11. DFM pour un court-circuit de 100 kA	72
Figure IV.12. DFM en présence d'un court-circuit de 100 kA	73
Figure IV.13. Câble souterrain HTB 220 kV en XLPE	74
Figure IV.14. Calcul de la DFM pour des câbles souterrains 220 kV.....	77
Figure IV.15. Comparaison des résultats en fonction de la variation du courant.....	78
Figure IV.16. Variation de charge dans les câbles de puissance souterrains 220 kV	79
Figure IV.17. Influence de la distance horizontale entre les câbles avec un courant de 720 A	79

Liste des tableaux

Chapitre I : Généralité sur les câbles électriques de puissances souterrains

Tableau I.1. Propriétés électriques des matériaux conducteurs	9
Tableau I.2. Les caractéristiques électriques principales des matériaux isolants	11
Tableau I.3. Les caractéristiques thermiques des matériaux isolants	12
Tableau I.4. Structures de pose des lignes souterraines	15
Tableau I.5. Les seuils de perception de l'Organisation Mondiale de la Santé	17
Tableau I.6. Les seuils de perception de champs électriques	18
Tableau I.7. La pollution magnétique mesurée des câbles souterrains	19
Tableau I.8. Limites d'exposition pour les données de champ basse fréquence (public, travailleur) par pays	21

Chapitre III : Mesures de la pollution magnétique générée par des câbles souterrains 400kV et 220kV

Tableau III.1. Résultats expérimentaux de la mesure sur site du champ magnétique.....	57
Tableau III.2. Résultats expérimentaux de la mesure sur site du champ magnétique.....	61

Chapitre IV : Simulation des câbles électriques souterrain de puissance à 400kV et 220kV

Tableau IV.1. La taille de différentes composantes d'un câble souterrain 400 kV.....	63
Tableau IV.2. Les différents matériaux d'un CES à THT 400 kV	63
Tableau IV.3. Les distances entre les phases d'une ligne souterraine.....	64
Tableau IV.4. La valeur de l'intensité du courant en court-circuit dans un câble de 400 Kv...	72
Tableau IV.5. Taille de la structure du câble haute tension souterrain	75
Tableau IV.6. Matériaux constituant le câble souterrain 220 kV	75
Tableau IV.7. Caractéristiques électriques du câble XLPE.....	75
Tableau IV.8. Influence de la distance en profondeur entre les câbles souterrains avec un courant 720 A	80
Tableau IV.9. Défaut avec surintensité dans trois phases	81
Tableau IV.10. Câbles souterrains 220 kV sous court-circuit.....	81

Introduction générale

Au cours de la dernière décennie, d'importantes recherches ont été menées pour le contrôle et la mesure de la pollution électromagnétique générée par les lignes électriques. L'objectif principal de ces mesures est de faire des inspections pour réduire les risques et les effets néfastes sur les techniciens de maintenance, les objets à proximité et sur les appareils.

Plusieurs techniques sont utilisées pour évaluer le champ magnétique, que ce soit par la simulation numérique, l'approche analytique ou par les mesures expérimentales. La surveillance de la pollution électromagnétique des lignes électriques peut être réalisée par des méthodes traditionnelles à l'aide d'appareils à plusieurs positions, ou de manière innovante en exploitant des drones équipés de sondes magnétiques [1].

Différents types de logiciels de simulation numérique, tels que ANSYS, COMSOL, FEMM ont été utilisés dans divers travaux. Les résultats obtenus ont démontré une forte concordance avec les mesures réelles. Les mesures effectuées autour des lignes de transport, à différents niveaux horizontaux et verticaux, mettent en évidence l'influence de l'éloignement des lignes sur la pollution magnétique. La présence de défauts transitoires dans le réseau électrique révèle une distribution longitudinale significative du champ magnétique, dépassant parfois les normes et limites internationales [2].

La thèse est composée de quatre chapitres essentiels :

Le premier chapitre : Nous avons commencé par une vue d'ensemble des réseaux électriques, suivi d'une discussion sur les lignes électriques et leurs différents types. Ensuite, nous nous sommes penchés sur les câbles électriques souterrains, en abordant leur classification, nature, méthodes d'installation, aspects d'ingénierie, caractéristiques, avantages et inconvénients.

Ce chapitre a également traité de la pollution électromagnétique émanant des lignes de transport d'électricité et des câbles souterrains, en plus des normes concernant les limites d'exposition à ces champs. Pour conclure, nous avons examiné les différents types de défauts pouvant affecter les câbles souterrains et les méthodes utilisées pour leur diagnostic.

Le deuxième chapitre : Ce chapitre est dédié à l'exposé des concepts de base et des équations régissant l'électromagnétisme, ainsi qu'à la présentation des méthodes numériques utilisées pour modéliser et simuler les caractéristiques électromagnétiques à l'intérieur et autour des câbles souterrains et lignes électriques. Notre objectif est de décrire et de calculer le champ magnétique distribué autour des lignes de transport électriques, aussi bien dans des conditions normales et statiques et dans des situations transitoires et dynamiques en cas de défaut.

Le troisième chapitre : Dans ce chapitre, nous aborderons les différentes sections de la centrale électrique de Hassi Messaoud, où des mesures de la pollution magnétique générée par les câbles électriques souterrains ont été effectuées. Nous mettrons particulièrement l'accent sur les essais expérimentaux menés sur les sections essentielles qui contiennent les câbles souterrains de 400 kV et 220 kV.

Le quatrième chapitre : Ce chapitre présente les résultats de simulations des câbles souterrains de 400 kV et 220 kV afin de confirmer nos résultats expérimentaux sur le terrain. Pour cette raison, nous avons étudié le champ magnétique à différentes distances généré autour de ces câbles souterrains, à la sortie et à l'intérieur des caniveaux. Plusieurs facteurs seront pris en compte, tels que la variation de la charge, la présence de défauts et la variation de la distance.

Chapitre I

Généralité sur les câbles électriques de puissances souterrains

I.1. Introduction

Les câbles électriques de transport, tels que ceux aériens, souterrains et sous-marins, constituent les principaux moyens de transport de l'énergie électrique au sein d'un réseau électrique.

Les câbles enfouis sont employés pour le transport souterrain, tandis que les câbles suspendus sont utilisés pour le transport aérien. En raison de la demande énergétique élevée, les câbles souterrains sont souvent préférés pour le transport de l'énergie à des niveaux de tension HTB et HTA en raison de leur meilleure résistance aux conditions météorologiques extrêmes, comme les orages ou la foudre, de leur coût relativement bas sur de courtes distances, et de leur nécessité moindre en termes de maintenance [3].

I.2. Constitution des réseaux électriques

De manière fondamentale, le réseau électrique est constitué de trois principales parties comprennent la production, transport et la distribution d'électricité (Figure I.1). Les centrales électriques génèrent de l'électricité, comme les centrales thermiques ou hydroélectriques (production centralisée. Cette énergie est acheminée vers les consommateurs via des réseaux électriques à forte capacité sur de grandes distances.

Le réseau de transport d'électricité se divise en deux sections principales, réseau de transport et le réseau de répartition. Ces deux parties de réseau sont caractérisées par plusieurs aspects, tels que la tension, configuration, longueur, modes d'opération et par leurs buts spécifiques entre autres [3].

I.3. Types des lignes électriques

Une ligne électrique se caractérise par un niveau de tension, type et section du conducteur (aérien, câble souterrain, ou sous-marin), ligne en faisceaux. En général, les conducteurs sont fabriqués en aluminium ou en cuivre avec différentes sections (dépend niveau de tension).

Selon le principe de conservation de puissance, deux raisons expliquent la haute tension :

- L'augmentation de la tension réduit les pertes par l'effet de joule.
- La réduction du courant permet l'utilisation de conducteurs plus petits.

L'objectif de cette dernière est d'augmenter la capacité d'une ligne électrique à transporter de l'énergie [4].

Depuis 1994, la majorité des pays développés construit de nouvelles lignes électriques type HYB et HTA (aérienne et souterraine comme des projets pilotes) à 220 kV, 400 kV, 500 kV et 730 kV implique d'importants défis technologiques, particulièrement en ce qui concerne les raccordements, et s'accompagne de coûts nettement plus élevés.

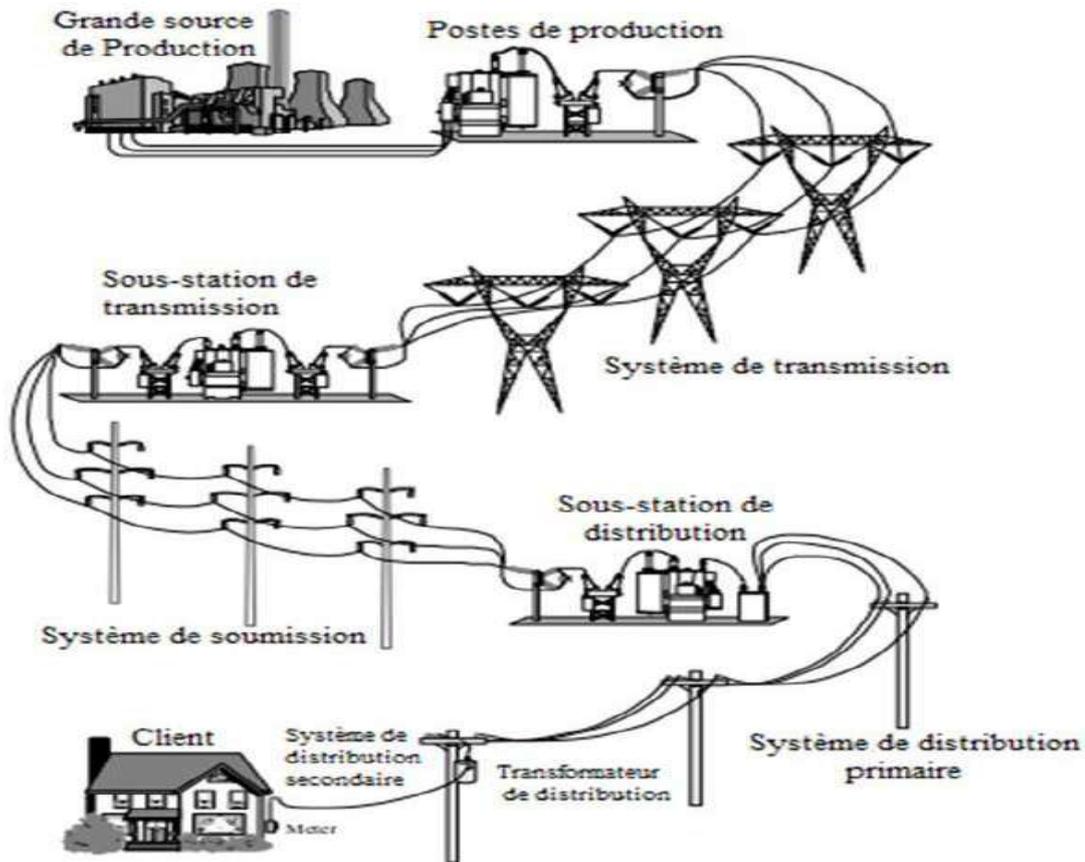


Figure I.1. Structure d'un réseau électrique [3].

Les lignes électriques peuvent être catégorisées en fonction de plusieurs critères, parmi lesquels :

- **Situation dans l'espace** : lignes aériennes (installées au-dessus du sol) ou lignes électriques souterraines (câbles enfouis).
- **Classe et niveau de tension** : lignes à très haute tension, à haute tension, à moyenne et basse tension.
- **Nature de la tension** : alternative ou continue, monophasée ou triphasée [5].

I.3.1. Lignes électriques aériennes

Les lignes aériennes sont constituées de plusieurs conducteurs nus en d'aluminium ou de son alliage (Figure I.2), ces lignes sont suspendues par des pylônes.

La fonction principale d'une ligne aérienne est de transmettre l'énergie électrique depuis les centrales de production jusqu'à le réseau de distribution (le consommateur) [5].



Figure I.2. Ligne aérienne [6].

I.3.2. Lignes électriques souterraines

Les lignes électriques souterraines sont des systèmes de câbles conçus pour conduire et transporter l'électricité, installées en dessous de la terre (Figure I.3). Contrairement aux lignes aériennes traditionnelles soutenues par des poteaux et des câbles suspendus ; les câbles électriques souterrains sont enterrés dans le sol pour des raisons esthétiques, environnementales, et de sécurité (spécifiques d'une région et de divers facteurs : coûts, contraintes environnementales et réglementations locales) [7].

Ces lignes souterraines sont composées de câbles électriques à plusieurs couches, généralement isolés pour empêcher toute fuite d'électricité, et sont protégés par des gaines ou des conduits. Les câbles utilisés peuvent varier en fonction de la tension électrique nécessaire pour alimenter les équipements et les zones d'habitations [7].

L'avantage majeur des lignes électriques souterraines est qu'elles réduisent la vulnérabilité aux intempéries, aux chutes d'arbres. De plus, elles améliorent l'esthétique des zones urbaines en éliminant les câbles aériens. Cependant, leur installation et leur entretien sont généralement plus coûteux que ceux des lignes aériennes. [7]

I.3.3. Lignes électriques sous-marines

Les lignes électriques sous-marines, sont des câbles spécialement conçus pour transporter de l'énergie électrique sous l'eau, que ce soit dans des lacs, des mers, ou des plans d'eau (Figure I.4) . Ces câbles sous-marins sont utilisés pour relier des îles, des régions côtières éloignées ou des plates-formes offshore à des réseaux électriques continentaux, permettant ainsi de distribuer de à longues distances.



Figure I.3. Ligne électrique souterraine [8].

Les câbles électriques sous-marins sont conçus pour résister aux contraintes environnementales marines, aux courants, à la pression de l'eau et aux variations de température. Ils sont constitués de conducteurs électriques entourés de matériaux isolants pour empêcher les fuites électriques dans l'eau. Les câbles peuvent également être renforcés par des couches protectrices supplémentaires pour assurer leur durabilité et leur résistance.

Les lignes électriques sous-marines contribuent à l'intégration des énergies renouvelables offshore dans le réseau électrique, favorisent l'approvisionnement en électricité de régions éloignées et jouent un rôle très important dans la sécurité énergétique et la fiabilité des réseaux électriques [9].

I.4. Câbles électriques souterrains

La technologie des câbles électriques a été développée au début 1830. Cela était principalement dû à la nécessité de développer des matériaux diélectriques pour résister au champ électromagnétique intense et à la chaleur générée par le conducteur.



Figure I.4. Ligne électrique sous-marine [9].

Pour répondre à ces exigences, Ferrant a inventé un appareil électrique multicouche en utilisant du papier double bande en 1880. En 1917, Emanuel a perfectionné cette technologie en utilisant un papier imprégné d'huile caractérisé par une faible viscosité avec une pression constante, ce qui a permis de maintenir la stabilité thermique du conducteur. Cela a permis, pour la première fois, l'utilisation de câbles électriques à des niveaux de tensions à 100 kV [10].

L'introduction du nouveau matériau : le polyéthylène (XLPE, en 1960) en tant que matériau diélectrique, capable de supporter des températures de fonctionnement plus élevées, d'environ 90 °C, elle était comme une grande avancée majeure surtout dans le domaine de la technologie des câbles d'énergie électrique. Une autre technique a été développée c'est isolation par gaz SF₆ (une pression de 5,3 bar pour d'augmenter la rigidité électrique) entre le conducteur et le tube rigide en aluminium (une courte longueur, inférieure à 3000 mètres) [10].

I.4.1. Structure d'un câble électrique souterrain

Effectivement, la structure d'un câble électrique souterrain XLPE a un impact significatif sur son rendement et sa fiabilité. Ces premiers câbles XLPE avaient des problèmes

importants liés à la formation d'arborescences d'eau, qui pouvaient compromettre l'isolation et la sécurité du câble.

Les progrès continus dans la technologie des câbles XLPE modernes à permet de minimiser ces problèmes en utilisant des matériaux isolants de haute qualité et en améliorant la structure interne du câble. Cela garantit une meilleure protection contre l'humidité et une durabilité, ce qui contribue à réduire les perturbations et les pannes dans les réseaux électriques à haute tension, et de transporter l'énergie à une longue distance.

La configuration d'un câble souterrain HTB unipolaire isolé en XLPE avec un écran en cuivre plat, pour garantir une étanchéité voire la figure I.5 [11].

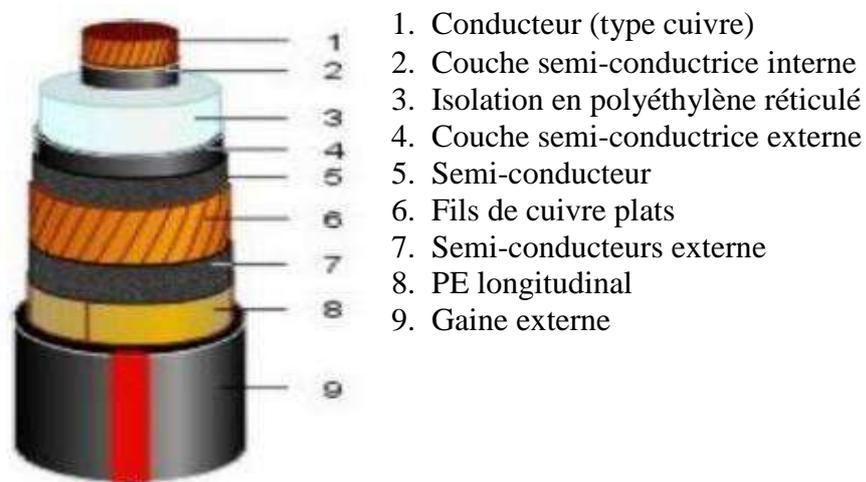


Figure I.5. Câble électrique souterrain HTB.

Pour des niveaux de tension de 400 kV, les sections de conducteurs peut aller jusqu'à 2000 mm². Les éléments essentiels inclus dans la fabrication des câbles haute tension (HTB) sont l'enveloppe protectrice, la gaine métallique, l'isolant et le conducteur. [12].

I.4.1.1. Conducteur (Ame conductrice)

Le conducteur ou bien l'âme conductrice, constitue la composante essentielle d'un câble souterrain, son rôle principal est de permettre la circulation du courant électrique nécessaire avec un minimum de pertes d'énergie. Les matériaux les plus couramment employés à la construction des conducteurs sont l'aluminium et le cuivre [12].

a) Caractéristiques électriques :

Le tableau I.1 présente les métaux fréquemment utilisés ainsi que leurs propriétés électriques dans la fabrication des câbles de transmission de puissance. En tenant compte du

coût, l'aluminium et le cuivre se démarquent clairement comme les meilleurs choix pour les conducteurs [12].

Tableau I.1. Propriétés électriques des matériaux constituent les conducteurs.

Matériau	R ₂₀	α	Avantage	Inconvénient
Cuivre	0.01786	0.00392	Haute conductivité électrique et thermique	Couteux
Aluminium	0.02874	0.0042	Peu couteux	Conductivité électrique et Thermique est d'environ 60% que celle du cuivre.

Les valeurs de la résistivité spécifique (R₂₀ : résistivité électrique spécifique 20° C, Ω mm²/m) et du coefficient de température (α : coefficient thermique de la résistivité électrique spécifique 20°C, 1/K) de l'aluminium et du cuivre sont illustrées dans le tableau I.1 [13].

b) Caractéristiques thermiques :

La température maximale à supporté par le conducteur dépendra de plusieurs facteurs comme : la capacité à résister à des courants élevés sur de longues périodes sans subir de dommages, la capacité du câble à dissiper la chaleur ainsi que par la température ambiante de l'environnement. Les effets de la température sont illustrés dans la figure (I.6) [13].

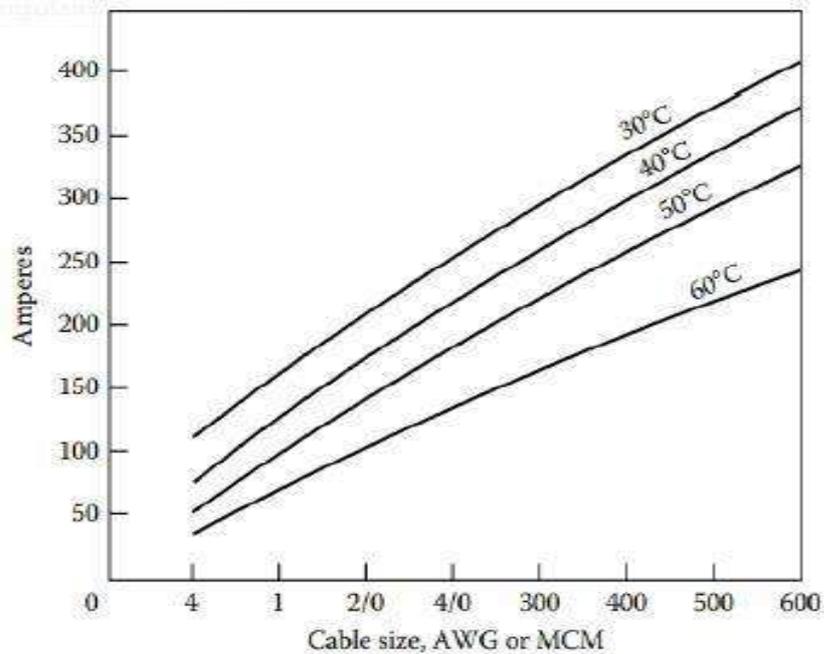


Figure I.6. Influence de la température ambiante sur le courant nominal.

I.4.1.2. Formes de conducteurs

Les conducteurs à formes multiples brins sont fréquemment employés pour faciliter la circulation des courants. Les conceptions tressée et segmentée offrent plus de flexibilité et réduisent les pertes de courant en raison de l'effet de peau. [14-16]. Dans la figure I.7 diverses conceptions de conducteurs sont illustrées.

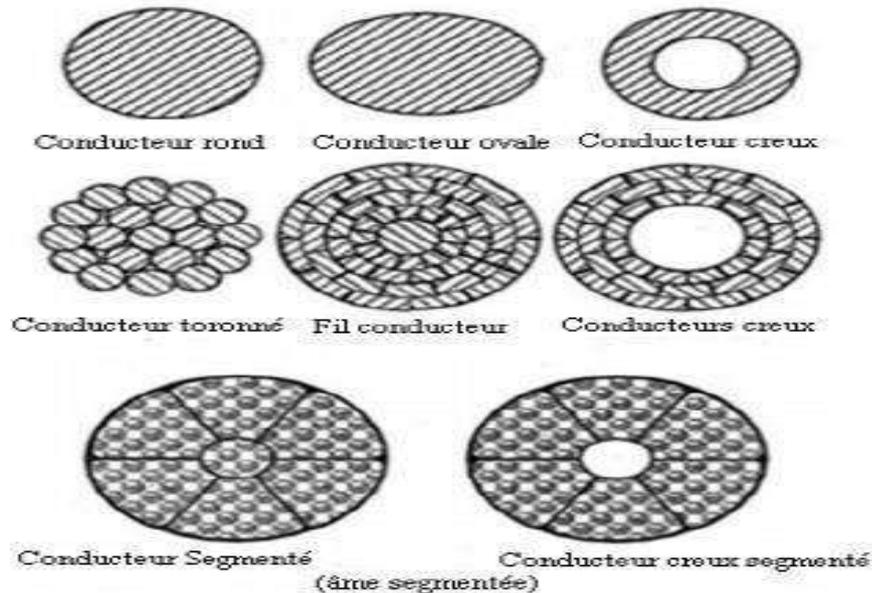


Figure I.7. Diverses configurations de conducteur.

I.4.1.3. Ecran semi-conducteur :

L'écran semi-conducteur est très complexe dans la technologie des câbles son rôle essentiel est de diminuer l'intensité des décharges partielles dans les câbles [17]. On trouve deux types de couches semi-conductrices : interne et externe sur les deux faces de l'isolation du câble. La première couche (interne, ou écran du conducteur), c'est une surface cylindrique lisse autour du conducteur, a pour but uniformisé le champ électrique radial, empêchant ainsi la création de cavités ou des décharges partielles entre l'isolant et le conducteur. La couche externe (écran d'isolation) sert à uniformiser le champ électrique radial et de créer un chemin pour les courants de fuite, même à prévenir les décharges partielles à la surface de l'isolant [17].

I.4.1.4. Blindage métallique

Un blindage métallique (BM) est un composant essentiel pour assurer la sécurité des câbles à haute tension en présence de dommages mécaniques et au courant de défaut sur le câble souterrain. Un courant de charge est produit par l'effet condensateur créé entre le blindage métallique et le conducteur [17].

L'aluminium et le cuivre (blindage métallique) sont fréquemment choisis grâce à leur résistance à la corrosion et leur conductivité électrique remarquable. Ces propriétés le rendent plus résistant aux décharges partielles qui pourraient se propager à travers le BM mis à la terre.

I.4.1.5. Gaine de protection

La fonction principale de la gaine de protection est de préserver le câble en le protégeant contre les éventuelles sources de dommages mécaniques et la corrosion due à l'exposition à l'humidité et l'eau. Le polyéthylène à haute densité (PEHD) est souvent choisi pour cette gaine protectrice grâce à ses propriétés bénéfiques. Il fournit une protection mécanique efficace, résiste à l'abrasion et limite la pénétration de l'humidité [18].

I.4.1.6. Isolant diélectrique

L'isolation (diélectrique) représente la composante la plus critique d'un câble, elle assure une isolation (séparation) adéquate entre les éléments électriques environnants et le conducteur, empêchant ainsi une rupture diélectrique. Les câbles souterrains sont souvent isolés avec des matériaux tels que le XLPE (polyéthylène, convient pour des tensions supérieures), le caoutchouc à base d'éthylène et de propylène (EPR) [19]. Le tableau I.2 résume les caractéristiques électriques principales des matériaux isolants.

Tableau I.2. Les caractéristiques électriques principales des matériaux isolants [20].

Caractéristiques	Papier	PVC	Huile	XLPE
Permittivité ϵ_r à 20°C	3.3-4.2	3-4	2.2-2.8	2.4
Facteur de dissipation $\tan(\delta)$ %	10	100	3	0.55
Température maximale (°C)	65-85	70	85	90
Résistance spécifique (M Ω)	$5 \cdot 10^{14}$	$7 \cdot 10^{11}$	$5 \cdot 10^{12}$	10^{14}
Champ électrique maximal (kV/mm)	15-40	40	15-25	95

Les matériaux isolants sont couramment utilisés sont : le polyéthylène réticulé (XLPE), le XLPE avec retardateur d'arborescence (WTR XLPE), ainsi que le caoutchouc éthylène-propylène (EPR). Les caractéristiques thermiques principales de ces matériaux isolants sont énumérées dans le tableau. I.3.

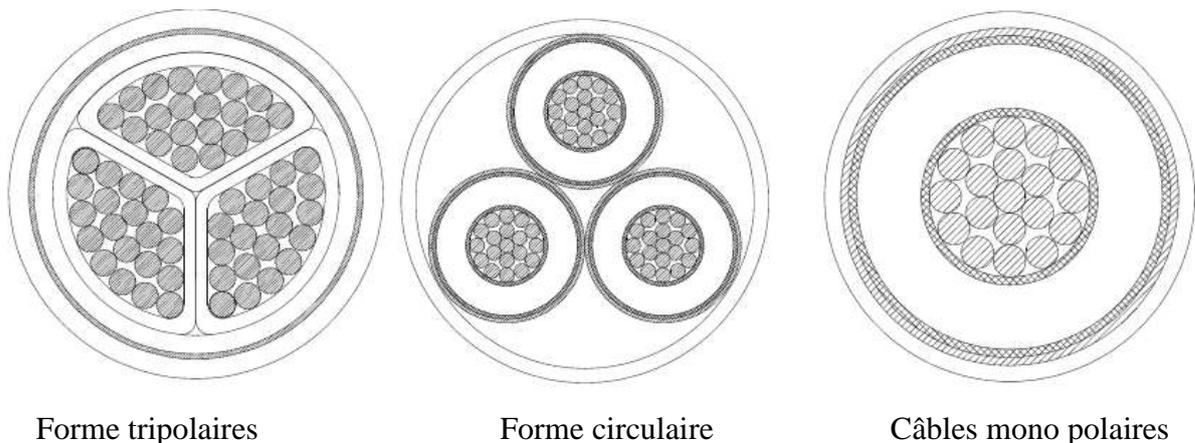
Tableau I.3. Les caractéristiques thermiques des matériaux isolants [21].

Type	Températures	
	Fonctionnement	de court-circuit
XLPE	90°C	250°C
EPR	90°C	250°C
LDPE	70°C	125°C

I.4.2. Classification des câbles souterrains

La classification des câbles électriques souterrains dépendra de plusieurs critères comme :

- La configuration de nombre de phase, soit tripolaire ou unipolaire.
- Selon la nature d'isolation diélectrique (XLPE, PE).
- Basée sur la configuration physique des conducteurs de forme. (Voir la figure I.8).

**Figure I.8.** Classification des câbles selon le nombre de phase et la forme [22].

I.4.3. Types de câbles souterrains

Les types de câbles souterrains varient en fonction de leur tension nominale et de leurs caractéristiques spécifiques. Voici quelques-uns des types les plus courants de câbles souterrains classés par leur tension nominale :

a) Câbles souterrains très haute tension THT

Les câbles souterrains de très haute tension THT généralement des conducteurs en cuivre plus efficaces et fonctionnent à des températures plus basses que les lignes aériennes.

Aussi sont principalement employés pour le transport et la distribution de l'énergie électrique dans les zones fortement urbanisées (grandes villes (figure 1.9.)), parfois pour résoudre des problèmes locaux particuliers, techniques ou d'environnement, pour lesquels la mise en œuvre de lignes aériennes est difficile ou impossible [23].

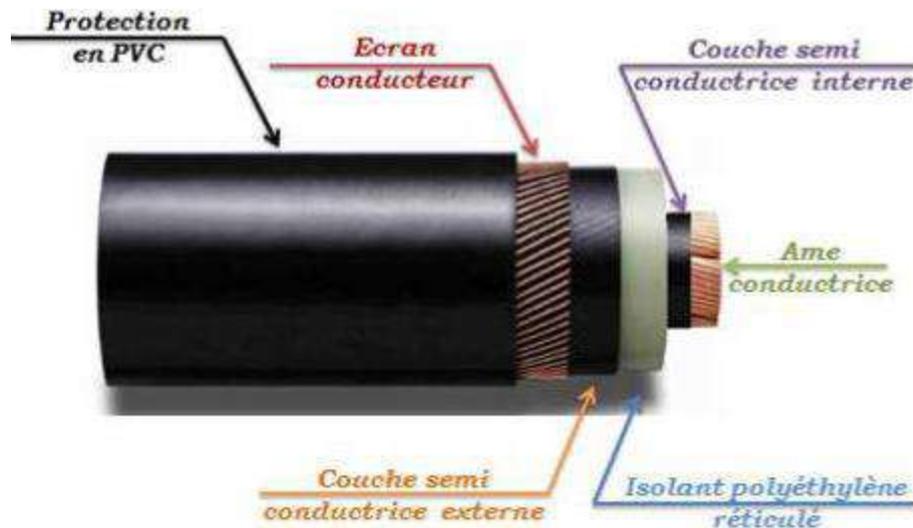


Figure 1.9. Constitution d'un câble souterrain isolé au polyéthylène réticulé légende [24].

b) Câbles souterrains haute tension HT

Les principales fonctions des câbles HT de transmission sont de transférer l'énergie électrique entre les emplacements désignés, dans les performances prescrites, les conditions de fonctionnement et d'environnement et d'isoler les composants sous tension des structures mises à la terre aux tensions de fonctionnement nominales et aux impulsions de commutation et de foudre spécifiées. Les fonctions secondaires des câbles HT de transmission sont les suivantes :

- Maintenir la sécurité électrique et minimiser les effets néfastes sur l'environnement.
- Fournir un service rentable tout au long de la vie [25]

c) Câbles souterrains moyenne tension MT

Les câbles électriques souterrains de moyenne tension ont la même forme et la même constitution que les câbles THT et HT mais avec un diamètre inférieur à cause du niveau de la puissance transmise :

- Câble unipolaire
- Câble Tripolaire

d) Câbles souterrains basse tension BT

Les câbles basse tension sont utilisés pour des niveaux de tension jusqu'à 1 KV. Les contraintes électrostatiques dans le câble BT ne sont pas dangereuses, par conséquent, aucune construction spéciale n'est utilisée pour ce câble.



a. Câble unipolaire

b. Câble Tripolaire

Figure I.10. Câble Moyenne Tension MT [26].

Les câbles d'alimentation souterrains à basse tension sont construits avec des conducteurs en cuivre et en aluminium rigides, solides ou toronnés et des conducteurs en cuivre flexibles (nus ou étamés). Les XLPE, PVC, LSF/LSOH et les composés élastomères sont les principaux composés isolants et protecteurs pour ces types de câbles (figure I.11).

Les fils ou les rubans en acier (ou en aluminium pour les câbles unipolaires) peuvent être appliqués sous la gaine extérieure, ce qui procure une protection mécanique supplémentaires [27].



Figure I.11. Câbles basse tension BT [28].

I.4.4. Techniques de pose

Le choix du type de pose des câbles souterrains dépendra de plusieurs facteurs tels que les facteurs thermiques, électriques, contraintes thermomécaniques et mécaniques auxquelles le système de câbles sera exposé lors de la mise en service et de son l'environnement [29], voir le Tableau I.1 et la figure I.12.

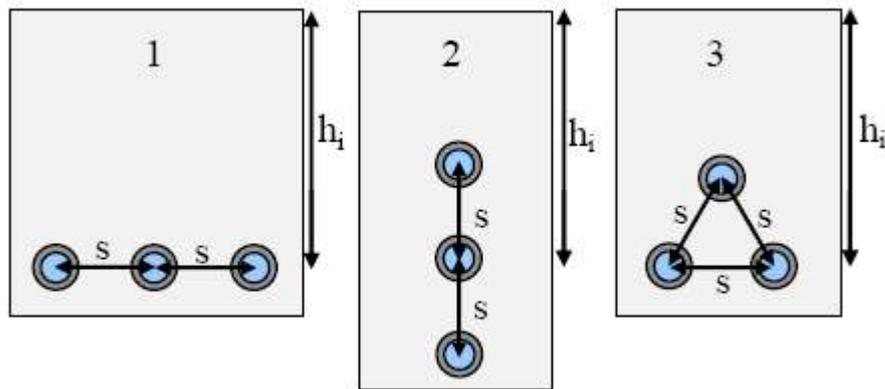


Figure I.12. Techniques de pose géométriques des câbles souterrains. (1) Horizontal, (2) Vertical, (3) Triangulaire (trèfle) [29]

Tableau I.4. Structures de pose des lignes souterraines [29]

Enterrés directement en forme trèfles.	A l'intérieur de conduits en forme trèfle.	Enterrés directement au niveau du sol.
Suspendus dans l'air à l'intérieur d'une galerie en forme de trilobé.	Enterrés horizontalement à l'intérieur de conduits.	Manière plane à l'intérieur d'une galerie.

Un conduit (caniveau) doit posséder les caractéristiques suivantes :

- La résistance aux chocs et à l'écrasement (mécanique).
- Une étanchéité pour protéger contre l'eau et les poussières.
- Elimination des flammes en cas d'incendie. Voir la figure I.13

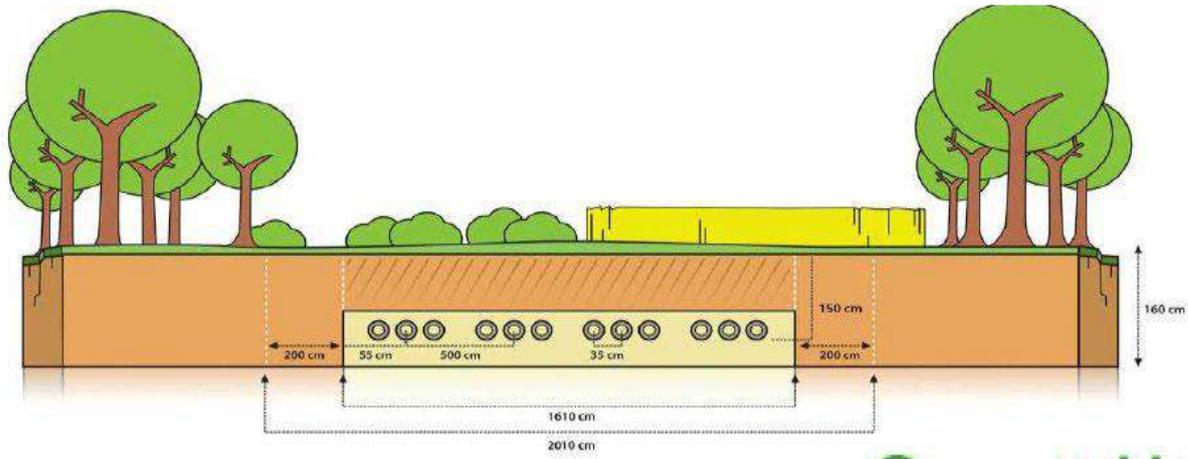


Figure I.13. Lignes électriques de puissances souterraines (structure horizontale) [30]

I.5. Pollution électromagnétique

La pollution électromagnétique se réfère à la présence indésirable et excessive de champs électromagnétiques (CEM) dans l'environnement. Ces champs peuvent être générés par diverses sources, notamment les lignes électriques, les équipements électroniques, les antennes de télécommunication, les réseaux sans fil (Wi-Fi, Bluetooth, etc.) et d'autres dispositifs électriques. [21]

Les principaux types de pollution électromagnétique incluent :

- **Champs électromagnétiques à basse fréquence** : Ces champs sont émis par les appareils ménagers, les lignes électriques de puissances et les équipements électroniques. Certains chercheurs ont montré les effets potentiels de l'exposition durant long terme à ces champs électromagnétiques sur la santé humaine.
- **Radiofréquences (RF)** : Elles sont émises par les antennes de télécommunication, les réseaux sans fil, les radars et les téléphones portables. Les risques concernant les effets sur la santé humaine et l'environnement par l'exposition aux radiofréquences (RF)
- **Champs électromagnétiques extrêmement élevés** : Ces champs sont associés à des équipements industriels et médicaux, tels que les dispositifs de résonance magnétique (IRM) et les fours à micro-ondes.

Les effets potentiels de l'exposition à long terme à la pollution électromagnétique sur la santé humaine par des problèmes tels que : les troubles du sommeil, les maux de tête, la fatigue...etc. [21].

I.5.1. Pollution électromagnétique liée aux câbles électriques

La pollution électromagnétique liée aux câbles électriques concerne les champs électromagnétiques générés par le courant électrique circulant à travers ces câbles. Ces champs sont classés suivant deux catégories en fonction de la fréquence :

a) Champs Électromagnétiques de Basse Fréquence

Ces champs sont associés aux fréquences inférieures à 300 hertz. Les câbles de puissances électriques, qu'ils soient souterrains ou aériens, génèrent une pollution magnétique en raison du flux de courant alternatif qui les traverse [21].

b) Champs Électromagnétiques de Haute Fréquence

Ces champs sont associés à des fréquences plus élevées, typiquement au-delà de 100 kilohertz. Ils sont plus souvent liés aux équipements électroniques et aux dispositifs de communication sans fil. Dans le contexte des câbles électriques, les interférences RF peuvent se produire, par exemple, avec des câbles coaxiaux de la transmission télévisée [21].

I.5.2. Risque et influence de champs magnétiques

L'exposition à des champs magnétiques de 50Hz intense entraîne un des courants électriques même une sensation immédiate ou une perception dans les appareils et les instruments proches et dans le corps humain. Le tableau I.5 illustre les seuils et les effets (évaluer les risques potentiels pour la santé) des différents niveaux des champs magnétiques de 50Hz basés sur des données de recherche et des études. [31].

Tableau I.5. Les seuils de perception de l'Organisation Mondiale de la Santé [31].

Des champs magnétiques (μT)	Les effets
supérieurs à 500 000	des cas de fibrillation ventriculaire ont été rapportés.
50 000 et 500 000	une stimulation des tissus excitables a été constatée, et des dommages potentiels pour la santé sont possibles.
5 000 et 50 000	sur le système nerveux et la vision ont été observés.
500 et 5 000	biologiques mineurs ont été signalés.

I.5.3. Risque et influence de champs électriques

La présence d'un champ électrique important accumulé à la surface d'un corps humain des charges électriques entraîné plusieurs effets perceptibles, notamment :

- Des vibrations des poils corporels et une sensation de chatouillement à la surface du corps humain.
- Dans certaines situations, des micro-étincelles peuvent se produire entre les objets au contact et la peau.

Le tableau I.6 montre le seuil de perception de champs électriques dus à l'accumulation de charges électriques potentiellement très dangereuses [31].

Tableau I.6. Les seuils de perception de champs électriques.

Champs électriques (kV/m)	Effets
20	Champs électriques sous forme de picotements.
10 kV/m	Sensation de "souffle" sur la peau en présence de champs électriques.

I.6. L'induction électromagnétique

I.6.1. Effets de proximité et pelliculaires

La résistance des câbles souterrains (câbles tripolaires) en régime alternatif change en raison des effets pelliculaires et de proximité, pour cela le calcul avec précision l'accroissement de la résistance dû à l'effet pelliculaire devient difficile (une variation significative de la résistance) [32].

I.6.2. Présence des courants induits

La variation de flux magnétique alternatif donne naissance à des courants (des courants de Foucault induits localement) dans l'écran métallique et l'enveloppe de plomb. Ces courants induits créent des forces électromotrices alternatives longitudinales dans l'écran des câbles. L'effet mutuel entre plusieurs câbles électriques proches entraîne des forces, des courants dans les écrans et des pertes supplémentaires [33].

I.7. La pollution magnétique générée par un câble souterrain :

La pollution magnétique mesurée d'un câble souterrain en pose "trèfle" avec un revêtement en béton et un courant de 1000 A à une hauteur de 1 mètre au-dessus du sol est indiqué dans le tableau I.7.

Tableau I.7. La pollution magnétique mesurée des câbles souterrains [33].

Tension (kV)	Sol (référence)	5 (m)	10 (m)
63/90 kV	8,6 μT	1,4 μT	0,4 μT
225 kV	11,5 μT	2 μT	0,6 μT
400	13,2 μT	2,7 μT	0,7 μT

En effet, le champ magnétique généré par les câbles souterrains varie en fonction de plusieurs facteurs, notamment : l'intensité du courant transporté, la distance par rapport aux câbles, la température et la nature du sol [32].

Les câbles souterrains sont capables de produire des champs magnétiques parfois plus puissants que ceux engendrés par les lignes aériennes, cependant, il est important de noter que ces champs magnétiques perdent leur intensité plus rapidement avec la variation de la distance. [34].

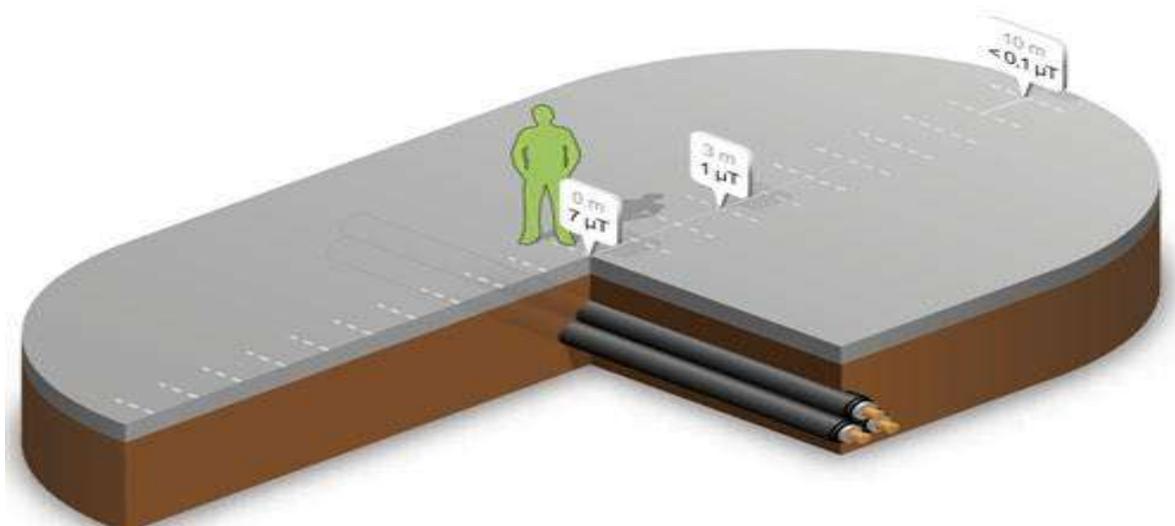


Figure I.14. Pollution magnétique d'une ligne souterraine. [34].

Lorsqu'une personne est au-dessus d'un câble souterrain elle subit un champ magnétique d'environ 7 μT au niveau de ses pieds. Cependant, ce champ diminue considérablement à mesure que l'on s'éloigne, devenant cinq fois plus faible, comme illustré dans la figure (I.1).

À une distance de 3 mètres du câble souterrain, le champ magnétique est proche à un micro tesla. À une distance de mesure 10 mètres, le champ magnétique devient complètement négligeable [34].

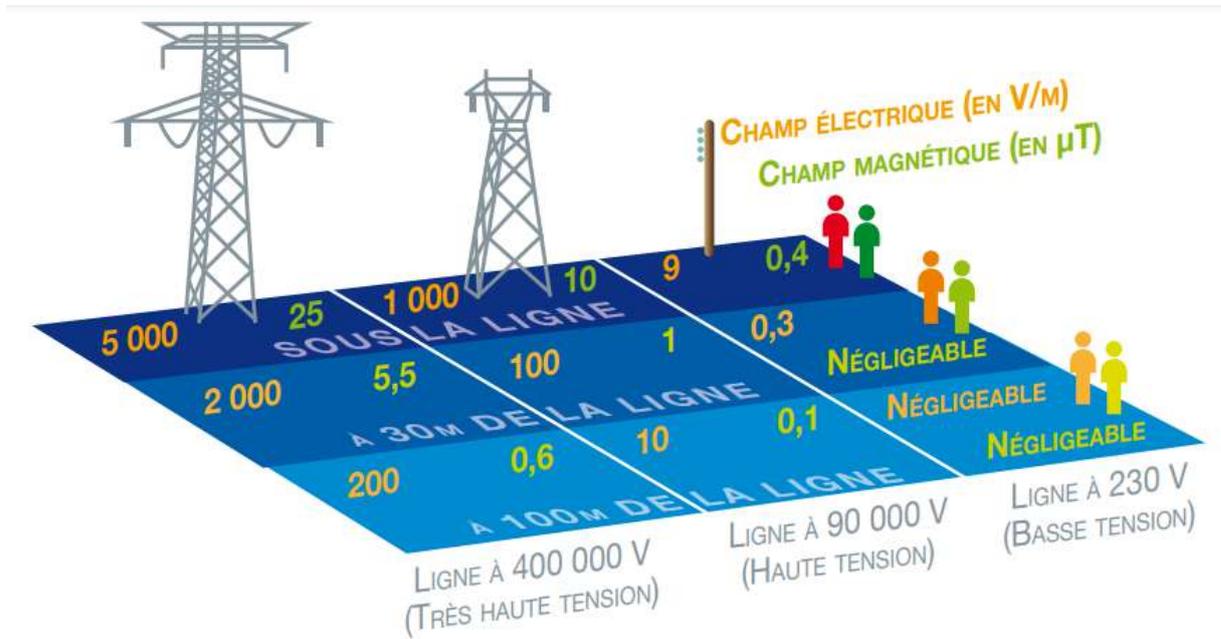


Figure I.15. Valeurs moyennes des champs électrique et magnétique à proximité des lignes électriques aériennes ($f = 50$ Hz) [35].

On peut remarquer la même influence de la distance et le niveau de tension sur l'intensité des champs magnétiques dans la figure I.15.

Depuis un certain temps, plusieurs études épidémiologiques ont mis en évidence l'exposition à des champs magnétiques de basse fréquence à travers une corrélation statistique, elles ont montré les risques accrus de leucémie chez les enfants, ainsi que d'autres problèmes de santé chez les techniciens et les agents de maintenance. Pour cette raison plusieurs dans le monde exige des limites à respecter soit pour le champ électrique ou magnétique voir le tableau I.8 [36].

Le tableau 8 présente les limites d'exposition aux champs électromagnétiques de basse fréquence (OMS, 2018).

Tableau I.8. Limites d'exposition pour les données de champ basse fréquence (public, travailleur) par pays [36]

Pays		Champ électrique (kV/m)			Densité de flux magnétique (μ T)			Fréquence (Hz)
		Sensible	Continue	Court-terme	Sensible	Continue	Court-terme	
Argentine	Publique	-	3	-	-	25	-	50
	Travailleur	-	25	-	-	1200	-	
Australie	Publique	-	5	10	-	100	1000	50
	Travailleur	-	10	30	-	500	5000	
Danemark	Publique	-	5	-	-	100	-	50
	Travailleur	-	10	20	-	1000	6000	
Allemagne	Publique	-	5	-	-	100	-	50
	Travailleur	-	10	20	-	1000	6000	
Japon	Publique	-	3	-	-	200	-	60
	Travailleur	-	-	-	-	-	-	
Italie	Publique	-	5	-	3	10	100	50
	Travailleur	-	10	20	-	1000	6000	
France	Publique	-	5	-	1	100	-	50
	Travailleur	-	10	20	-	1000	6000	
Finlande	Publique	-	5	15	0.4	100	500	50
	Travailleur	-	10	20	-	1000	6000	
Pays-Bas	Publique	-	5	-	0.4	200	-	50
	Travailleur	-	10	20	-	1000	6000	
Brésil	Publique	-	4.17	-	-	83	-	60
	Travailleur	-	8.33	-	-	416	-	
Philippines	Publique	-	4.17	-	-	83.33	-	60
	Travailleur	-	8.33	-	-	416.17	-	
République de Corée	Publique	-	4.17	-	-	83.33	-	60
	Travailleur	-	8.33	-	-	416.17	-	
Fédération Russe	Publique	-	0.5	-	-	5	-	50
	Travailleur	-	-	-	-	-	-	
UK	Publique	-	5	9	-	100	360	50
	Travailleur	-	25	-	-	1000	-	

À l'exclusion de ceux qui suivent la recommandation de l'ICNIRP, à savoir, le Brésil, les Philippines et la République de Corée, ainsi que la plupart des États européens, fixent le seuil d'exposition pour les personnes ordinaires à 5 kV/m pour le champ électrique et à 100 μ T pour le champ magnétique. La limite des personnes travailleuses a été fixée à 10 kV/m pour le champ électrique et à 1 000 μ T pour le champ magnétique. La Fédération de Russie a fixé la

norme pour le champ électrique à 0,5 kV/m et pour le champ magnétique à 5 uT, des valeurs 10 à 40 fois inférieures à celles des autres pays. Ce chiffre correspond à celui des groupes sensibles, tels que les écoles, les hôpitaux et enfants dans des pays comme la Finlande et les Pays-Bas. [36]

I.8. Défauts dans les câbles électriques

La principale fonction d'un câble électrique est d'acheminer l'énergie électrique d'une zone à une autre, mais la présence d'un défaut (un court-circuit ou un circuit ouvert) empêche le câble à assurer cette fonction de base.

Le type de défaut affecte la géométrie du câble ou les propriétés électriques et/ou mécaniques de ses composants et matériaux et produire un vieillissement avancé à cause des contraintes et des efforts importants (internes ou externes) [37].

Parmi les conséquences des défauts sur les câbles souterrains on trouve : la déchirure de l'écran ou l'abrasion de l'isolant, des altérations de la géométrie du câble ainsi que des modifications des propriétés des matériaux, telles que la permittivité ou la conductivité, entre autres [37].

La figure I.16 illustre des exemples de câbles souterrains endommagés d'une centrale électrique.



Figure I.16. Câbles localement endommagés

Ces dégradations représentent des points faibles qui doivent être réparés rapidement pour éviter les risques de dysfonctionnement, des conséquences graves et des coûts significatifs. Par conséquent, le choix d'une bonne stratégie efficace de maintenance préventive est un facteur essentiel de compétitivité [37].

I.8.1. Techniques des diagnostics des câbles souterrains

La détection de défauts dans les câbles est une préoccupation contemporaine majeure, suscitant l'intérêt des autorités publiques, des chercheurs, et des acteurs industriels. Des nombreuses et des diverses techniques ont été mises en œuvre pour surveiller et détecter ces défauts. [37]

I.8.1.1. Inspection visuelle

Dans de nombreux cas, l'inspection visuelle demeure la première méthode de diagnostic des câbles et des liaisons filaires. Pour les lignes à haute tension du réseau de transport d'électricité, cette inspection peut être réalisée à l'aide de drone [37].

Afin d'améliorer la qualité de cette méthode d'inspection, divers outils peuvent être utilisés, comme l'utilisation de caméras infrarouges pour détecter des échauffements, l'imagerie par rayons X peut être employée pour visualiser la structure interne du câble.

Malgré ces améliorations possibles, il convient de noter que l'inspection visuelle reste une méthode coûteuse, chronophage, et parfois peu fiable. Pour cette raison, d'autres techniques de diagnostic et d'inspection plus avancées sont souvent utilisées en complément pour garantir la fiabilité et la sécurité des liaisons filaires, en particulier dans les réseaux de transport d'électricité. [37]

I.8.1.2. Spectroscopie d'impédance

Diverses techniques de mesure électrique sont couramment utilisées : les tests de continuité vérifient l'intégrité d'un câble à deux conducteurs à travers un court-circuit à une extrémité et de contrôler si le courant circule correctement entre les deux bornes de l'autre extrémité [37].

D'autre part, les tests d'isolement consistent à laisser une extrémité du câble en circuit ouvert et à mesurer la résistance entre les deux conducteurs à l'autre extrémité. L'objectif de cette mesure est de vérifier la solidité de l'isolant, nécessitant des valeurs de référence pour une évaluation précise. Cette méthode peut également être étendue aux mesures en courant alternatif, une pratique connue sous le nom de spectroscopie d'impédance [37].

Les mesures de tangente delta ($\tan(\delta)$), également connus le facteur de perte, sont utilisés pour évaluer l'isolation d'un câble à deux conducteurs. Dans ce processus, le câble est modélisé comme un circuit avec une résistance et une capacité en parallèle, comme illustré dans la figure I.17.

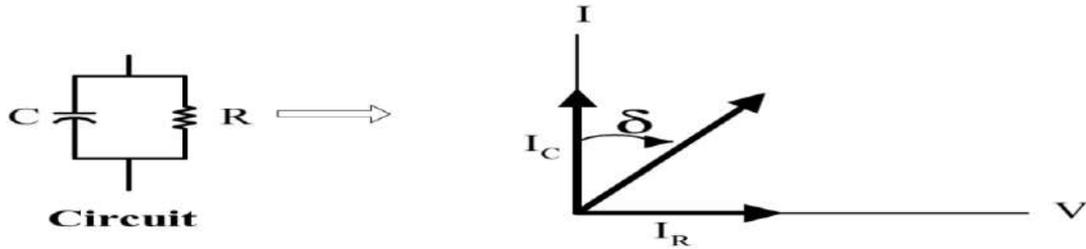


Figure I.17. Définition du tangent delta ($\tan(\delta)$).

I.8.1.3. Réflectométrie

La réflectométrie est une technique basée sur l'analyse des irrégularités dans les câbles. Elle consiste à injecter un signal électrique depuis l'extrémité d'un câble, ce signal se propageant le long du câble. Une partie de l'énergie de ce signal est réfléchiée par les obstacles rencontrés tout au long du câble, tels que les jonctions, les dérivations, les extrémités de ligne, les défauts, etc. [37].

De même, toute variation des caractéristiques intrinsèques du câble le long de sa longueur produit des réflexions qui se propagent jusqu'au point d'injection du signal. Cette énergie réfléchiée est ensuite mesurée, et les échos enregistrés font l'objet d'une interprétation en vue du diagnostic de l'état du câble. La figure I.18 illustre schématiquement ce principe. [37]



Figure I.18. Principe de la réflectométrie

I.9. Conclusion

Ce chapitre résume les différents types des lignes de transport d'énergie incluant les options souterraines, aériennes et sous-marines. Ensuite, nous nous sommes concentrés sur les différentes géométries des câbles électriques souterrains, en particulier les différentes parties et domaines, en abordant leur classification, leur conception, leur composition et leurs caractéristiques. Nous avons également montré la pollution électromagnétique, ses causes et sa

relation avec les lignes de transport électrique, en nous concentrant sur les câbles souterrains, pour conclure, nous avons abordé quelques problèmes et défauts spécifiques aux câbles électriques souterrains et la manière de diagnostic des défauts.

Chapitre II

Modélisation mathématique des câbles de puissance souterrains

II.1. Introduction

La modélisation analytique ou numérique de tout dispositif électromagnétique requiert la connaissance approfondie des propriétés géométriques, magnétiques et électriques des domaines et sous domaines de l'environnement étudié. Les équations de Maxwell facilitent le calcul et la représentation des lignes magnétiques générées aux extrémités d'un câble souterrain, rendant ainsi indispensable l'élaboration d'un modèle numérique spécifique pour simuler la pollution électromagnétique produite par les câbles électriques [38].

L'objectif consiste à présenter et à calculer le champ magnétique réparti autour des lignes de transmission électriques, tant dans des conditions normales statiques ou transitoire dynamique lors d'un défaut.

Ces méthodes nous offrent la possibilité d'étudier et d'analyser les caractéristiques magnétiques des appareils ou des instruments électriques (moteur, câble, transformateur...) pour diagnostiquer ou pronostiquer : les conséquences des défauts sur l'état de santé, la qualité de service assurée, la possibilité d'existence des interférences électromagnétiques, et la possibilité de maintenir les installations électriques.

Une bonne modélisation numérique revêt une importance cruciale dans la conception et de l'optimisation des paramètres mécaniques, thermiques et électriques, notamment pour la détection de potentiels dysfonctionnements [38].

II.2. Évaluation du champ produit par un câble souterrain

L'analyse magnétique de tout dispositif électrique requiert une compréhension approfondie des champs électromagnétiques B et H dans chaque composant. Cette évaluation est cruciale pour effectuer des calculs tels que le flux, l'effet inductif ou capacitif, etc. Ces calculs dépendent de plusieurs paramètres tels que : la fréquence, la distance, les matériaux... etc.

Le processus d'évaluation du champ magnétique repose principalement sur l'application des équations fondamentales de l'électromagnétisme et le traitement des équations différentielles partielles (EDP) de Maxwell, qui sont la base du modèle numérique [39].

II.2.1. Quatre équations de Maxwell

Les lois d'Électromagnétisme sont développées par le physicien James Maxwell en 1865, il a unifié les deux théories distinctes de l'électricité ainsi que du magnétisme dans une seule catégorie s'appelle « Électromagnétisme ». Les phénomènes physiques d'électromagnétiques sont largement régis par ces EDP, nécessitant leur adaptation à divers

domaines du dispositif étudié [31]. Ainsi, tout dispositif électromagnétique présent dans l'espace doit se conformer aux équations suivantes :

$$\operatorname{div} \vec{D} = \rho \quad (\text{II. 1})$$

$$\operatorname{rot} \vec{E} = - \frac{\partial \vec{B}}{\partial t} \quad (\text{II. 2})$$

$$\operatorname{rot} \vec{H} = \vec{J} + \frac{\partial \vec{D}}{\partial t} \quad (\text{II. 3})$$

$$\operatorname{div} \vec{B} = 0 \quad (\text{II. 4})$$

avec :

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

\vec{E} : Champ électrique en (v/m).

ρ : Densité volumique en (C/m³).

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

\vec{H} : Champ magnétique en (A/m).

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

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

Il est nécessaire d'ajouter à ces relations d'autres relations constitutives pour optimiser les équations de Maxwell en tenant compte des propriétés distinctives des milieux. Ces propriétés sont formulées selon les expressions suivantes :

- Les caractéristiques diélectriques.
- Les propriétés des milieux magnétiques [40].

a) Lois des milieux magnétiques

Un environnement magnétique se définit par les interactions magnétiques (propriétés), qui permettent de représenter l'induction magnétique en lien avec le champ (principal) d'excitation. Pour des milieux isotropes, cette relation s'exprime comme suit :

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

$$B = \mu H \quad (\text{II. 6})$$

Où :

$$\mu = \mu_0 \mu_r \quad (\text{II. 7})$$

μ_r : perméabilité relative, $\mu_r = 1$ (matériau amagnétique) $\mu_0 = 4\pi 10^{-7}$ pour le vide (H/m) [32].

b) Caractéristiques diélectrique

L'induction du champ électrique est exprimée par :

$$\vec{D} = \epsilon \cdot \vec{E} \quad (\text{II. 8})$$

avec $\epsilon = \epsilon_0 \cdot \epsilon_r$, où ϵ_r : permittivité relative, ϵ_0 : permittivité de l'air en (F/m).

La loi d'Ohm généralisée exprime la densité de courant dans un milieu conducteur.

$$\vec{J} = \sigma \vec{E} \quad (\text{II. 9})$$

Les relations entre les densités de courant sont déterminées par les caractéristiques de leurs domaines (tels que la conductivité électrique, et la perméabilité magnétique), par des équations qui décrivent les lois régissant le comportement de chaque milieu. Les formulations détaillées des densités de courant sont fournies par :

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

J_{ind} et J_s représentent la densité du courant induit et de source, respectivement.

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

Où v : le vecteur de la vitesse (m/s), et σ la conductivité électrique (S/m).

Les deux composantes de l'équation (II.11), $\sigma(\vec{v} \wedge \vec{B})$ et $\sigma \vec{E}$ décrivent le courant résultant du mouvement et du champ électrique [39].

c) Relation de continuité entre les milieux

Dans le cas où un système comprend deux milieux distincts, les champs de ces milieux sont interconnectés par quatre lois de continuité. Cela permet de relier des milieux possédant des propriétés de continuité entre les différents milieux électromagnétiques.

La relation de continuité entre deux milieux chacun et caractérisé par les différents champs $M1(\vec{E}_1, B_1, \vec{H}_1, \vec{D}_1)$, $M2(\vec{E}_2, B_2, \vec{H}_2, \vec{D}_2)$. Avec \vec{n}_{12} représente la normale unitaire entre la frontière M1 vers M2 est illustrée dans la figure II.1.

En général, un appareil électrotechnique est constitué de divers matériaux tels que l'air, le fer, le cuivre, l'aluminium, etc. Avant de résoudre le problème en question, il est essentiel de comprendre comment les champs électromagnétiques se comportent à l'interface de deux matériaux distincts [39,41].

d) Les conditions de passage

La frontière distinguant deux environnements caractérisés par des propriétés physiques distinctes, désignés respectivement par 1 et 2, donne lieu à des conditions de transition.

Ces conditions permettent de relier les différentes grandeurs sur ces limites, pouvant conduire à une discontinuité des grandeurs électromagnétiques. Ces relations sont formulées à travers des équations du genre :

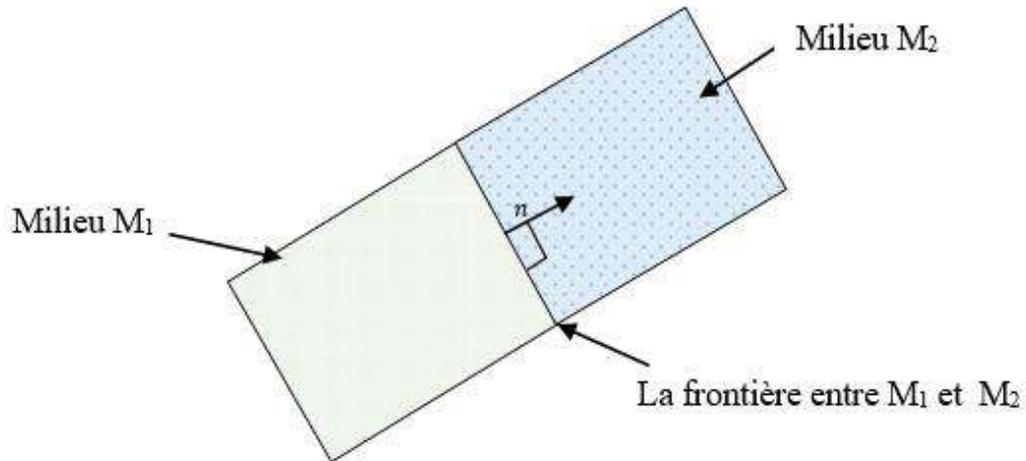


Figure II.1. La continuité entre les différents milieux

La continuité du champ électrique et de l'induction magnétique :

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

$$(\vec{E}_2 - \vec{E}_1) \wedge \vec{n} = 0 \quad (\text{II. 13})$$

La discontinuité du champ magnétique et du vecteur d'induction électrique D ,

$$\vec{n} \cdot (\vec{H}_2 - \vec{H}_1) = \vec{j}_s \quad (\text{II. 14})$$

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

La résolution numérique est difficile pour le système d'équations en raison de la présence de nombreuses variables inconnues [39,42].

II.2.2. Modélisation des phénomènes électromagnétiques

Pour avoir un modèle électromagnétique de n'importe quel dispositif électrique (il faut trouver les paramètres d'entrées et de sorties du modèle), les chercheurs proposent trois types de solution :

- Le modèle numérique
- Le modèle analytique
- Le modèle expérimental

II.3. Modèle numérique

Les équations électromagnétiques dérivées des équations de Maxwell peuvent être exprimées mathématiquement sous plusieurs formes simplifiées, notamment : Modèle electrocinétique, magnétostatique, électrostatique et magnétodynamique ... [42].

a) Modèle magnétostatique

Le modèle magnétostatique est caractérisée par l'annulation du terme $\partial B/\partial t$ (variation de l'induction magnétique). La raison en est que le champ magnétique est généré par des sources qui ne dépendent pas du temps.

Le modèle vectoriel magnétostatique contient de courants électriques non nuls. Cela se traduit par l'équation suivante :

$$\text{rot} \left(\frac{1}{\mu} \text{rot}(\vec{A}) \right) = \vec{J} + \text{rot} \left(\frac{1}{\mu} \text{Br} \right) \quad (\text{II. 16})$$

En l'absence de conservation du courant, une accumulation de charge se produit. Cela est représenté par l'expression dans le contexte temporel $\text{div} J = -\partial \rho/\partial t$ et $\text{div} J = -j\omega \rho$ dans le contexte fréquentiel. En combinant cela avec la loi de Gauss, $\text{div} D = \rho$, on parvient à une adaptation de la conservation du courant par :

$$\text{div} (J + j\omega D) = 0 \text{ et } \text{div} \left(J + \frac{\partial D}{\partial t} \right) = 0 \quad \text{et} \quad \text{div} \left(J + \frac{\varepsilon \partial E}{\partial t} \right) = 0 \quad (\text{II. 17})$$

La seconde étape débute par une dérivation avec la loi de Maxwell-Ampère. Elle établit une relation directe pour le courant circulant dans le conducteur et le champ magnétique H entourant :

$$\text{rot} H = J' = J + j\omega D = \sigma E + j\omega \varepsilon E = (\sigma + j\omega \varepsilon) E \quad (\text{II. 18})$$

$$\text{div}(\text{rot} H) = \text{div} J' = \text{div}(J + j\omega D) = 0 \quad (\text{II. 19})$$

Nous avons à présent la mise en œuvre la loi de Gauss et la loi d'Ampère de Maxwell.

$$\text{rot} H = \text{rot} (\mu^{-1} B) = J' = (\sigma + j\omega \varepsilon) E \quad (\text{II. 20})$$

Lorsque nous remplaçons la nouvelle équation de $B = \text{rot}(A)$ dans l'équation de Maxwell-Faraday pour l'induction électromagnétique $\text{rot} E = -j\omega B$, nous obtenons :

$$\text{rot} E = -j\omega(\text{rot} A) = \text{rot} (-j\omega A) \quad (\text{II. 21})$$

Le remplacement des équations précédentes conduit à :

$$\text{rot} (\mu^{-1} \text{rot} A) = (\sigma + j\omega \varepsilon)(-j\omega A) \quad (\text{II. 22})$$

En effectuant le remplacement, nous parviendrons à l'expression finale EDP pour l'effet magnétique lié au vecteur potentiel magnétique A en magnétostatique :

$$-\omega^2 \varepsilon A + j\omega \sigma A + \text{rot} (\mu^{-1} \text{rot} A) = 0 \quad (\text{II. 23})$$

Pour la présence des défauts transitoire et des courts-circuits, la fréquence change et le modèle devient transitoire et pour la variation des courants triphasés le modèle est variable (en fonction du temps) et non plus statique on peut parler d'un modèle magnétodynamique [42].

b) Modèle magnétodynamique

Ce modèle se distingue par l'utilisation du terme " $\partial B/\partial t$." non nul. Les phénomènes magnétiques et électriques sont liés, ce qui signifie que toute variation temporelle du champ magnétique génère des courants induits ou un champ secondaire induit. Ceci est applicable à tous les dispositifs où les courants et tensions électriques ne sont pas constants [41, 42]. Le potentiel du vecteur A joué un rôle crucial dans la compréhension de toutes les grandeurs physiques, l'utilisation de la même démonstration précédente en magnétostatique, et on ajoute d'autres condition du modelé variable en fonction du temps le modèle devient :

$$\text{rot}(\mu^{-1} \text{rot} A) = (\sigma + j\omega\varepsilon)(-j\omega A) \quad (\text{II. 24})$$

Enfin, une équation différentielle partielle à deux dimensions pour le potentiel vectoriel magnétique A variable peut être donnée comme suit :

$$\text{rot}(\mu^{-1} \text{rot} A) - \omega^2 \varepsilon A + j\omega A = J_s \quad (\text{II. 25})$$

La méthode des éléments finis (MEF) utilise cette équation dans chaque domaine pour calculer la valeur de A et les valeurs des champs magnétiques. Les équations ci-dessous représentent le courant électrique d'entrée variant dans le temps pour les trois phases :

$$I_a = I_0, I_b = I_0 e^{-\frac{j2\pi}{3}}, I_c = I_0 e^{\frac{j2\pi}{3}} \quad (\text{II. 26})$$

c) Modèle du champ électrique

La résolution en deux dimensions du modèle s'effectue en se conformant à la loi de la conservation du courant en fonction de la fréquentiel pour un modèle électrostatique. Le développement de ce modèle commence par le system d'équations suivantes :

$$\begin{cases} E = -\text{grad} V \\ \text{div} D = p \\ \text{div} J = -j\omega\rho \end{cases} \quad (\text{II.27})$$

La converge de la loi de Faraday vers le zéro :

$$\text{rot}(E) = -j\omega B = 0 \quad (\text{II. 28})$$

Intégration du courant de déplacement dans la caractérisation du courant, conduit à $\text{div} J' = 0$, et les expressions $J' = \sigma E + j\omega D$ sont obtenues pour les principes de conservation du courant. Cela conduit à l'obtention de l'équation différentielle partielle bidimensionnelle suivante pour la variable V :

$$-\text{div}((\sigma + j\omega\varepsilon)\nabla V) = 0 \quad (\text{II. 29})$$

L'interface graphique du modèle " Electrostatics ou Electric Currents " du logiciel de calcul exploite le principe de conservation pour calculer la valeur de V dans divers domaines. Dans les limites de ce modèle, différentes conditions de Dirichlet sont appliquées. Les équations d'excitation des trois phases sont les suivantes : [34].

$$V_a = V_0 \quad V_b = V_0 e^{-j\frac{2\pi}{3}} \quad V_c = V_0 e^{+j\frac{2\pi}{3}} \quad (\text{II.30})$$

II.3.1. Conditions aux frontières

Les conditions aux limites des méthodes numériques, en particulier les éléments finis, on peut identifier principalement deux types de conditions, les conditions de Dirichlet et les conditions de Neumann.

La condition de Dirichlet se manifeste lorsque le vecteur potentiel magnétique A reste constant le long des frontières, indiquant que l'induction magnétique B est parallèle à cette frontière et forme ainsi une équipotentielle.

Cette condition se présente lorsque certaines parties ou l'ensemble de la frontière se trouvent à une distance lointaine des sources d'excitation. Dans ce cas, les valeurs 'A' sur cette partie de limite peuvent être négligées en les comparant aux valeurs à l'intérieur du domaine, ce qui revient à supposer que A est égal à zéro ($A = 0$). Cette condition est appelée la condition de Dirichlet. Si la dérivée du 'A' par rapport au temps n'est pas nulle, ce qui correspond à la condition aux limites de Neumann, on précise alors les dérivées des valeurs que la solution doit satisfaire aux limites du domaine [42].

II.3.2. Résolutions des équations aux dérivées partielles

Diverses approches sont utilisées pour résoudre (EDP) dans des milieux linéaires. Parmi ces méthodes, on peut mentionner :

- Éléments finis
- Intégrales de frontières
- Différences finies
- Circuits couplés.
- Volumes finis

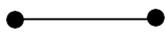
L'objectif de recourir aux techniques de discrétisation numérique vise à réduire la résolution du système d'équations différentielles, en fonction des d'équations algébriques et des conditions aux limites. La résolution de ces équations algébriques permet ensuite de déterminer les valeurs de champs électromagnétiques associés [43].

II.3.2.1. Méthode des Eléments Finis (MEF)

La MEF est particulièrement adaptée aux formes très complexes et aux types des matériaux présentant des comportements non linéaires. Cette approche consiste à diviser la zone d'étude en petits zones appelés : éléments finis (EF), comme illustré dans la figure (II.2). Les inconnues de chaque élément sont représentées par des fonctions d'interpolation simples, basées sur les valeurs des inconnues aux sommets de chaque élément. Les conditions de continuité sont prises en compte à l'interface et lors du passage entre différents milieux.

Dans le cas de structures bidimensionnelles, les éléments de maillage adoptent une forme triangulaire, tandis que pour les problèmes en trois dimensionnels, les éléments sont soit tétraédriques, soit prismatiques.

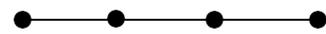
Problème à une dimension (élément droit) :



a) Linéaire (02 nœuds)

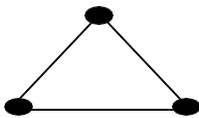


b) Quadratique (03 nœuds)

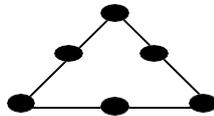


c) Cubique (04 nœuds)

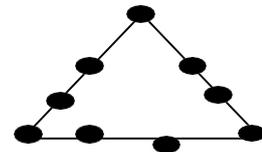
Problème à deux dimensions (triangle ou quadrilatère)



a) Linéaire (03 nœuds)



b) Quadratique (06 nœuds)



c) Cubique (09 nœuds)

Problème à trois dimensions

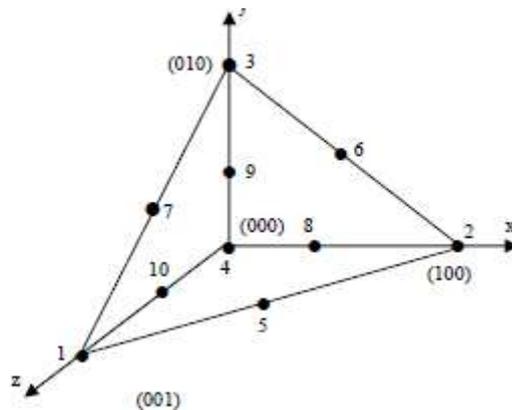
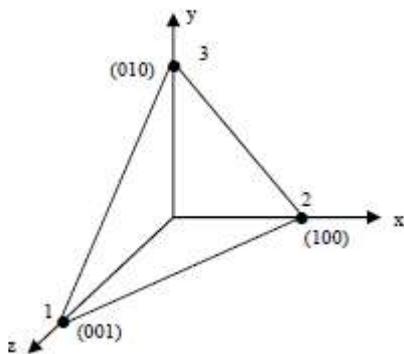


Figure II.2. Maillage à plusieurs dimensions d'un domaine d'étude [43].

La MEF en deux dimensions repose sur l'approche des résidus pondérés, sans prendre en compte l'aspect énergétique du problème considéré. Cette méthode implique la subdivision du domaine d'étude en EF, où l'inconnu est approximé dans chaque élément à l'aide de fonctions

d'interpolation, généralement des polynômes de Lagrange avec différent degré. L'interpolation à l'intérieur d'un élément est réalisée en fonction de ses valeurs nodales, garantissant ainsi la continuité de l'inconnu sur les interfaces des EF.

Le principe fondamental de la MEF consiste à transformer l'équation aux (EDP) régissant le problème traité en un système d'équations algébriques. La résolution de ce système permet de déterminer l'inconnu à un ensemble de points (nœuds) de la discrétisation. L'approche implique la découpe de la géométrie en un nombre fini de sous-domaines [43].

Dans le contexte de notre domaine d'étude bidimensionnel, nous sommes fréquemment confrontés à des éléments linéaires, quadratiques ou cubiques. Afin d'améliorer la précision de la solution, nous effectuons un affinement du maillage :

a) Fonction d'approximation

Il est possible de déterminer le vecteur potentiel magnétique $A^{\vec{}}$ dans un milieu en utilisant des fonctions d'approximation, également appelées fonctions de forme. L'expression de ces fonctions varie selon le type d'élément considéré. Il est essentiel que ces fonctions assurent la continuité de calcul aux interfaces de discrétisation. En général, on a recours à des fonctions polynomiales à cette fin [43].

b) Formulation Intégrale

L'élément crucial réside dans l'adoption d'un système algébrique et la conversion de l'équation aux dérivées partielles en une forme intégrale. Cette approche présente l'avantage de fournir les expressions des composants des différents vecteurs et matrices du système algébrique élémentaire dans un domaine donné. La formulation intégrale peut être élaborée de deux façons distinctes : [43]

- Méthode des Résidus Pondérés
- Formulation Vibrationnelle

b.1) Formulation Vibrationnelle (FV)

Cette méthode implique la minimisation d'une fonction, généralement représentative de l'énergie du système à résoudre. Le principe fondamental de la méthode FV requiert la connaissance de la fonctionnelle d'énergie du système. La résolution de cette fonctionnelle se base sur le principe de l'action hamiltonienne, qui définit l'existence d'une fonction de type intégral donnée par :

$$\mathfrak{S}(A) = \int_{\Omega} L d\Omega \quad (\text{II. 31})$$

L : la fonction de Lagrange joue le rôle d'un opérateur qui combine les énergies cinétique et potentielle du système, tandis que Ω représente le domaine d'analyse [43].

I.4. Modèle analytique

Le calcul du champ magnétique généré analytiquement par les lignes de puissance parcourues par des courants passe par les notions de base du magnétisme. Comme la règle de la main droite, illustrée la direction du champ. La figure II.2 représente la distribution du champ magnétique à l'intérieur et à l'extérieur d'un conducteur [44].

L'intensité du champ internes et externes est proportionnelle au courant, la fréquence, la réactance de ligne. L'évaluation de l'effet environnemental de la ligne de transmission implique le calcul du champ magnétique à plusieurs distances selon X et Y et environ 1 mètre au-dessus du sol [44].

La loi d'Ampère résume que la somme des courants à l'intérieur d'un chemin fermé est équivalente à l'intégrale du vecteur du champ magnétique le long de ce chemin. La formulation intégrale de la loi d'Ampère s'exprime ainsi :

$$\sum I_i = \oint \vec{H} \cdot d\vec{\ell}, \quad (II.32)$$

Où

\vec{H} : est le vecteur d'intensité du champ magnétique mesuré en ampère-tour par mètre ;

I_i : est ou sont le(s) courant(s) qui génère(nt) le champ ;

$d\vec{\ell}$: est le vecteur de longueur de chemin élémentaire ; et

$\vec{H} \cdot d\vec{\ell}$: est un produit scalaire (point).

Dans le cas du courant dans un conducteur solide long, droit et rond, les lignes de flux magnétique sont des cercles, voire les figure II.3 et II.4. Le champ magnétique est constant [44].

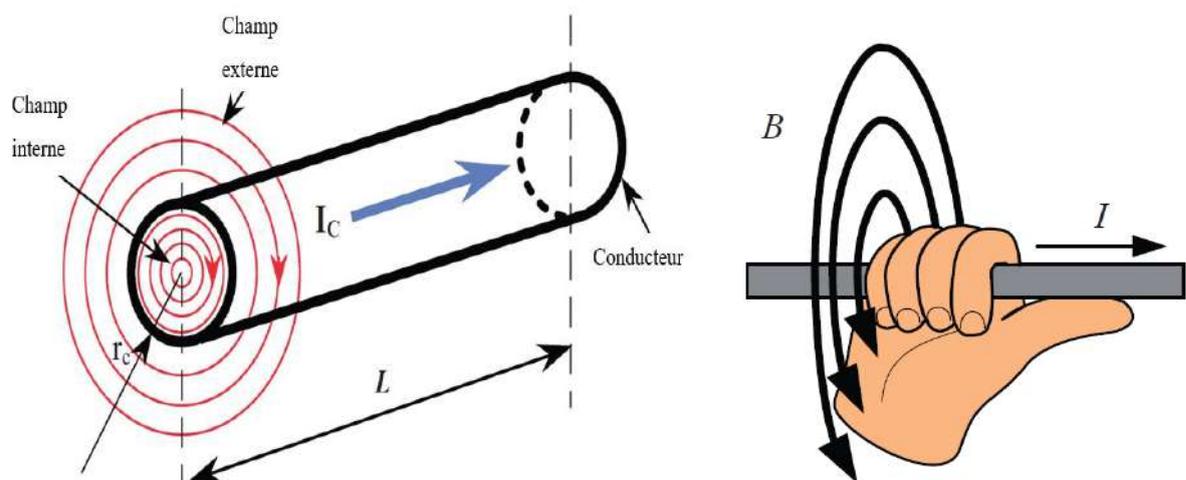


Figure II.3. Champ magnétique généré par un conducteur [44].

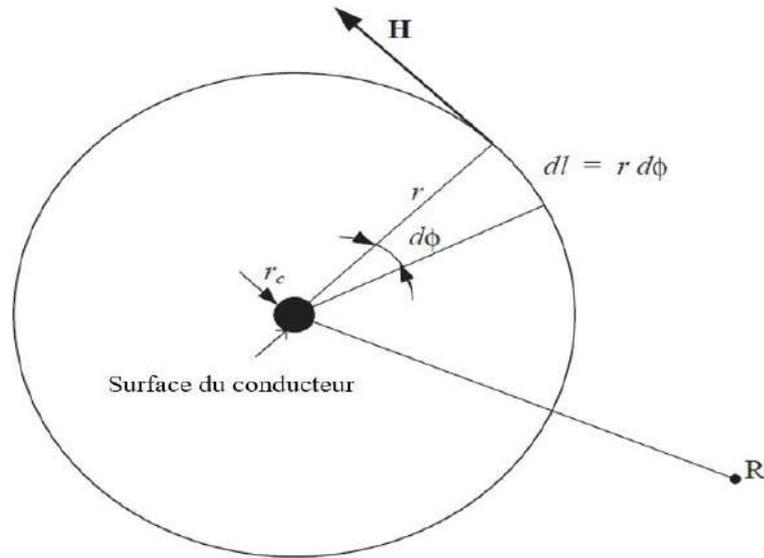


Figure II.4. La loi d'Ampère pour un conducteur cylindrique (courant sortant) [44].

Le champ magnétique est constant le long d'une ligne, ce qui simplifie l'intégration. Ce cas est représenté dans la figure II.3, Dans ce cas, l'intégrale est simplifiée par : [44]

$$I = \int_0^{2\pi} H r d\phi = H r \int_0^{2\pi} d\phi = 2\pi r H. \quad (\text{II. 33})$$

On calcule simplement l'intensité du champ magnétique en se référant à l'équation précédente de la manière suivante :

$$H = \frac{I}{2\pi r}. \quad (\text{II. 34})$$

Il est nécessaire d'effectuer une analyse du champ en procédant au calcul de la densité du flux magnétique B. Cette grandeur, dans l'air, résulte du produit de la perméabilité du vide μ_0 et de l'intensité du champ magnétique. La formulation de la densité de flux est la suivante :

$$B = \mu_0 H = \mu_0 \frac{I}{2\pi r}. \quad (\text{II. 35})$$

La densité de flux est mesurée soit en tesla (T) soit en gauss ($10^4 \text{ G} = 1 \text{ T}$). La perméabilité du vide est :

$$\mu_0 = 4\pi 10^{-7} \frac{\text{H}}{\text{m}}. \quad (\text{II. 36})$$

Le flux magnétique est l'intégrale de la densité de flux sur une surface \mathbf{F} :

$$\Phi = \int_{\mathbf{F}} \vec{\mathbf{B}} \times \vec{d\mathbf{F}}. \quad (\text{II. 37})$$

Dans cette équation, $\vec{\mathbf{B}} \times \vec{d\mathbf{F}}$ est un produit vectoriel.

Par exemple, le flux entre la surface du conducteur à r_c et le point R dans la Figure II.4 est :

$$\Phi = \int_F \vec{\mathbf{B}} \times d\vec{\mathbf{F}} = \mu_0 \int_{r_c}^R \frac{I}{2\pi r} dr = I \frac{\mu_0}{2\pi} \ln\left(\frac{R}{r_c}\right). \quad (\text{II. 38})$$

Cette équation suppose que la longueur du conducteur est unitaire. Le flux magnétique est mesuré en weber (Wb) ou en tesla-mètres carrés. Un weber est un volt-seconde (Wb = V·s) et un tesla est un volt-seconde par mètre carré (T = V · s/m²) [44].

II.4.1. Modèle d'énergie

Le champ magnétique est généré par un courant électrique à travers un transfert d'énergie électrique, dans le câble électrique le champ magnétique stocke une quantité d'énergie électrique avec un apport instantané :

$$dW = e i dt = \frac{d\Phi}{dt} i dt = i d\Phi = i dB F \quad (\text{II. 39})$$

Où

F est la surface sélectionnée, B est l'induction magnétique, e est la tension induite, i est le courant qui génère le champ [44].

Après avoir substitué ces expressions dans l'équation ci-dessus, nous obtenons :

$$dW = i dB F = (H\ell)(\mu_0 dH)F = \mu_0 H dH(\ell F) = \mu_0 H dH V_{ol}, \quad (\text{II. 40})$$

Où ℓ est la longueur du chemin sélectionné. Dans cette équation, $\ell F = V_{ol}$ est le volume de la zone sélectionnée, où l'énergie stockée par le champ magnétique est calculée.

En utilisant l'expression antérieure, on obtient l'évaluation de l'énergie du champ magnétique à l'intérieur du volume spécifié :

$$W = \mu_0 \int_{V_{vol}} H dH V_{ol} = \mu_0 \frac{H^2}{2} V_{ol} \quad (\text{II. 41})$$

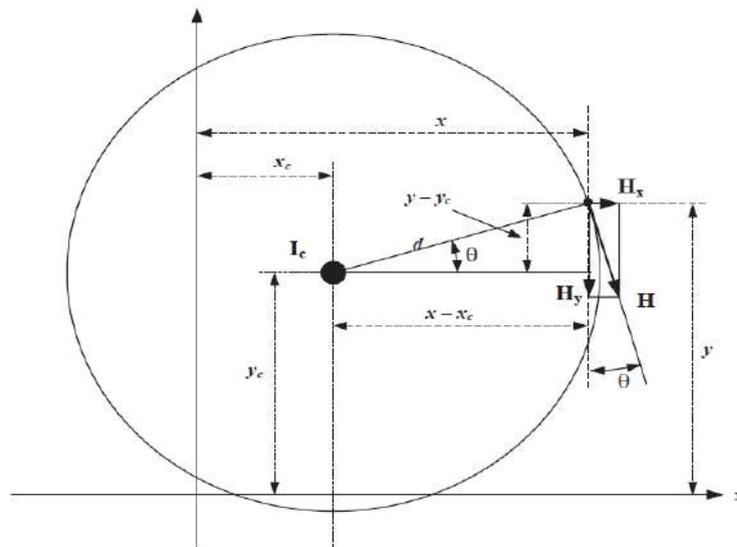


Figure II.5. Vecteur de champ magnétique [44].

II.4.2. Champ magnétique généré par un seul conducteur

La figure II.4 montre le vecteur du champ magnétique en un point avec les coordonnées x_c et y_c autour d'un câble. La formule d'Ampère de l'Équation (II.42) permet de calculer l'intensité du champ magnétique (H) à l'extérieur du conducteur [44].

$$\mathbf{H}(x, y) = \frac{\mathbf{I}_c}{2\pi d} = \frac{\mathbf{I}_c}{2\pi\sqrt{(x - x_c)^2 + (y - y_c)^2}}, \quad (\text{II. 42})$$

\mathbf{I}_c est le courant dans le conducteur ;

x_c, y_c sont les coordonnées du point central du conducteur ; et

x, y sont les coordonnées d'un point choisi arbitrairement.

À partir du grand triangle de la Figure II.5, le cosinus et le sinus de θ sont :

$$\cos \theta = \frac{x - x_c}{\sqrt{(x - x_c)^2 + (y - y_c)^2}} \quad \sin \theta = \frac{y - y_c}{\sqrt{(x - x_c)^2 + (y - y_c)^2}}$$

À partir du plus petit triangle vectoriel, les composantes x et y du champ magnétique sont :

$$\mathbf{H}_x(x, y) = \frac{\mathbf{I}_c}{2\pi d} \sin(\theta) = \mathbf{I}_c \frac{y - y_c}{2\pi[(x - x_c)^2 + (y - y_c)^2]} \quad (\text{II. 43})$$

$$\mathbf{H}_y(x, y) = \frac{\mathbf{I}_c}{2\pi d} \cos(\theta) = \mathbf{I}_c \frac{x - x_c}{2\pi[(x - x_c)^2 + (y - y_c)^2]} \quad (\text{II. 44})$$

L'intensité totale du champ magnétique est la somme vectorielle des composantes x et y :

$$\mathbf{H}(x, y) = \mathbf{H}_x(x, y)\hat{i} + \mathbf{H}_y(x, y)\hat{j}, \quad (\text{II. 45})$$

Où \hat{i} et \hat{j} sont les vecteurs unitaires dans les directions x et y , respectivement. La magnitude correspondante du champ total est : [44]

$$|\mathbf{H}(x, y)| = \sqrt{|\mathbf{H}_x(x, y)|^2 + |\mathbf{H}_y(x, y)|^2}. \quad (\text{II. 46})$$

La densité de flux magnétique \mathbf{B} est :

$$\mathbf{B}(x, y) = \mu_0 \mathbf{H}(x, y). \quad (\text{II. 47})$$

II.5. Simulation du modèle numérique

La simulation électromagnétique des lignes électriques souterraines est influencée par divers facteurs. Parmi eux, le courant électrique et la tension, les différents types de matériaux et la distance horizontale ou verticale entre les câbles jouent un rôle crucial.

Afin d'approfondir notre compréhension de l'interaction magnétique entre les lignes, ainsi que de l'effet des défauts électriques sur la distribution électromagnétique et dans l'environnement,

nous allons planifier une simulation numérique. Cette simulation sera réalisée à l'aide de la méthode MEF, en utilisant le logiciel de simulation COMSOL Multiphasiques 4.3 [43].

II.5.1. Description du logiciel numérique

Pour modéliser les câbles électriques souterrains, divers éléments doivent être pris en compte comme : la tension max et nominale et l'amplitude du courant traversant les câbles, le type de matériaux utilisés pour les câbles, ainsi que la distance séparant les différents câbles, parmi d'autres facteurs.

Nous avons utilisé le logiciel COMSOL Multiphasiques, qui est développé par la société COMSOL, fondée en 1986. Ce logiciel est largement adopté par de nombreuses grandes entreprises internationales.

Il est possible de modéliser et simuler des systèmes basés sur des principes physiques (chimie, génie civil, biologie, génie électrique et mécanique). Il intègre l'interface graphique COMSOL Desktop® ainsi que diverses interfaces utilisateur préconfigurées avec des outils de modélisation dédiés, appelés interfaces de physique, pour la modélisation d'applications standard [45].

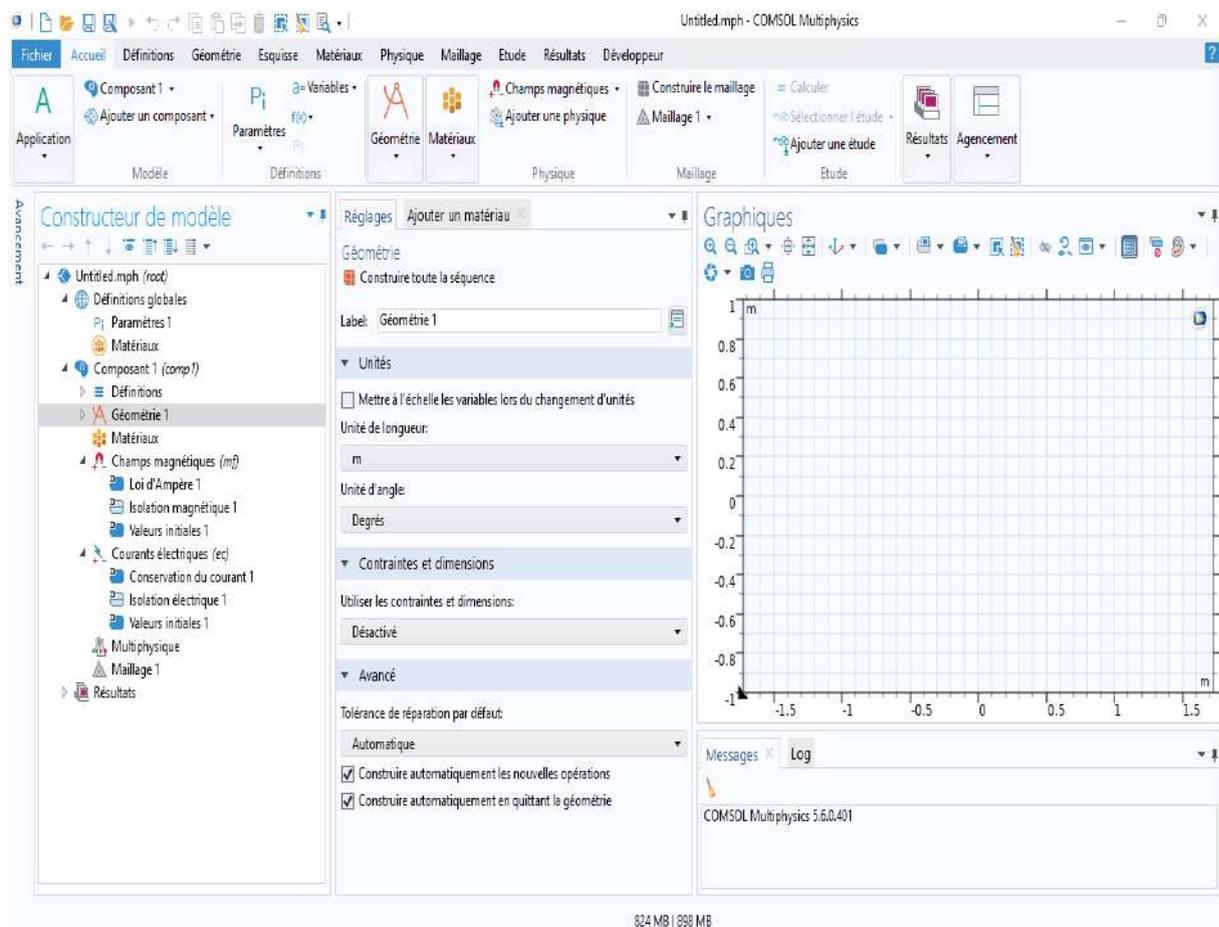


Figure II.6. L'interface du logiciel COMSOL Multiphasiques.

II.5.2. Procédure de simulation sous COMSOL Multiphasiques

La résolution d'un problème dans logiciel COMSOL suit plusieurs étapes, qui se décomposent suivant les six étapes à base de la méthode des éléments finis :

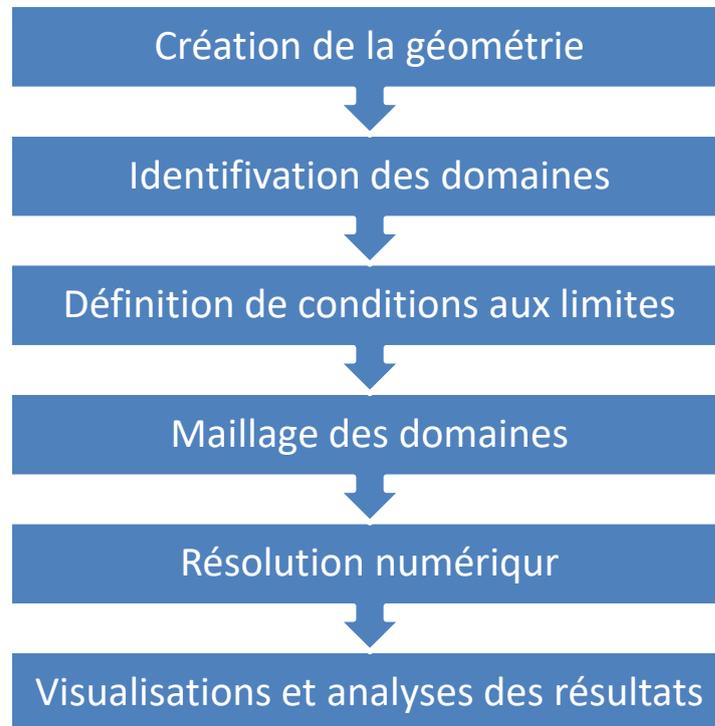


Figure II.7. Diagramme des étapes de résolution du problème dans COMSOL Multiphasiques [46]

a) Ouverture et choix du modèle d'étude

Pour débiter, sélectionnons d'abord le modèle. Ouvrez le module de champ magnétique (CM) ou électrostatique (ES) dans le navigateur de modèles. Nous nous concentrerons ici sur une analyse en 1D, 2D ou 3D [47].

b) b. Conception de la Géométrie

Dès l'ouverture du programme, la première étape consiste à implémenter la configuration géométrique de différentes parties du système, notamment les couches des câbles électriques.

c) c. Déclaration des paramètres et des propriétés physiques

Il s'agit de spécifier les paramètres et les caractéristiques physiques propres à chaque domaine d'étude, tels que la constante diélectrique, la conductivité, ainsi que les propriétés des matériaux et les paramètres requis pour notre simulation. De plus, il est nécessaire de définir diverses conditions aux limites de manière cohérente [47].

d) Maillage du modèle

Un maillage consiste à subdiviser l'espace ou un domaine en la géométrie en éléments finis (unités élémentaires) : Il y a une possibilité de créer le maillage pour les domaines automatiquement, même Il est envisageable de le raffiner manuellement [48].

e) Définition des équations physiques

Spécifiez les équations physiques qui régissent le comportement du système simulé.

f) Réglage des variables dépendantes d'études

Configurez les paramètres de la simulation ou les variables d'études et l'état stationnaire, temporel, fréquentiel, en fonction du temps final, le pas de temps, la fréquence ... etc.

g) Calcul et résolution de la simulation

Une fois que le problème est entièrement caractérisé, il suffit de le résoudre. On peut utiliser des menus pour ajuster la solution une fois qu'elle est en place. De la même manière, lors de la résolution d'un problème impliquant plusieurs aspects physiques, il est envisageable de ne résoudre que pour une partie spécifique des variables [48].

h) Affichage des résultats de simulation

Une fois que le programme a atteint une solution convergente, il se déplace automatiquement vers la phase de post-traitement. Cette étape permet d'examiner les résultats, lesquels peuvent être visualisés sous forme de remplissage coloré, de lignes de courant, de champs de flèches, et ainsi de suite. Analysez les résultats de la simulation, notamment les champs, les courbes, les tableaux, etc. [49].

i) Optimisation et ajustement :

Si nécessaire, ajuster les paramètres du modèle pour optimiser la simulation en fonction des résultats obtenus.

II.6. Validation des résultats par les méthodes expérimentales**II.6.1. Mesure du champ électromagnétique sur les lignes de transport d'énergie**

Les mesures des champs électriques et magnétiques du câble électrique de puissance, effectuées sur site et en temps réel à différentes distances, doivent être comparées avec d'autres résultats issus de simulations et de calculs analytiques afin de confirmer et de vérifier leur précision. Une fois les résultats confirmés, ils doivent également être confrontés aux normes et

aux limites d'exposition en vigueur. La figure II.8 présente quelques tests de mesure des champs électriques et magnétiques réalisés dans un tunnel souterrain, autour d'un câble électrique souterrain et d'une ligne aérienne, en utilisant des dispositifs tels que des teslamètres et des bobines. Les résultats moyens sont enregistrés soit directement dans l'appareil, soit transférés dans un système d'acquisition et de stockage sous forme numérique ou graphique en fonction de la distance et du temps [50, 51].



A- Mesure de champ électrique



B- Mesure de champ magnétique

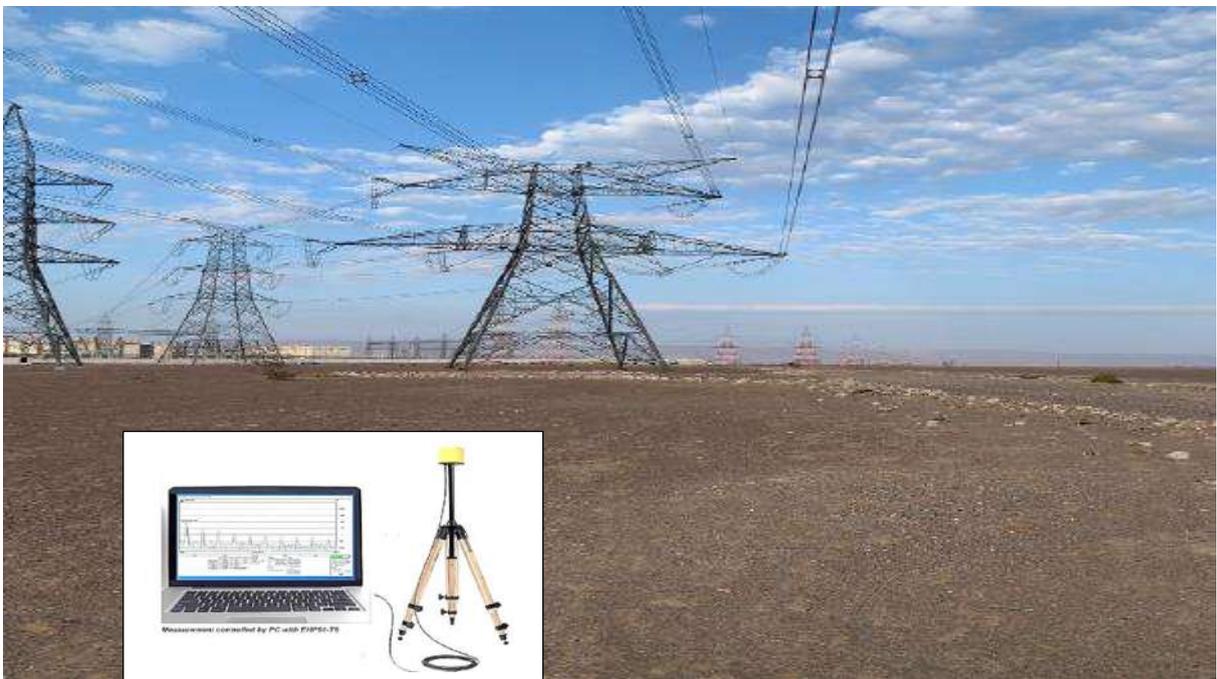


Figure II.8. Mesures de champ électromagnétique pour des lignes de transmission [50].

II.6.2. Évaluation du champ de dispersion à l'aide d'un capteur magnétique

L'analyse des données du champ de dispersion magnétique autour des câbles souterrains fournit des informations précieuses (signaux) concernant les courants absorbés, la surveillance

de l'alimentation des machines tournantes en basse tension et des lignes électriques souterraines, ainsi que l'état de santé des câbles et la détection des décharges partielles (déformation, dégradation des couches, présence de défauts et vieillissement). Plusieurs types de sondes sont disponibles dans l'industrie à des prix raisonnables, mais elles présentent des limitations nécessitant la connaissance de la position des conducteurs, la sensibilité à la géométrie, la taille des différentes couches, l'utilisation de matériel auxiliaire, etc. La figure II.9 illustre de manière descriptive l'emplacement du capteur autour des câbles multicouches et multiconducteurs [52].

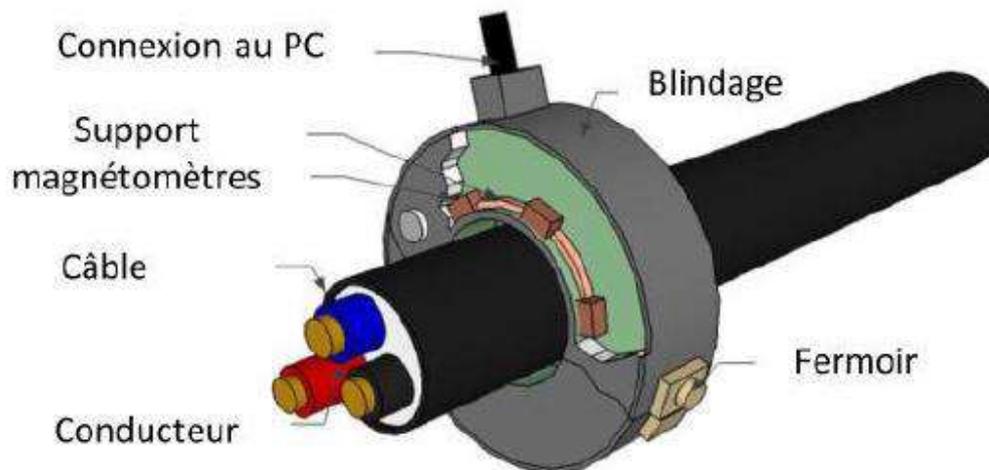


Figure II.9. Capteur de mesure du champ de dispersion pour câbles multiconducteurs [52]

II.6.3. Banc d'essai expérimental de caractérisation thermique

La figure II.10 présente un dispositif d'évaluation utilisé pour examiner l'isolation et le champ généré par un échantillon de câble XLPE après un défaut, dans le but de déduire les conséquences à travers une expérimentation simulant le vieillissement thermique de l'isolation XLPE. Cette démarche vise à confirmer et à assurer la précision des résultats obtenus à la fois par simulation numérique et par des tests expérimentaux [53].



Figure II.10. Banc d'essai pour caractériser l'isolation d'un câble souterrain [53]

II.7. Conclusion

Dans ce chapitre, comme une première étape, nous avons défini les différentes étapes à suivre pour réaliser une modélisation numérique, telle que celle des phénomènes électromagnétiques dans les câbles électriques souterrains, à l'aide de la méthode MEF. Nous avons trouvé les équations EDP et discuté des diverses méthodes de résolution.

L'élément clé de cette thèse réside dans la réalisation d'une étude par la méthode MEF en 2D, par l'utilisation du logiciel numérique COMSOL Multiphysics pour mener les simulations et les résultats des calculs. La déclaration des propriétés et des paramètres nécessaires est indispensable dans la simulation, tels que : la géométrie, paramètres physiques et électrique de chaque domaine, les conditions aux limites et le choix du maillage...etc.

Il existe diverses techniques pour quantifier et calculer le champ magnétique en vue de trouver les modèles mathématiques d'études, notamment la méthode analytique, numérique et expérimentale. Enfin, la simulation numérique garantit un bon calcul et une bonne présentation de la distribution du champ magnétique à proximité, autour des lignes électriques souterraines.

Chapitre III

Mesures de la pollution magnétique générée par des câbles souterrains 400kV et 220kV

III.1. Introduction

Dans ce chapitre, nous présenterons les différentes sections de la centrale électrique de Hassi Messaoud, où nous avons procédé à des mesures de la pollution magnétique des câbles électriques souterrains. Nous nous concentrerons particulièrement sur les essais expérimentaux des sections clés abritant les câbles souterrains de 400kV et 220 kV. Les mesures des paramètres électriques ont été réalisées dans la salle de contrôle du poste de transformation. Cependant, la mesure du champ magnétique a été effectuée aux niveaux des boîtiers d'extrémités intérieur et extérieur du câble unipolaire souterrains posé dans les caniveaux sous différents moments et une puissance électrique consommée varie en fonction du temps.

III.2. Structure de la centrale à gaz Hassi Messaoud

La centrale électrique de Hassi Messaoud contient plusieurs parties et tranches (comme il est illustré dans la figure III.1. "Tronçon N°1, tronçon N°2, tronçon N°3, tronçon N°4"), cette centrale appartient à la Société Algérienne De Production De L'électricité (SPE) et la Société Algérienne de Gestion du Réseau de Transport d'Electricité (GRTE). GRTE assure la maintenance, l'exploitation et le transport de l'électricité dans le réseau électrique national. La partie qui nous intéresse c'est la liaison entre les transformateurs et les lignes aériennes assurée par les câbles souterrains de 220kV et 400 kV. Nous allons évaluer par des mesures pratiques sur site la pollution électromagnétique générée par les câbles souterrains de haute tension (HTB).

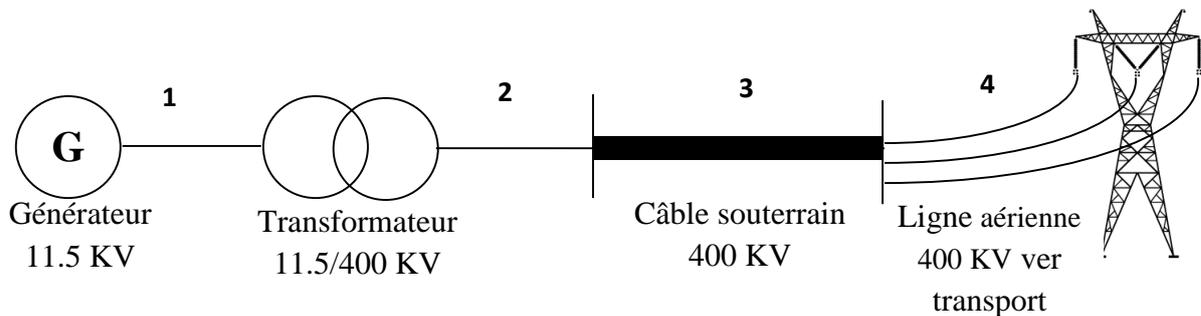


Figure III.1. Schéma simplifié de l'emplacement du câble souterrain dans la centrale électrique à gaz Hassi Messaoud

La position d'un câble électrique souterrain à l'intérieur d'un caniveau avec une profondeur de 1,2 mètre est illustrée dans la figure III.3. Le câble est fixé de sorte qu'il ne touchera pas le sol. La longueur du caniveau est de 1,62 mètre, et sa largeur est de 1,46 mètre.



Figure III.2 : Poste de transformation 220/400 kV de la centrale à gaz Ouargla Hassi Messaoud.

Les trois lignes électriques (de neuf phases 0,...jusqu'à 8) sont couplées aux transformateurs électriques de puissance, afin d'élever la tension (HTB) à 400 kV, et puis relier vers les lignes aériennes pour véhiculer l'énergie vers le réseau électrique, comme indiqué dans la figure III.3.



Figure III.3. La liaison entre les lignes électriques aérienne et souterraines

C'est une liaison pour transmettre une puissance électrique par des lignes aérienne et câbles souterraine (représenté par des caniveaux sou sol). Il y a 5 mètres de distance entre les phases 0 et 2 et les phases 3et 5 entre les phases 6 et 8 de chaque ligne.



Figure III.4. Poste blindé de tension 400 kV

La figures III.4 montrent un poste blindé qui est constitué d'un ensemble d'éléments standard tels que : des jeux de barres, les sectionneurs, des transformateurs de courant et des disjoncteurs de gaz SF6, qui sont tous placés dans un espace hermétique.

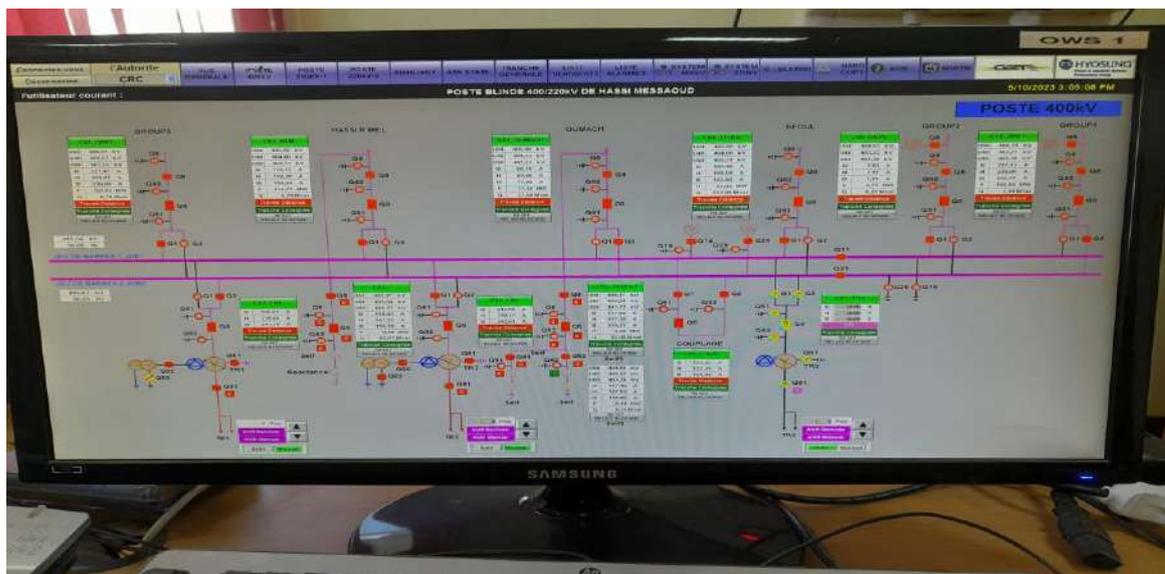


Figure III.5. Schéma synoptique du système SCADA dans la salle de contrôle et surveillance

La figure III.5 montre l’affichage des différentes parties sous surveillance et régulation dans la salle de contrôle.

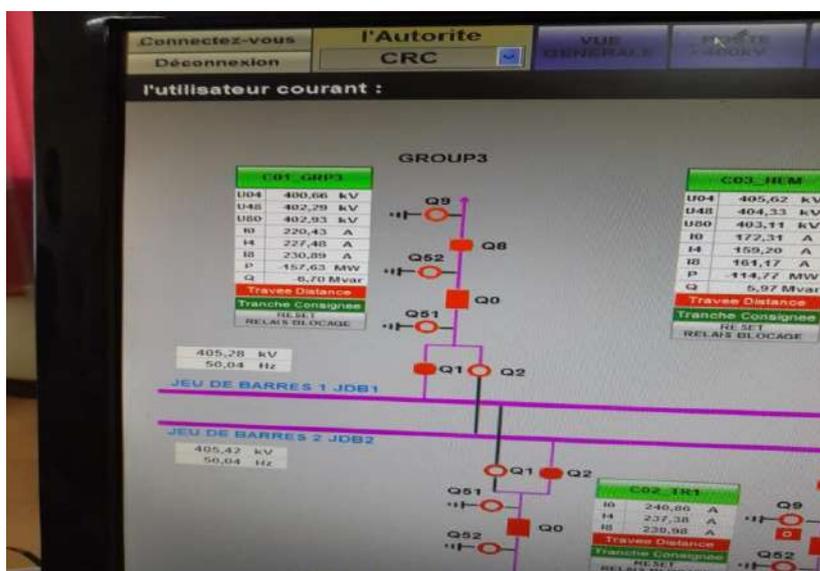


Figure III.6. Affichage du schéma synoptique du Groupe 03

Dans cette salle de contrôle tous les données électriques et les modifications de la station et des lignes de transmission seront à jour et surveillé instantanément (le courant, la puissance, la tension, la fréquence, les vibrations, ...) par un équipage de techniciens et d’ingénieur de maintenance. Ce groupe 03 (la figure III.6) enregistre numériquement la variation du courant électrique de chaque phase des trois lignes électriques (comme un signal d’entrée), pour notre cas les mesures des courants des trois phases R, S, T, sur lesquelles nous effectuons les mesures magnétiques (comme un signal de sortie).

III.3. Câble de puissance souterrain HTB 400 kV

La figure suivante représente une coupe d’un câble électrique souterrain HTB 400kV.



Figure III.7. Coupe transversale d’un câble de puissance 400 kV, marque ILJIN.

La composition structurelle du câble de puissance 400 kV contient :

- 1- Le conducteur en Cuivre
- 2- l'écran conducteur : le matériau et un semi-conducteur
- 3- L'isolation : Polyéthylène réticulé
- 4- L'écran isolant : Composé semi-conducteur
- 5- L'écran métallique : Bande semi-conductrice
- 6- Gaine métallique : en Aluminium
- 7- Gaine extérieure : Polyéthylène



Figure III.8. L'emplacement de câble souterrain dans le caniveau.



a- Câble souterrain de la phase 4

b- emplacement de Teslamètre

Figure III.9. Installation d'un Teslamètre au niveau d'un câble souterrain 400 Kv.

III.4. Description de l'appareil de mesure du champ magnétique :

Les essais expérimentaux sont assurés par un appareil de mesure du champ magnétique : le Tesla-mètre de type PHYWE pour les champs alternatifs et continu avec une sonde à effet Hall tangentielle (sonde) numéro de commande : 13610.93 Numéro de série : 220500173701 (Sensibilité : 10 μ T) voir la figure III.10 [54].



Figure III.10. PHYWE Teslameter, digital

III.4.1. Objectif et caractéristiques :

Le Teslamètre convient pour mesurer avec précision la densité de flux magnétique (induction) B. Deux sondes à effet Hall sont disponibles séparément et au moins une est requise pour être utilisée comme capteur [54].

L'une d'elles est spécialement conçue pour mesurer des champs orientés axialement par rapport à sa tige en forme de tige (sonde axiale, n° de commande 13610-01). Il convient par exemple pour mesurer les champs à l'intérieur des bobines. La tige mesure 30 cm de long pour permettre de prendre des mesures facilement même au milieu de longues bobines. La deuxième sonde mesure les champs perpendiculaires à sa tige (sonde tangentielle, n° de commande 13610-02), extrêmement fine et plate pour les mesures dans des entrefers étroits jusqu'à environ 1 mm.

L'appareil dispose de 3 plages de mesure commutables :

- 0–20 mT (précision 0,01 mT)
- 0–200 mT (précision 0,1 mT)

- 0–1999 mT (précision 1 mT)

La plage supérieure à 1 T convient à une mesure d'estimation de champs magnétiques puissants. Une sortie enregistreur intégrée (tension continue 2V pour la valeur d'affichage finale de chaque plage de mesure) permet un enregistrement pratique du déroulement de l'induction, par ex. pour l'observation des courbes d'hystérésis. Et pour l'enregistrement, des systèmes de mesure assistés par ordinateur (comme l'interface PHYWE Cobra) conviennent [54].

L'appareil mesure des champs constants et alternatifs. Dans les deux cas, la sortie de l'enregistreur fournit une tension continue. Pour les champs constants, la direction du champ peut être identifiée soit par le signe de l'affichage numérique, soit par la polarité de la tension fournie par la sortie de l'enregistreur [54].

III.4.2. Mesure des champs magnétiques

a. Mesure des champs directs :

Une fois le compteur remis à zéro, il est prêt à prendre des mesures. Le commutateur de mode (4) doit être en position « DIRECT FIELD ». La valeur « 1 » affichée sans zéros non significatifs indique un dépassement de plage et donc la nécessité de passer à une plage supérieure. La direction du champ est également indiquée dans ce cas [54].

b. Mesure des champs alternatifs

Le commutateur de mode (4) est déplacé sur la position « CHAMP ALTERNÉ » (Wechselfeld). L'affichage revient à zéro au bout de quelques secondes lorsqu'aucun champ n'agit sur la sonde. Le compteur est alors immédiatement prêt à l'emploi. Il convient de noter que dans ce mode, l'appareil de mesure réagit aux changements d'intensité de champ dans un délai d'environ 3 s. La valeur efficace de la valeur de l'induction magnétique, supposée sinusoïdale, est affichée. Le compteur est calibré pour une fréquence de champ alternatif de 50 Hz. Des mesures extrêmement précises sont toutefois possibles à des fréquences allant jusqu'à 500 Hz (fréquence limite 5 kHz). La valeur « 1 » affichée sans zéros non significatifs indique un dépassement de plage et donc la nécessité de passer à une plage supérieure. Les valeurs positives sont toujours affichées dans ce mode. Tourner la sonde de 180° à un point de mesure fixe n'affecte pas la valeur affichée [54].

III.5. Description du schéma de mesure

La figure III.11 illustre deux points de mesure situés à des distances de 0 et 1 mètre du câble électrique souterrain de 220 kV. Ces mesures ont été effectuées dans le respect des réglementations et normes de sécurité en vigueur, englobant des considérations telles que la zone de travail sûre, la distance de proximité des travailleurs et la distance par rapport aux autres sources de signaux sensibles. Dans le premier cas, le câble d'alimentation est positionné sous terre, tandis que dans le second cas, il sort du canal souterrain et se connecte au transformateur [55].

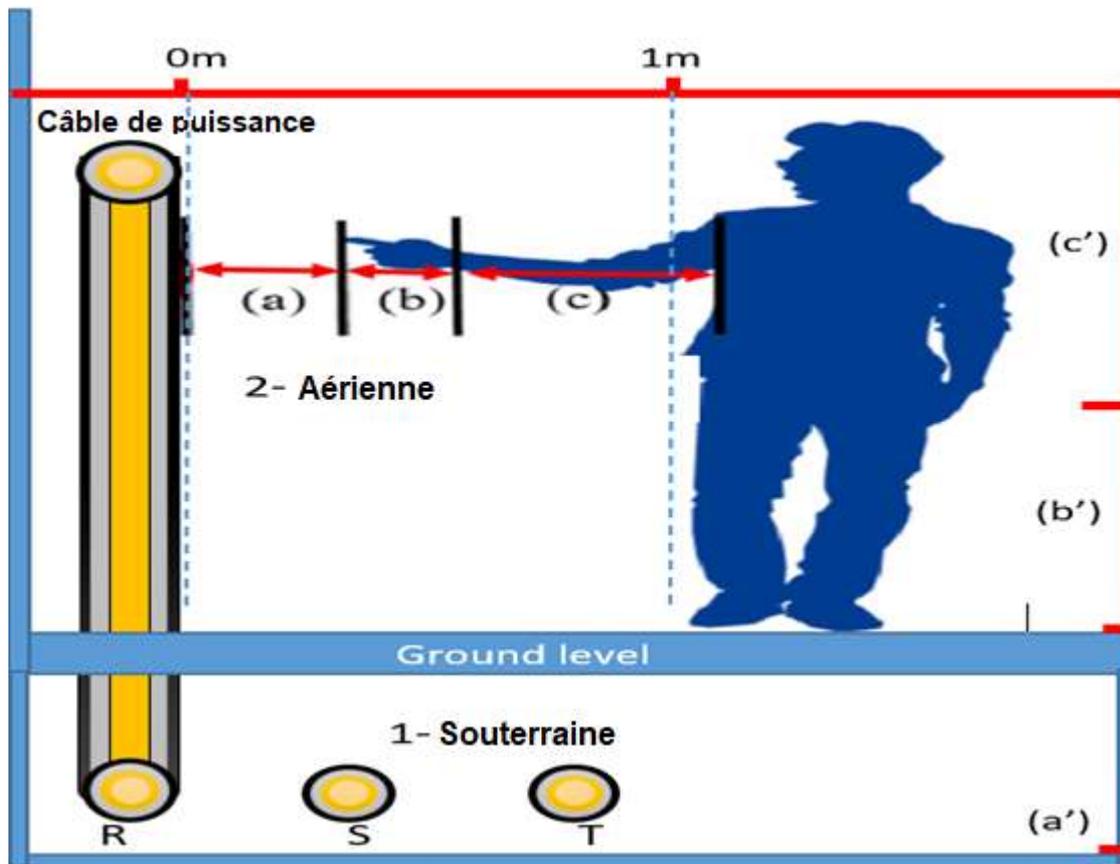


Figure III.11. Schéma descriptif de la position des deux points de mesures

III.6. Présentation des mesures électriques en fonction du temps :

Dans cette partie nous allons présenter des mesures électriques durant 24 heures (tension, courant, puissance pour deux tranches de la centrale électriques à gaz Hassi Messaoud Ouargla.

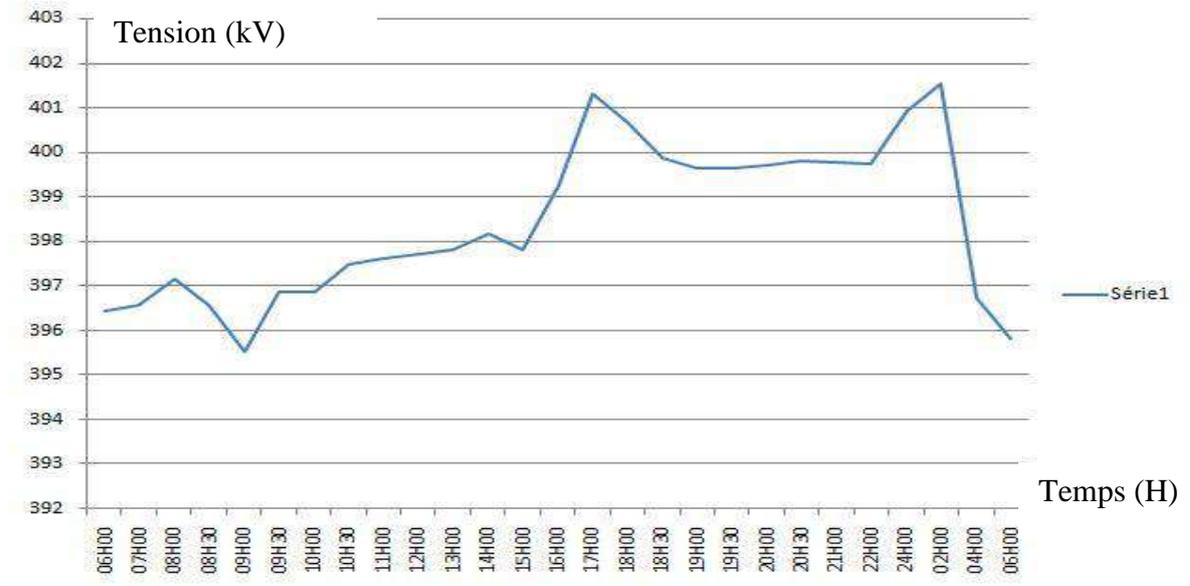


Figure III.12. Une courbe représentant les changements de tension électrique en 24 heures en Groupe 01.

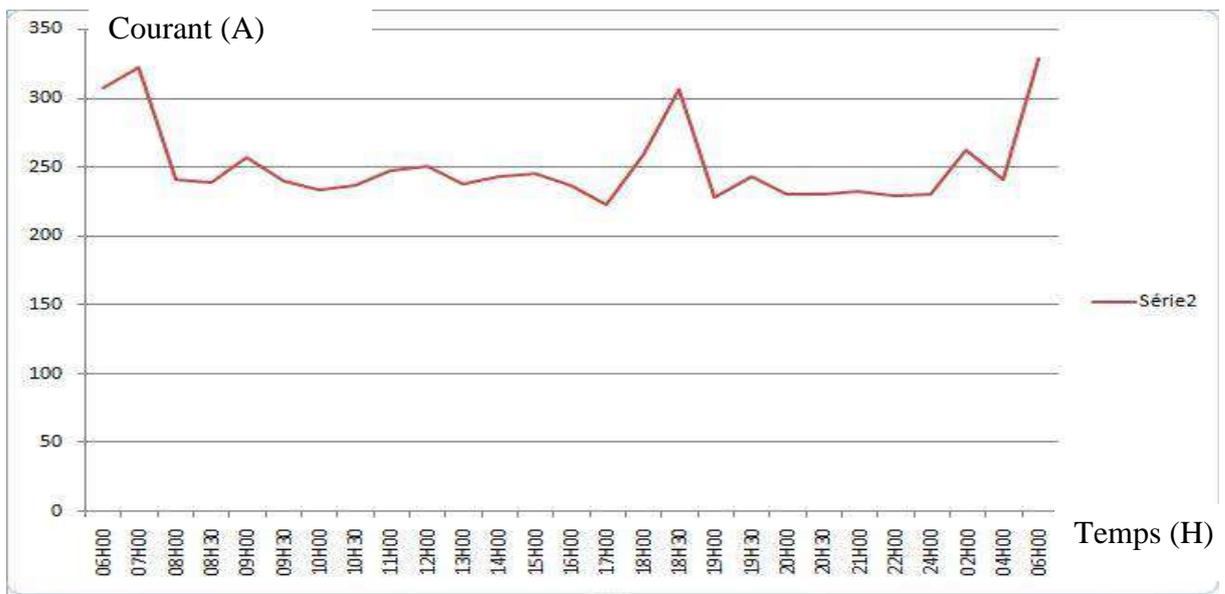


Figure III.13. Variation de courant électrique durant une journée pour la tranche 01.

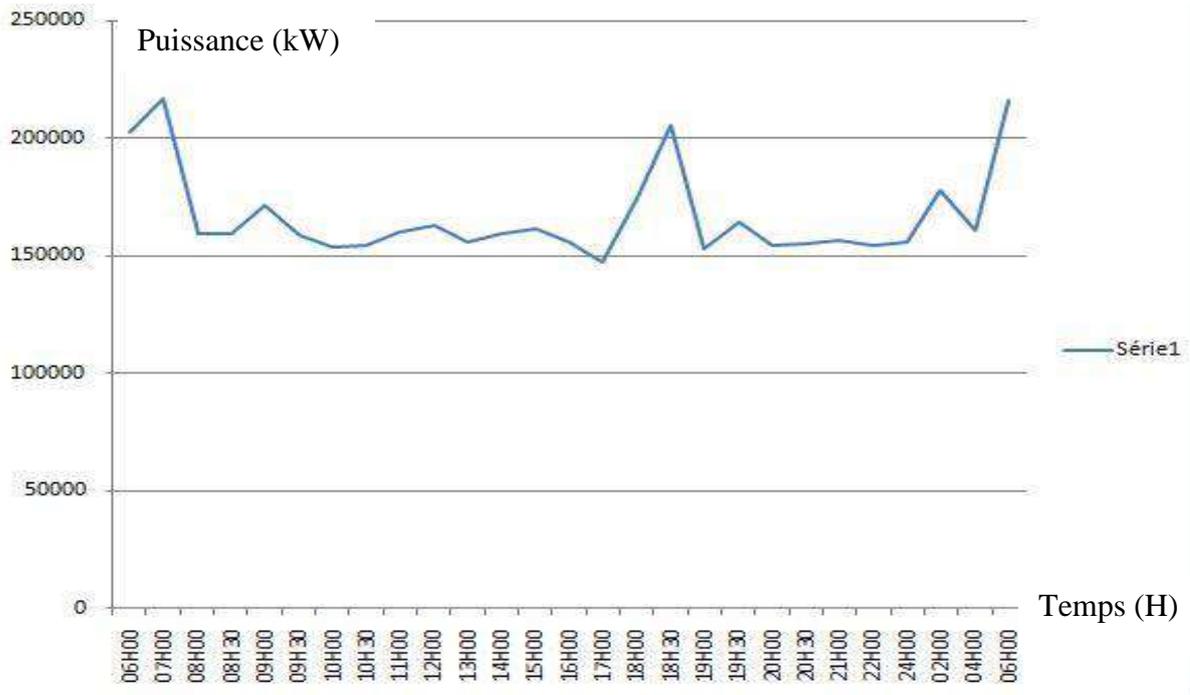


Figure III.14. La puissance électrique générée en fonction du temps de la tranche 01.



Figure III.15. La tension électrique durant 24 heures pour la tranche 03.

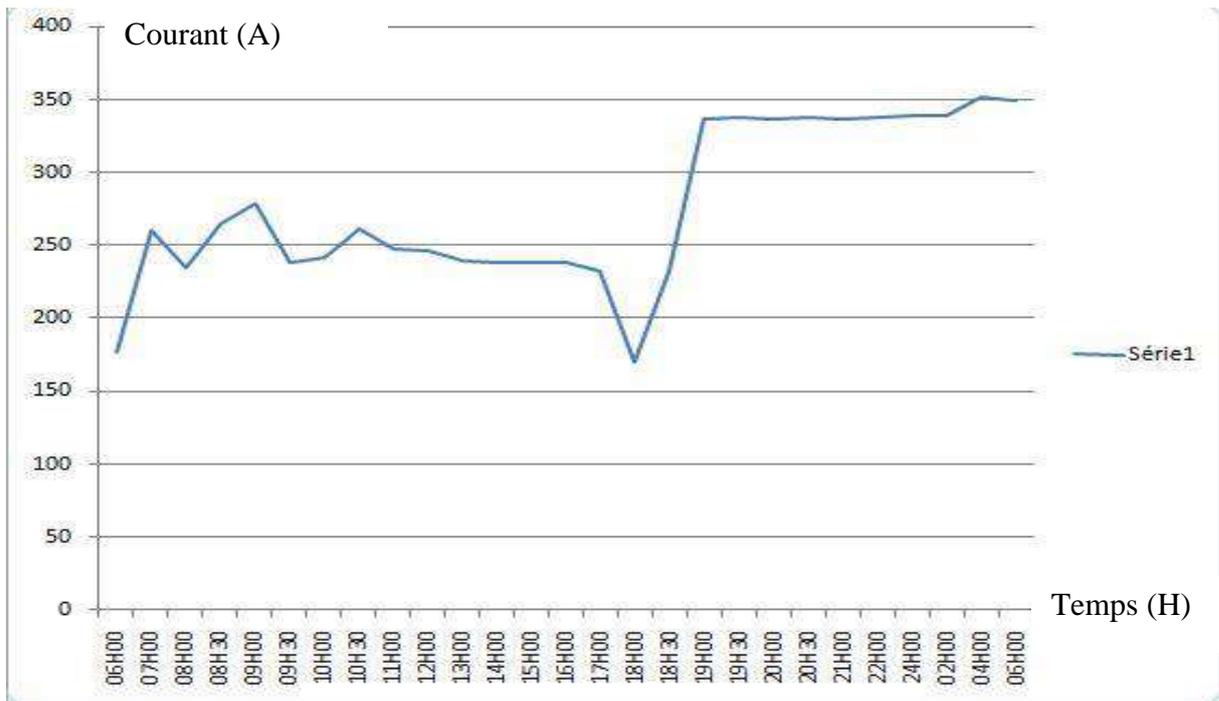


Figure III.16. Changements de courant électrique durant 24 heures en tranche 03.

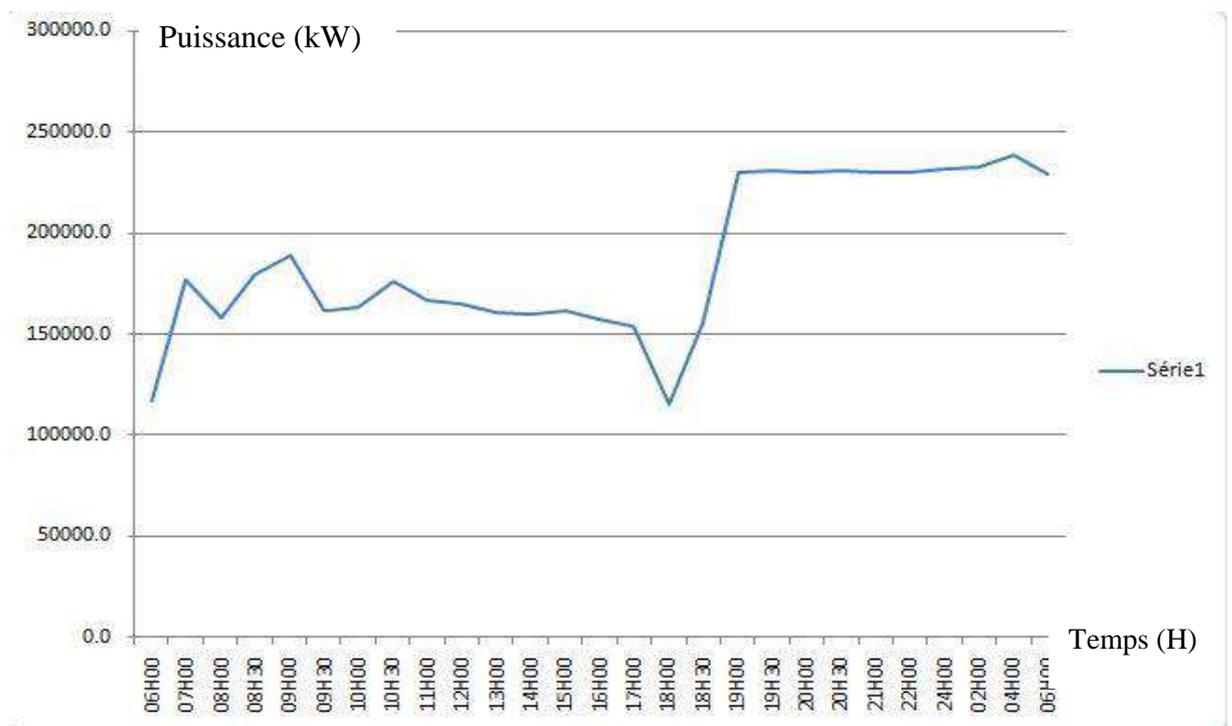


Figure III.17. La puissance électrique générée en 24 heures en tranche 03.

Les figures III.12 jusqu'à la figure III.17 précédentes représentent les variations des paramètres électriques tels que : la puissance transmise, le courant électrique véhiculé, la tension produite en fonction du temps dans durant les 24 heures [55].

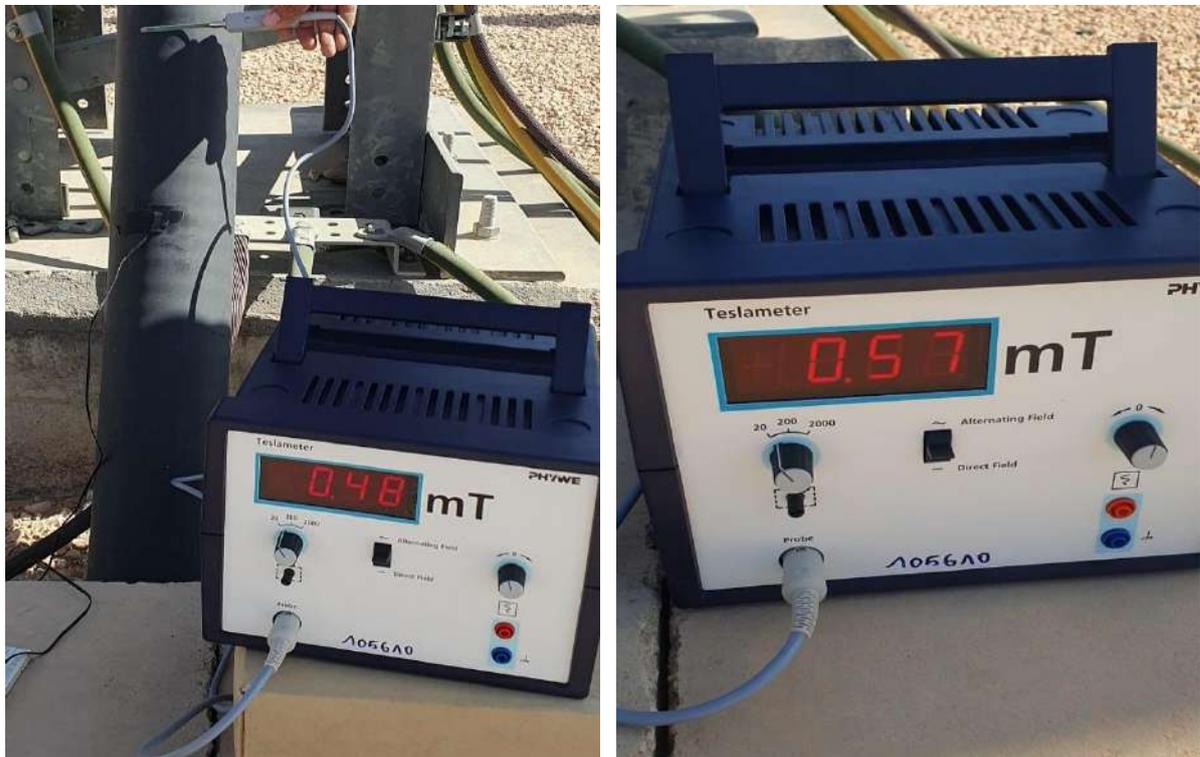
Les mesures dans les deux tranches 01 et 03 ont été obtenues à travers la surveillance et l'enregistrement numérique de la salle de contrôle, ces mesures seront très utiles pour

évaluation du champ magnétique soit en simulation ou mesure expérimentales. Ces données numériques seront exploitées dans ce chapitre comme une référence de mesure, même une variable d'entrée dans le logiciel de simulation numérique [55].

III.7. Résultats expérimentaux du champ magnétique

III.7.1. Mesure pour un câble électrique de 400 kV

Les figures III.18 montrent les mesures de champs magnétiques à l'aide d'un Teslamètre pour plusieurs valeurs de courant électriques (par le sélectionnèrent de quelques points avec une variation importante de courant). Par exemple pour des courants électriques 233 et 256 A on trouve des mesures d'induction magnétique de 0.48 et 0.57 mT respectivement.



a- Un courant électrique 233.21A

b- Un courant électrique 256.63A

Figure III.18. Représentation de résultat de mesure de l'induction magnétique

Le tableau III.1 représente les mesures de champs magnétiques à l'aide d'un Teslamètre à des différents moments (nous avons sélectionné quelques points important de variation non répétitive) pour les étudier [55].

Tableau III.1. Résultats expérimentaux de la mesure sur site du champ magnétique.

Tension (kV)	Tranche (03)		Densité de flux magnétique (mT)			
	Temps (Heur)	Charge (A)	0 (m)	0.6 (m)	1 (m)	2 (m)
395.54	09H00	256.63	0.57	0.086	0.07	0.029
396.89	09H30	239.55	0.50	0.081	0.063	0.025
396.87	10H00	233.21	0.48	0.079	0.06	0.023
397.49	10H30	236.47	0.51	0.080	0.0615	0.022
397.63	11H00	246.83	0.55	0.083	0.068	0.025
397.74	12H00	250.75	0.56	0.085	0.069	0.0295
397.82	13H00	237.74	0.51	0.08	0.062	0.023
398.19	14H00	243.38	0.53	0.082	0.066	0.024
397.84	15H00	245.5	0.55	0.0825	0.067	0.025

Le tableau III.1. Résume les résultats expérimentaux de la mesure sur site de la densité de flux magnétique. Les résultats obtenus montrent que la densité de flux magnétique augmente lorsqu'on s'approche du câble souterrain et même si l'intensité de courant est considérable. On peut noter que les valeurs maximums de l'induction magnétique conviennent pour le courant 256A sont : 0.57, 0.086, 0.07, 0.029 mT pour des différentes distances de 0, 0.6, 1, 2 mètre, respectivement [55].

III.7.2. Mesure pour un câble électrique de 220 kV

La deuxième partie sera consacré à une étude d'un câble souterrain de 220 kV la figure III.19 montre l'emplacement des mesures effectuées dans la zone 3, dans une autre ancienne centrale électrique à gaz de la Société Algérienne de Production de l'Electricité (SPE) toujours à Hassi Messaoud Ouargla.

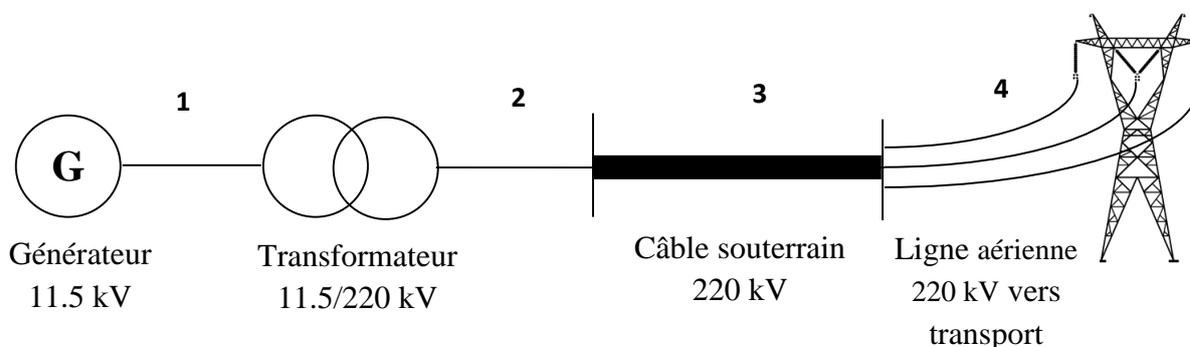


Figure III.19. Schéma simplifié de l'emplacement de la ligne souterraine dans la centrale électrique

III.7.2.1. Présentation des appareils de mesure des paramètres électriques

Les appareils de mesures des paramètres électriques pour chaque phase sont présentés dans la figure III.20 comme les ampèremètres, voltmètres, phasemètre, afficheur de fréquence et le wattmètre.



Figure III.20. Les appareils de mesure des paramètres électriques

La figure III.21 montre l'interface graphique des différentes liaisons et parties du réseau électrique (lignes de transport) ainsi que les instruments de mesure et de surveillance (par des panneaux indicateurs qui affiche toutes les informations électriques en temps réel), même des alarmes sonores et visuelles pour contrôler et réguler les grandeurs électriques dans les limites.

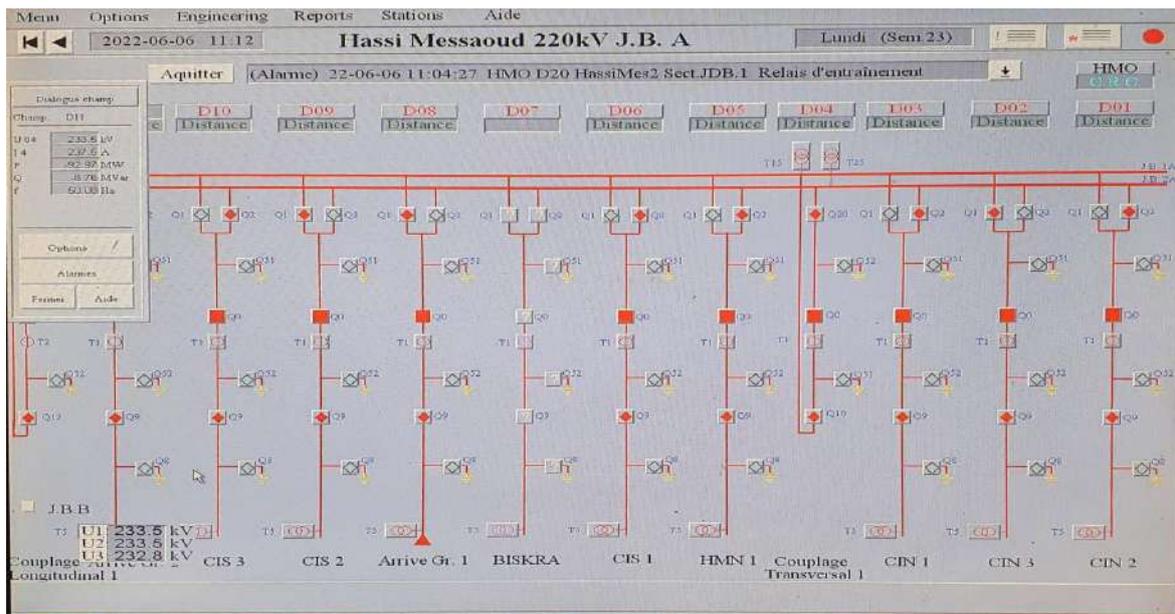
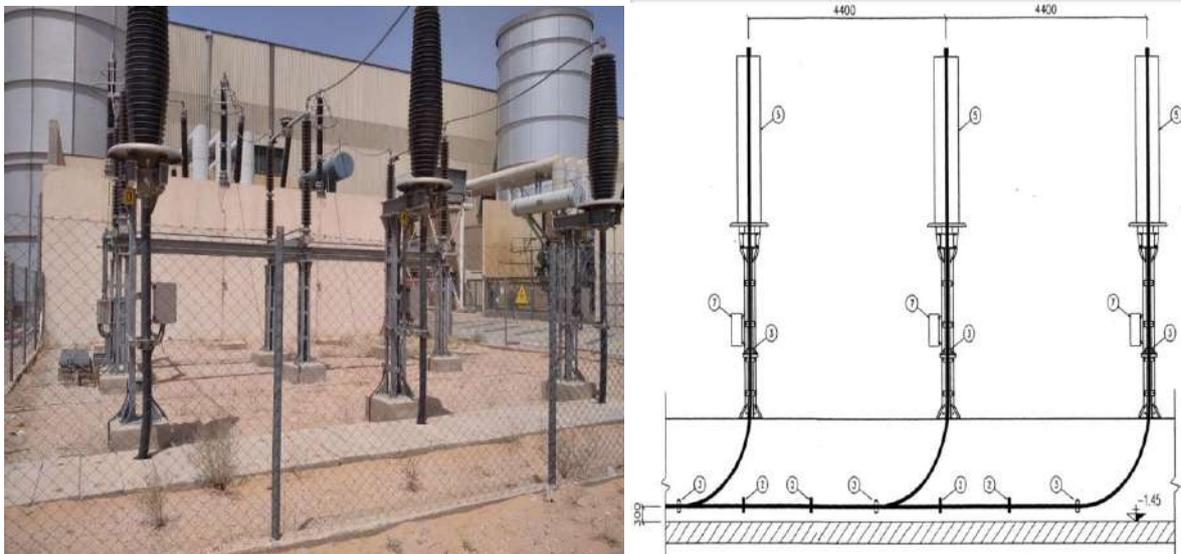


Figure III.21. L'interface du logiciel de surveillance des lignes de transport

III.7.2.2. Câbles souterrains 220 kV dans l'installation électrique

La tension de sortie dans la centrale à gaz est de 11.5 KV, cette tension est augmentée à 220 kV dans la SPE à travers un transformateur élévateur 11.5/220 kV. La haute tension a pour but de transmettre et minimiser les pertes joules dans lignes électriques.



a- Photo réelle des câbles souterrains b- schéma de connexion des câbles souterrains

Figure III.22. Câbles électriques souterrains à la sortie des caniveaux 220kV

La figure III.22 montrent également la liaison des sorties du transformateur élévateur à 220 kV et des câbles aériens 220 kV, ainsi que le processus de connexion aéro-souterraines des câbles HTB 220 kV à travers des boîtes de jonction. Le deuxième schéma électrique des trois phases des câbles souterrains à la sortie des caniveaux.

III.7.2.3. Résultats expérimentaux pour un câble électrique 220 kV

III.7.2.3.1. Mesure de la puissance électrique pour une tension nominale 220kV

La Figure III.23 donne un aperçu des mesures significatives obtenues pour des variations de la puissance électrique, le courant est estimé à travers cette courbe sur une période de 24 heures.

III.7.2.3.2. Résultats expérimentaux du champ magnétique

Dans cette partie, notre objectif est d'évaluer la densité de flux magnétique pour les câbles de puissance souterrain sur site, nous avons mené une étude expérimentale pour

surveiller les courants électriques et quantifier le champ magnétique émanant de la surface du câble en même temps à l'aide d'un Teslamètre.

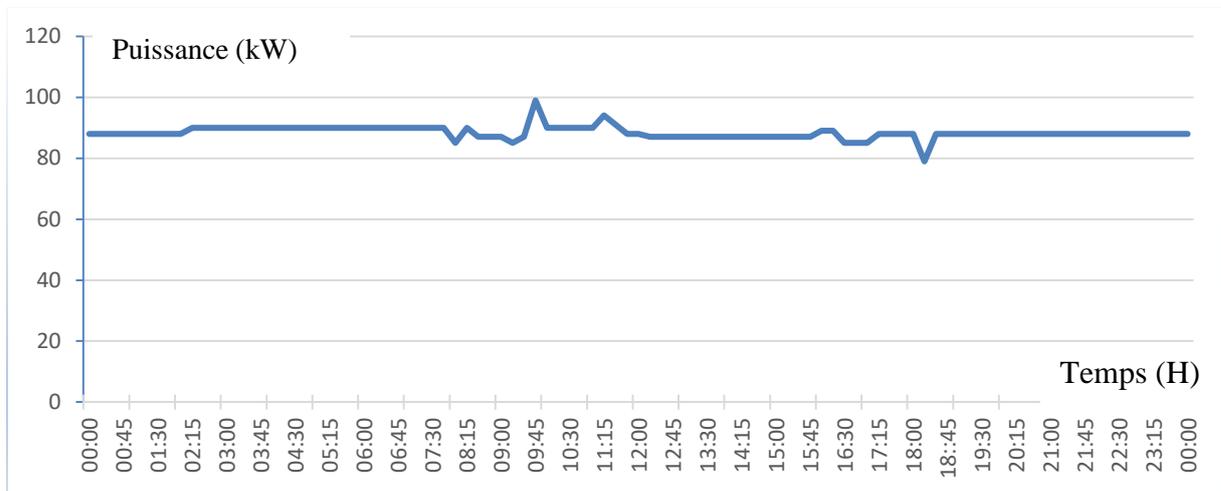


Figure III.23. La courbe de puissance électrique en 24 heures.

Nous avons sélectionné des points de mesures en fonction de la charge, particulièrement les variations importantes, par exemple : lorsque le Teslamètre numérique était positionné à proximité de la surface du câble souterrain, une lecture de 0,26 mT a été enregistrée pour un courant de 236 A, comme le montre la figure. III.24. [56]

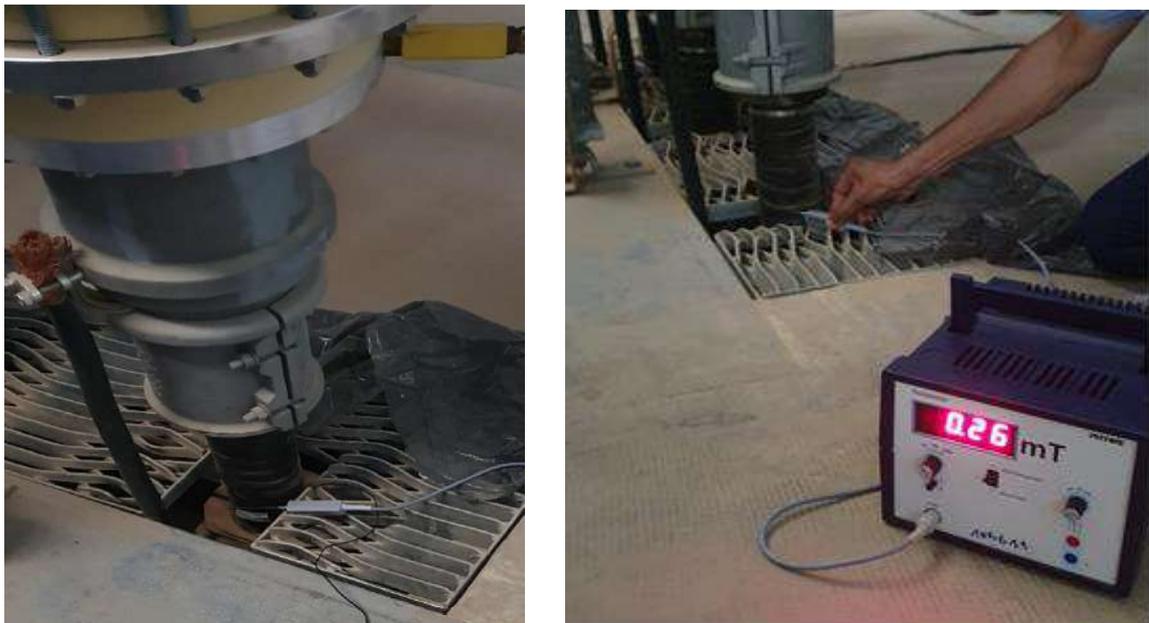


Figure III.24. Mesure du champ magnétique d'un câble souterrain 220 kV à l'aide d'un Teslamètre.

Le tableau III.2 illustre les mesures expérimentales de la variation de l'induction magnétique en fonction du courant électrique à l'extrémité du câble souterrain.

Tableau III.2 : Résultats expérimentaux de la mesure sur site du champ magnétique.

Tranche (03)			Champ magnétique (mT)
Temps (H)	Tension (kV)	Courant(A)	0 mètre
11:13	233.5	237.5	0.27
11:15	233.5	231.5	0.26
11:17	233.5	226	0.25
11:20	233.1	229	0.26
11:22	233.1	229	0.26
11:24	233.1	228	0.26
11:26	232.9	239	0.27
11:28	232.9	239.5	0.27
11:30	232.9	229.5	0.27

Pour l'analyse des résultats on trouve que l'induction magnétique était très forte à l'extrémité du câble souterrain à cause de la courte distance et le courant de transmission important, elle varie entre 0.25 et 0.27 mT pour des courants de 226 et 239 A respectivement. [56].

III.8. Conclusion :

L'objectif principal de ce chapitre consiste à obtenir des mesures expérimentales de la pollution magnétique, présentées sous forme de graphiques ou de tableaux pour les câbles 400 et 220 kV. Ces mesures seront enregistrées et comparées en tant que une source de données de référence avec les résultats de simulations obtenus par la méthode des éléments finis numériques.

Les variations de courant et de distance ont démontré leur influence sur le changement de la distribution de l'induction magnétique des deux câbles souterrains.

Dans le chapitre suivant, nous procéderons à la simulation des deux câbles électriques de puissance afin d'évaluer l'efficacité de la simulation et de valider nos résultats expérimentaux.

Chapitre IV

Simulation des câbles électriques souterrains de puissance à 400kV et 220kV

IV.1.Introduction

Ces dernières années, plusieurs travaux de recherche scientifique ont mis en évidence les agressions et les interférences électromagnétiques provenant des lignes de haute tension envers des objets tels que les pipelines. Ces interférences engendrent des conséquences graves et des effets néfastes sur la santé humaine, la qualité de service et la sécurité des appareils. Ce chapitre présente les résultats de simulations des câbles souterrains de 400 et 220 kV afin de confirmer nos résultats expérimentaux sur le terrain. Pour cette raison, nous avons étudié le champ magnétique à différentes distances générés autour de ces câbles souterrains, à la sortie et à l'intérieur des caniveaux. Plusieurs facteurs seront pris en compte, tels que la variation de la charge, la présence de défauts et la variation de la distance. Il existe différentes méthodes pour calculer le champ magnétique d'un fil, à savoir les approches analytique, semi-analytique et numérique.

Le logiciel de simulation numérique Comsol Multiphasiques 4.3 est utilisé pour calculer ces caractéristiques électromagnétiques.

IV.2. Câble électrique souterrain de puissance 400 kV

IV.2.1. Présentation géométrique et structurelle du câble souterrain 400 kV

Le câble électrique souterrain (CES) haute tension (HTB) de 400 kV est caractérisé par une structure et une géométrie représentées suivant la figure IV.1. Les dimensions géométriques des différentes parties du câble de 400 kV sont illustrées dans le tableau IV.1. Le Tableau IV.2 montre les propriétés électriques ainsi que les matériaux du câble souterrain de à 400 kV.

a. Forme et taille de câble électrique 400 kV :

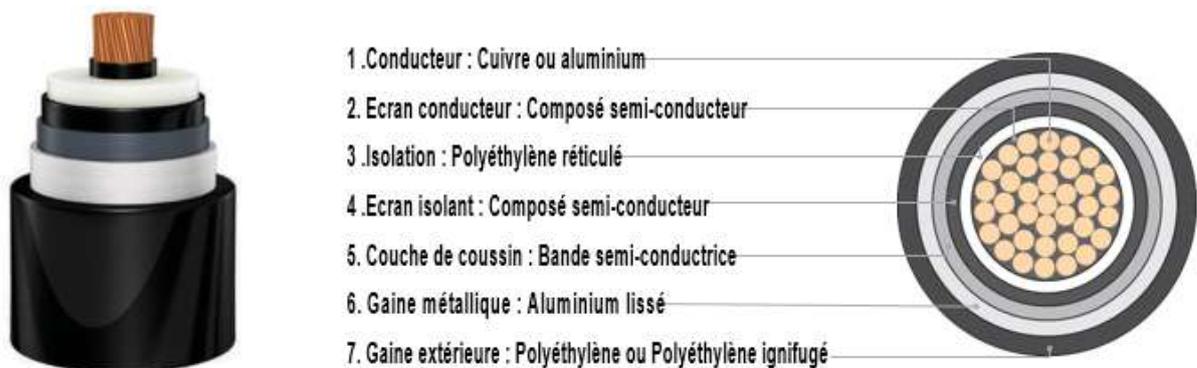


Figure IV.1. Câble souterrain à HTB 400 kV [37].

Tableau IV.1. La taille de différentes composantes d'un câble souterrain 400 kV [37] :

Paramètre et la taille de câble	Valeur
Section de conducteur	800mm ²
Diamètre du conducteur	34.3 mm
Épaisseur de l'écran conducteur	2.0 mm
Épaisseur de l'isolant	30.0 mm
Épaisseur de l'écran isolant	1.5 mm
Épaisseur de la gaine métallique	1.8 mm
Épaisseur de la gaine extérieure	6.0 mm
Diamètre extérieur du câble	124 mm
Poids du câble	18.2 kg/m
Max. Résistance du conducteur CC à 20°C	0.0221 Ω/km
Capacitance	0.15 μF/km
Courant nominal dans cas aérien	1099 A
Courant nominal dans cas souterrain	836 A

Le tableau IV.2 illustre les caractéristiques de la conductivité et la perméabilité des couches pour un câble 400 kV souterrain :

Tableau IV.2. Les différents matériaux d'un CES à HTB 400 kV [38].

Matériaux	Conductivité	Perméabilité relative	Permittivité relative
Air	10 ⁻¹⁴	1	1
Sol	1	1	28
Polyéthylène	10 ⁻¹⁸	1	2.25
Polyéthylène réticulé (XLPE)	10 ⁻¹⁸	1	2.5
Composé semi-conducteur	2	1	2.25
Bandes semi-conductrices	2	1	2.25
Aluminium lissé	3.53810 ⁷	1	2.2
Cuivre	5.99810 ⁷	1	1

IV.2.2. Représentation géométriques d'une ligne électrique souterraine

Les distances entre chaque phase et une autre d'un CES à HTB varient selon les normes internationales. Le Tableau IV.3 représente les distances entre phases et le niveau de sol. La distance horizontale entre les trois phases à la sortie du caniveau est à environ 5 m, mais pour le cas souterrain, elle est d'environ 0,5 m (Tableau IV.3).

Tableau IV.3. Les distances entre les phases d'une ligne souterraine.

Distance Souterraine (mm)		Distance Aérienne (mm)
H	D	D
1000	500	5000

La Figure IV.2 représente la représentation géométrique des câbles souterraine électriques, où D représente la distance horizontale entre phases, et H représente la profondeur par rapport au sol.

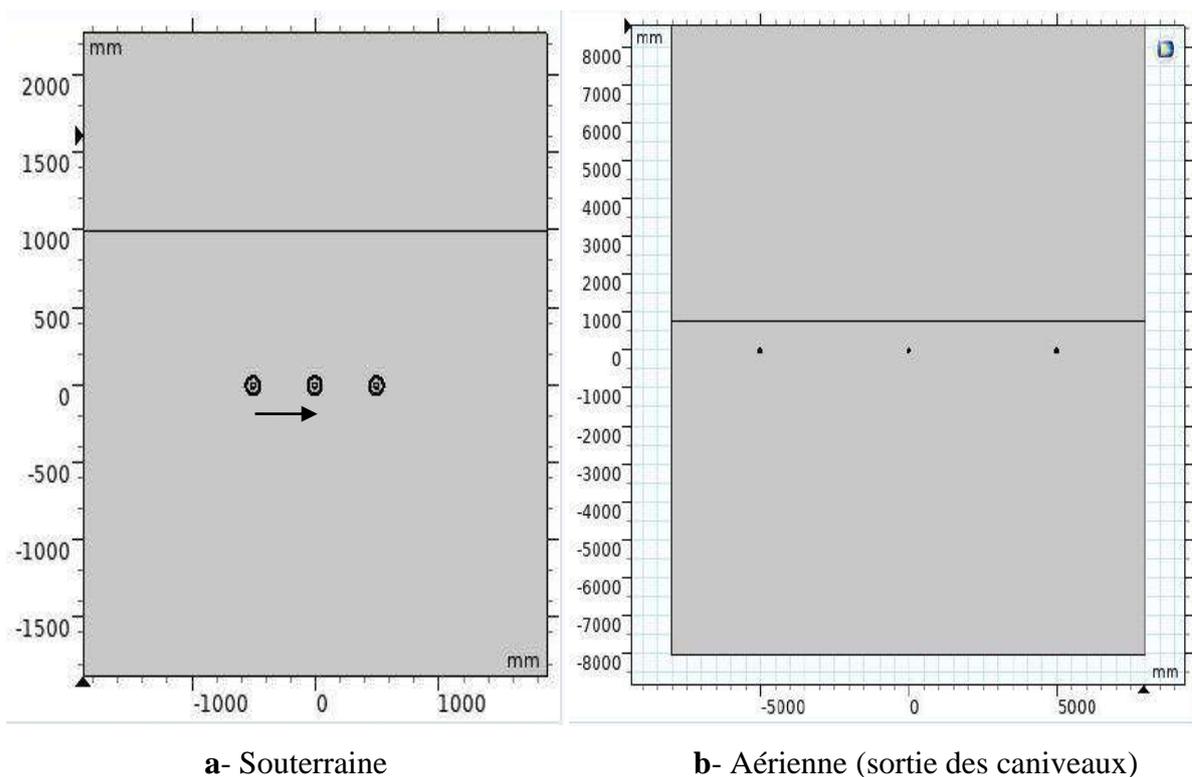


Figure IV.2. Différentes structures d'une ligne en 2 Dimensions.

IV.2.3. Structure d'un câble électrique 400 kV

Dans cette étape, nous présentons l'insertion de la géométrie du câble a plusieurs couches dans l'interface graphique du logiciel COMSOL fondé sur la méthode des élément

Chapitre IV Simulation des câbles électriques souterrain de puissance à 400kV et 220kV finis (voir Figure IV.3 pour la zone d'étude) du modèle de câble souterrain affiché en 2D selon les deux axes x et y.

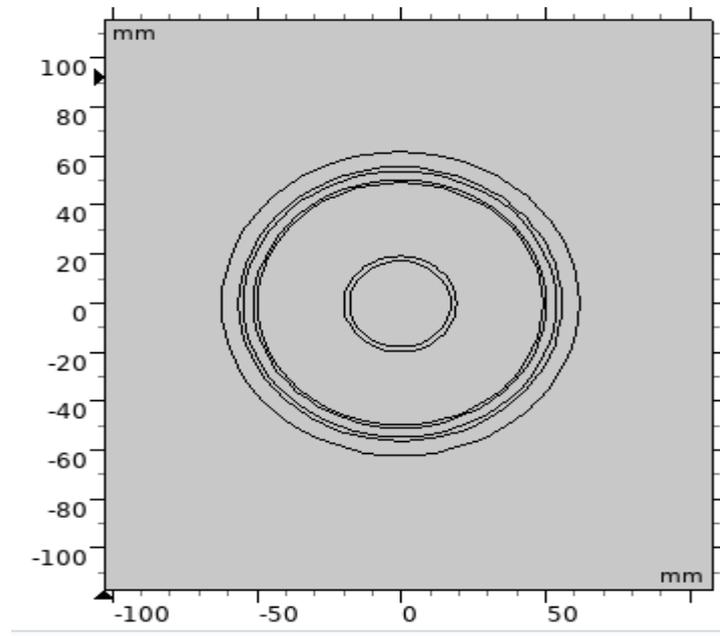


Figure IV.3. Les différentes couches du câble électrique HTB 400 kV

IV.2.4. Maillage du domaine d'étude

Un maillage d'un CES est une discrétisation contenant un ensemble d'éléments, de triangles et nœuds, qui dépend du système étudié (taille, forme, nature complexe ou non). Les maillages des deux cas souterrains et aériens sont représentés sur la figure IV.4. Le domaine d'étude contient trois parties essentielles : l'air, les câbles de puissances, le sol.

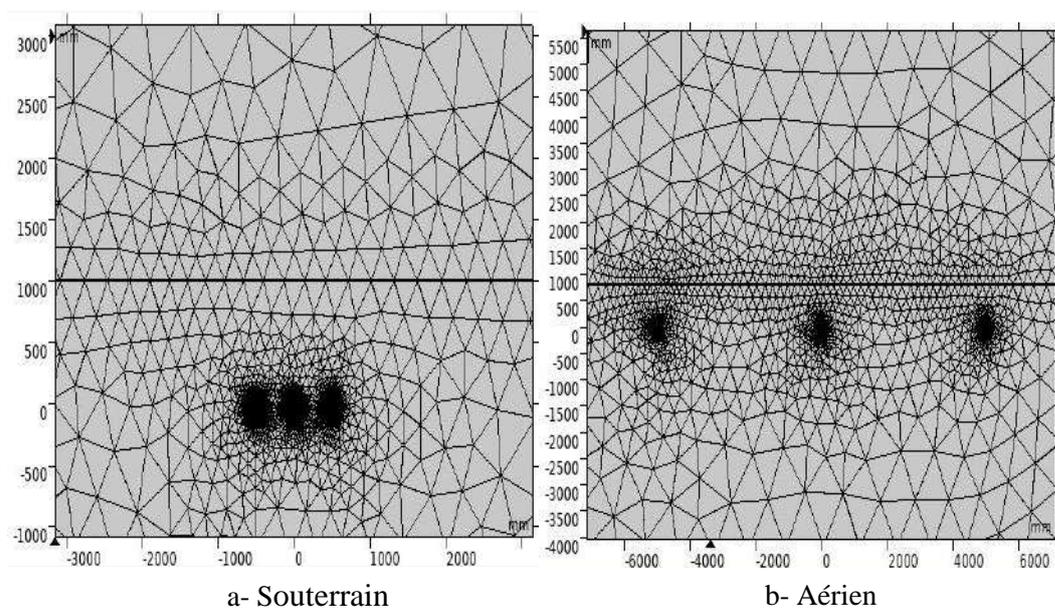


Figure IV.4. Maillage du domaine d'étude pour CES de HTB.

IV.2.5. Résultats de simulation des câbles triphasés souterrains HTB 400 kV

Le choix du module magnétostatique est essentiel afin de modéliser la pollution magnétique et calculer la densité de flux magnétique (DFM) généré par des câbles électriques souterrains (CES).

IV.2.5.1. Densité de flux magnétique à proximité des CES

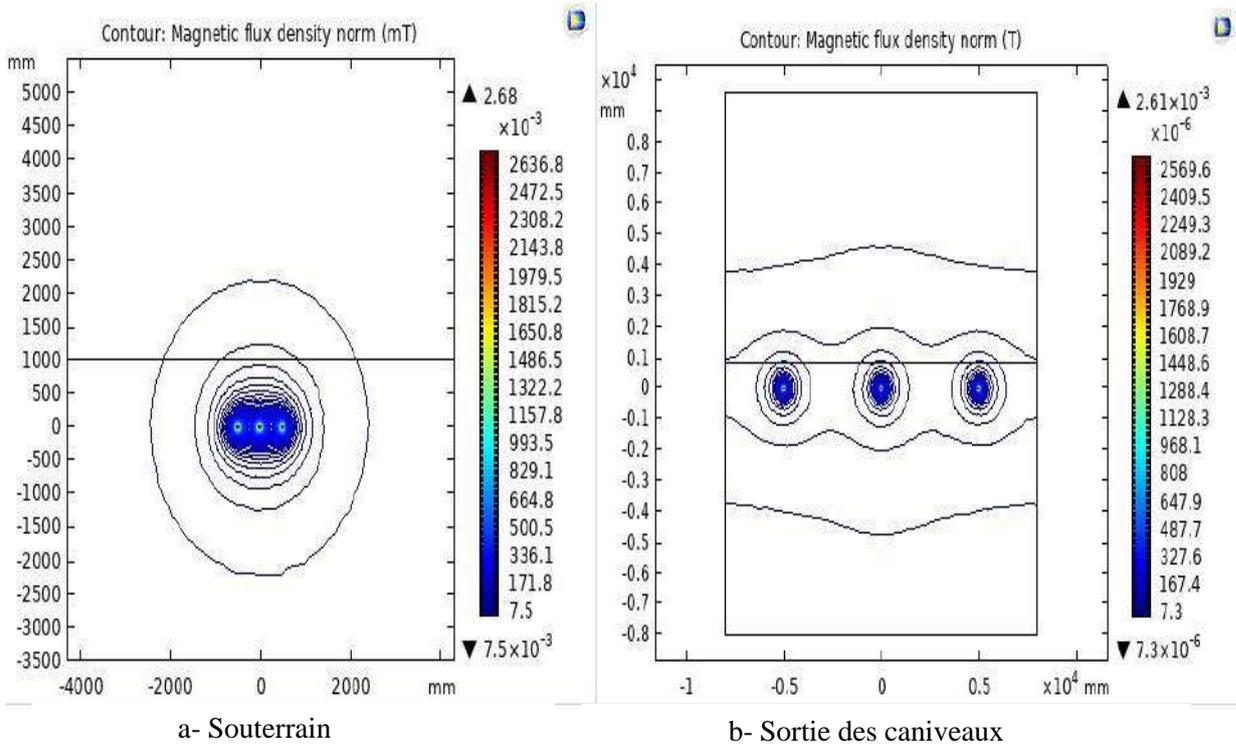


Figure IV.5. La distribution de la DFM des CES à HTB.

La figure IV.5 montre la distribution de la DFM à proximité des câbles de transport souterraine HTB 400 kV. Les résultats de la simulation obtenus montrent que la DFM est très élevée autour et à proximité des câbles électriques de puissance, en raison du courant électrique très élevé qui les traverse.

IV.2.5.2. Distribution des lignes de la DFM

Les câbles électriques sont espacés par une distance de phase suivant les normes internationales. La figure IV.6 illustre la répartition des lignes magnétique autour des lignes souterraines de transport triphasées dans les deux cas souterraines et aériennes (à la sortie de caniveau).

IV.2.5.3. Evaluation de la densité de flux magnétique des CES :

Les résultats numériques obtenus montrent la distribution des deux composantes verticale et horizontale de la DFM à diverses distances verticales des lignes souterraines représentés dans les figures IV.7a et IV.7b. Les mesures le long de l'axe x sont prises à la position des câbles comme une référence zéro.

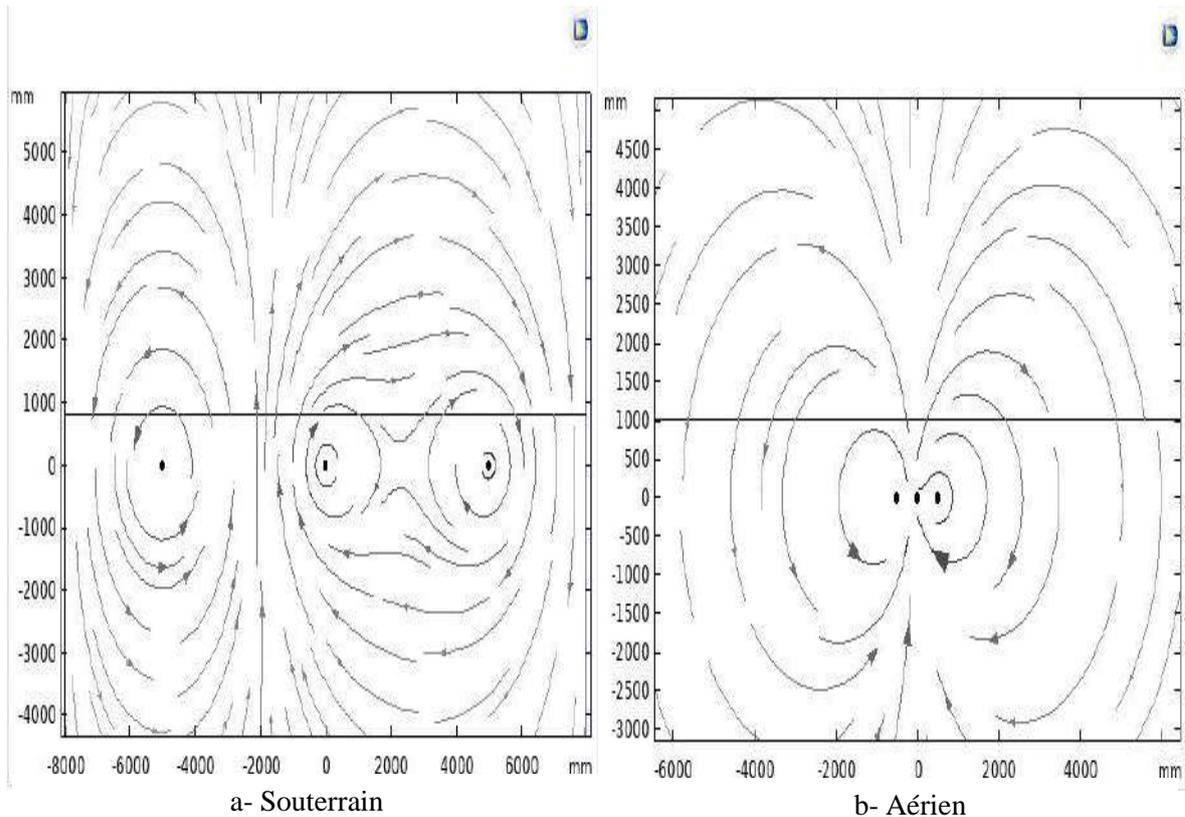
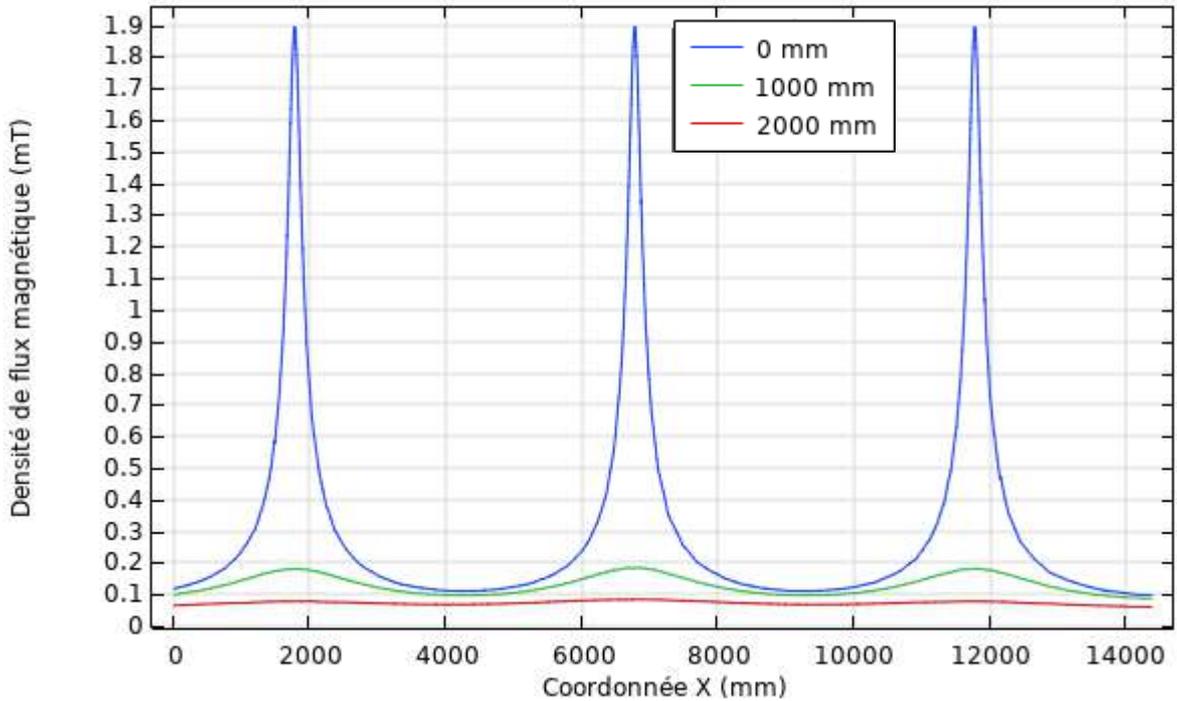


Figure IV.6. Les lignes du champ magnétique dans les câbles électriques HTB

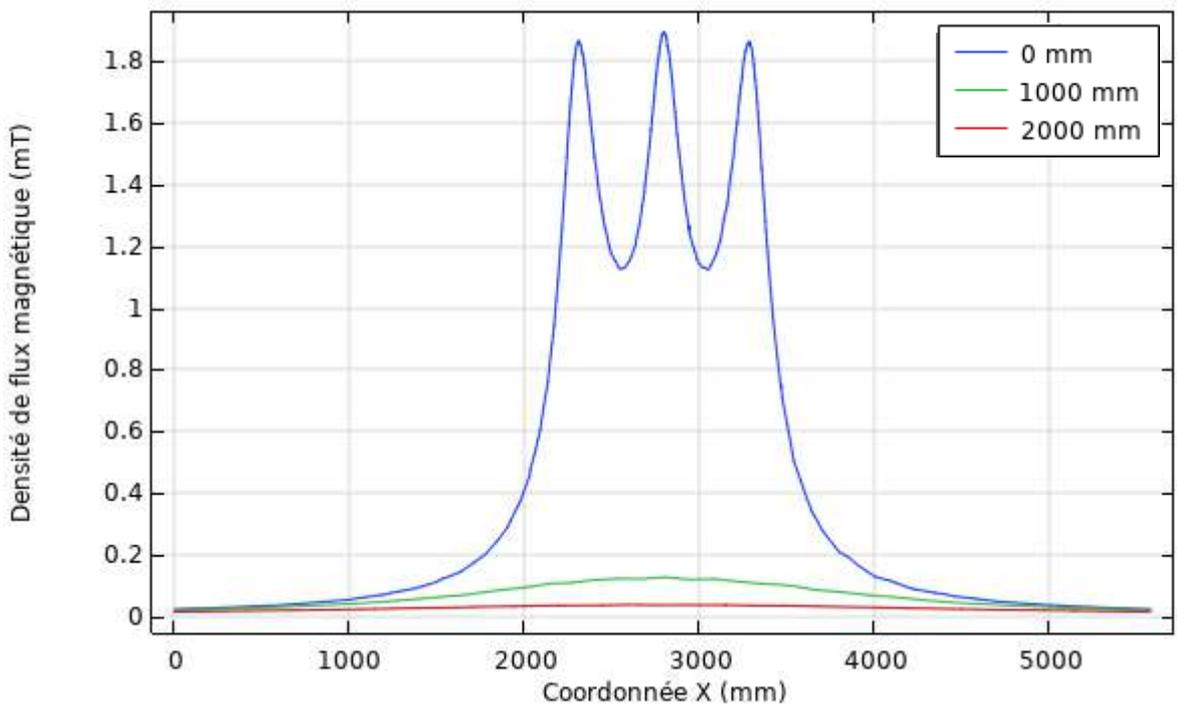
Nous avons réalisé une simulation des câbles HTB à la fois dans l'air (aérien) et sous terre (souterrain), dans des conditions normales, en faisant varier l'intensité du courant circulant (symétrique et équilibré) à travers les trois phases des câbles électriques. Les trois courbes représentent la valeur du champ magnétique à plusieurs niveaux des câbles de puissances : à une distance de 0 et 1 mètre, et enfin à une distance de 2 mètre. Voir les figures IV.7 suivantes :

Suivant les résultats présentés dans les figures IV.7a et IV.7b, qui décrivent le calcul de la DFM en fonction des différentes distances, on peut observer que dans tous les résultats, l'augmentation de la DFM près des trois phases, spécifiquement dans le centre des câbles.

La DFM devient très faible et moins significatif lorsqu'on s'éloigne des CES.



a- Souterrain

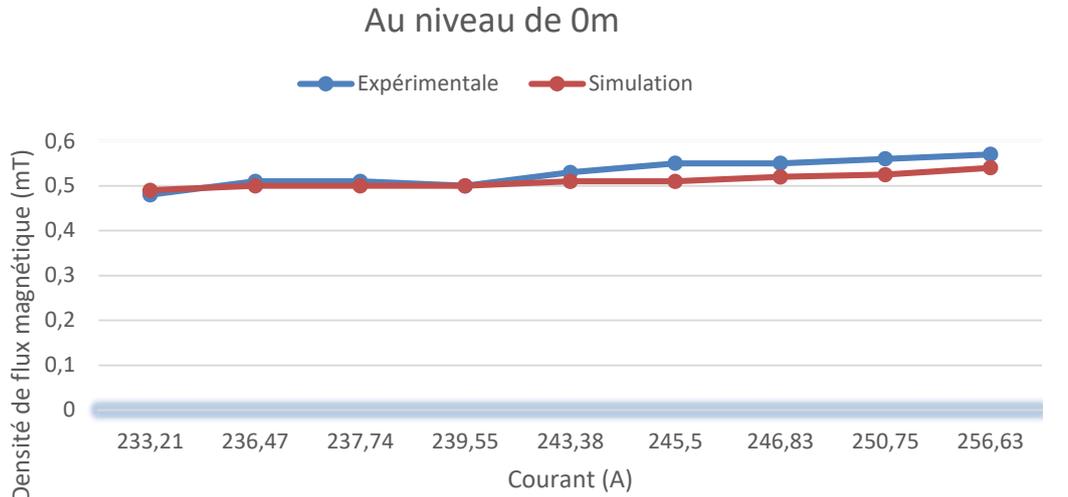


b- Aérien

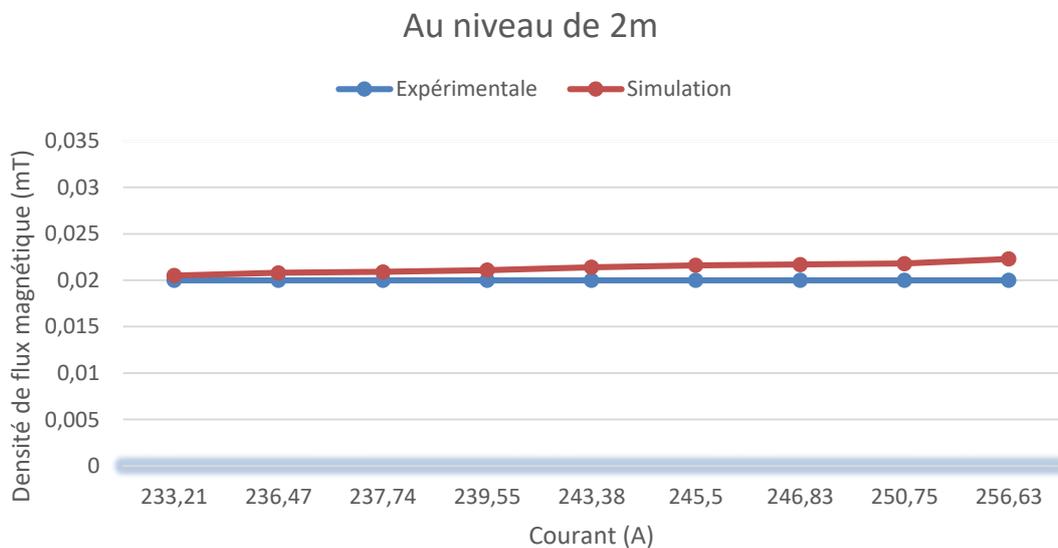
Figure IV.7. DFM à proximité des CES (Valeur du courant : 900 A)

En analysant les résultats de la DFM pour les CES dans les cas aériens et souterrains pour le courant, on observe que la DFM dans les deux cas sont presque égaux, avec des valeurs légèrement supérieures et négligeables dans le cas souterrain (0 m).

IV.2.5.4. Comparaison des résultats de simulation de mesure du champ magnétique et expérimental



a- à 0 mètres des câbles



b- à 2 mètres des câbles

Figure IV.8. Comparaison entre les valeurs de simulation et expérimentales de la DFM.

Les figures IV.8a et IV.8b illustrent les variations de la DFM obtenues pour les deux résultats de la simulation numérique et expérimentaux, en fonction de la variation des courants électriques à 0 et 2 mètres du câble. On peut observer que les valeurs obtenues des deux études sont très proches et similaires.

De plus, on constate que les valeurs de la DFM soit expérimentales ou de simulations sont inférieures aux limites internationales (entre la limite de 100 μ T à 1 et 2 mètres) mais élevée près et autour du câble d'alimentation souterrain.

Ces résultats affirment et confirment la précision et la fiabilité de la simulation numérique par la méthode des éléments finis. Cependant, ces amplitudes peuvent créer des interférences ou des mesures inexactes, en particulier dans les circuits et les câbles de contrôle ou les capteurs.

IV.2.5.5. Résultats des simulations du champ électrique

Pour représenter le champ électrique généré à côté des câbles souterrains, après avoir modéliser et les simuler à l'aide de modules électrostatiques (Electric Field). La figure IV.9 résume l'intensité du champ électrique à des différentes distances (l'intérieur et à l'extérieur des câbles électriques souterrains).

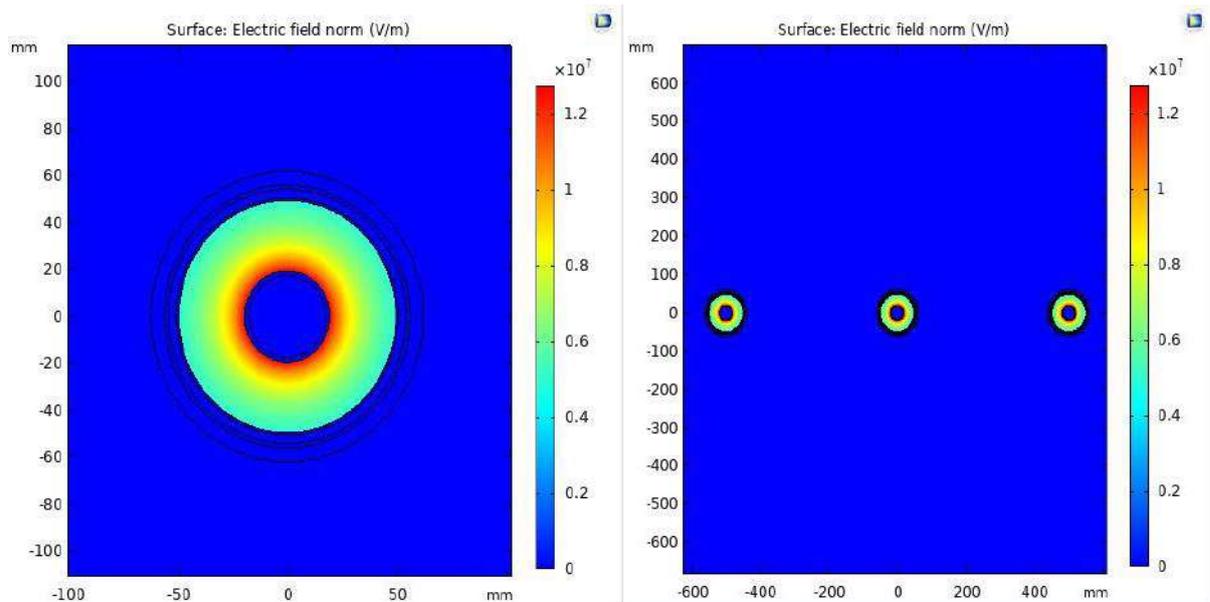
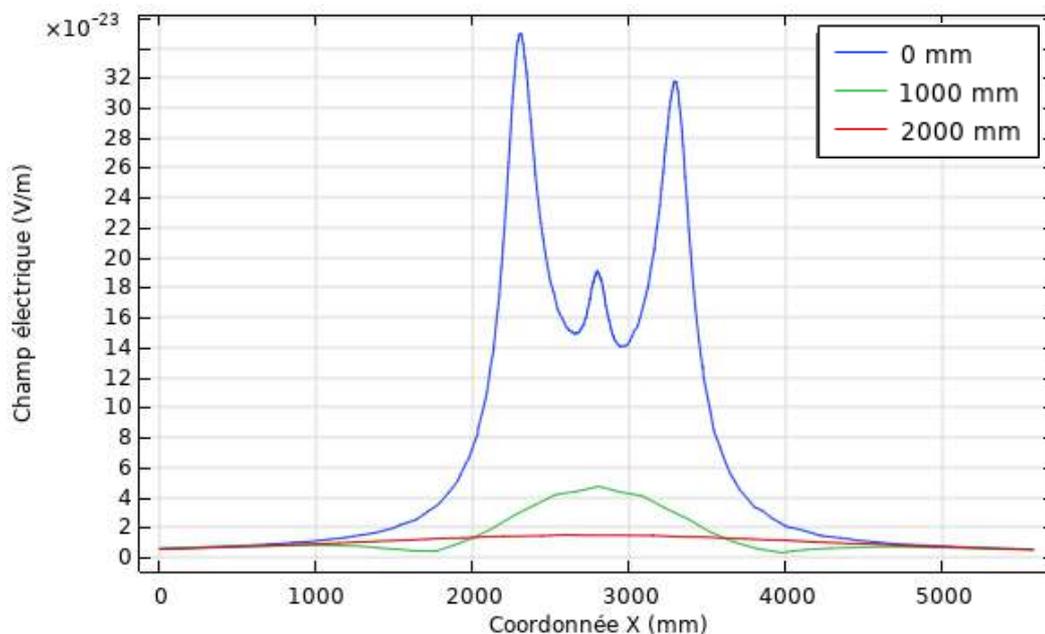


Figure IV.9. Distribution du champ électrique dans les CES pour 200 A

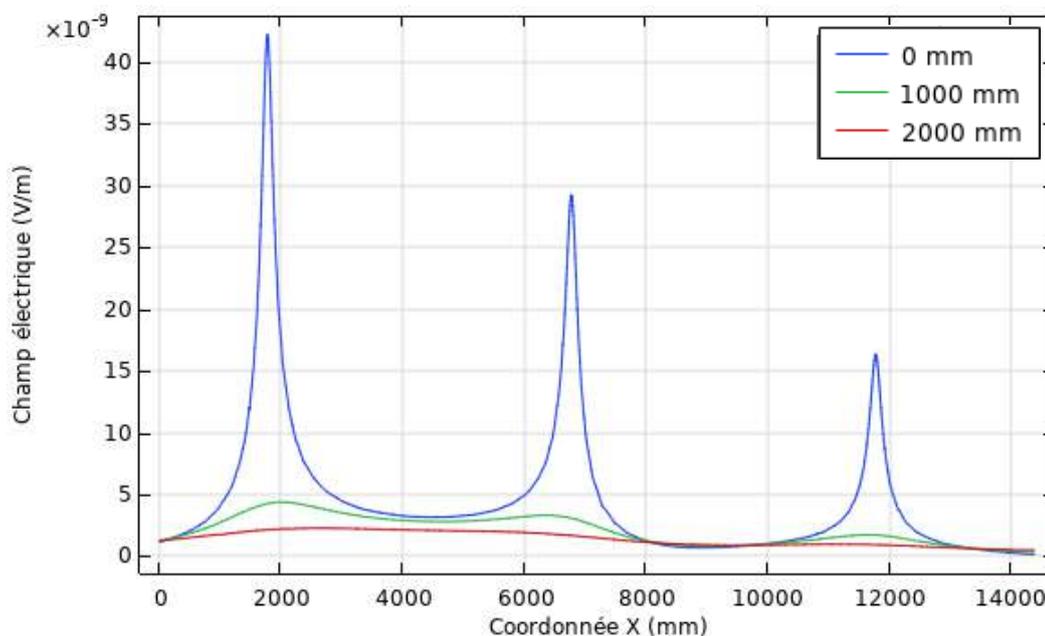
Les deux figures (Fig. IV.9.) montrent la répartition des champs électriques des lignes électriques souterraines. On peut voir que le champ électrique à surface du conducteur est à sa valeur maximale comme représenté en rouge, mais il ne sort pas vers l'extérieur (le champ électrique ne dépasse pas les extrémités des câbles) à cause de l'isolation ou du blindage électrique existant à l'intérieur de câble, pour cette raison sa valeur est nulle ailleurs.

IV.2.5.6. Mesure du champ électrique

Le champ électrique généré à proximité des CES est représenté dans la figure IV.10. La répartition du champ électrique à plusieurs niveaux (à l'intérieur des câbles et à proximité des câbles électrique) à côté des lignes électriques souterraines.



a- Souterrain



b- Aérien

Figure IV.10. Calcul du champ électrique près des CES

Le champ électrique à l'extérieur des câbles de puissance souterrain est très négligeable et presque zéro car il ne dépasse pas l'isolation du blindage électrique du semi-conducteur voire la figure IV.10.

IV.2.5.7. Cas d'un court-circuit des câbles souterrains

Les courants électriques d'un défaut de court-circuit à travers les phases d'une ligne génèrent un champ électromagnétique important. Le tableau IV.4 ci-dessous présente les intensités des courants de court-circuit pour les câbles HTB 400 kV étudiés.

Tableau IV.4. La valeur de l'intensité du courant en court-circuit dans un câble de 400 kV

HTB 400 kV	
Icc (kA)	100 de 1s

IV.2.5.8. DFM dans les CES en présence d'un court-circuit

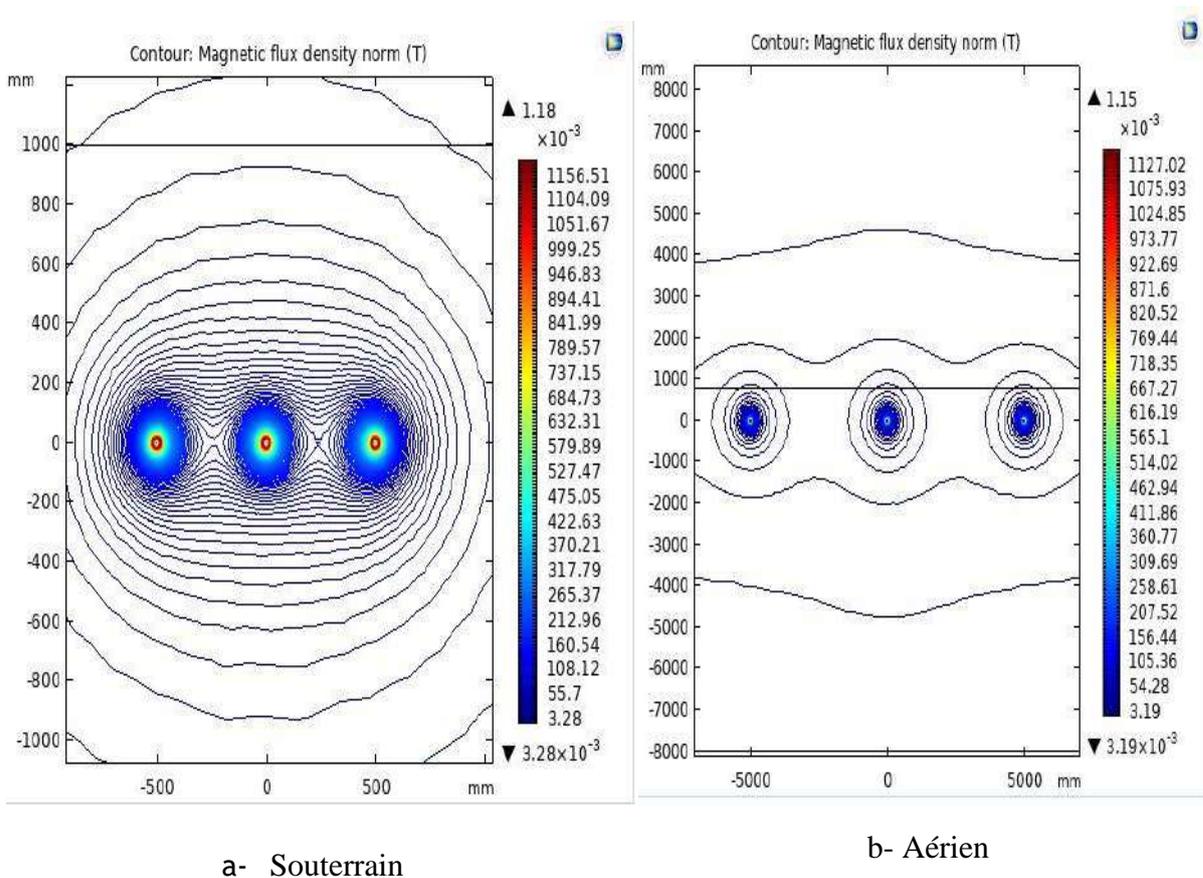
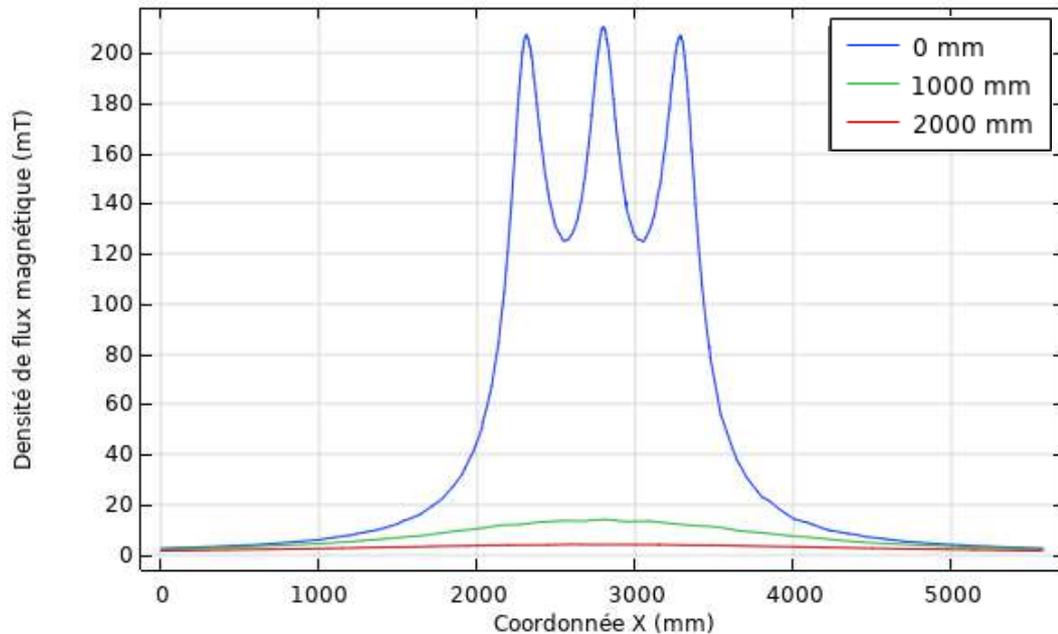


Figure IV.11. DFM pour un court-circuit de 100 KA.

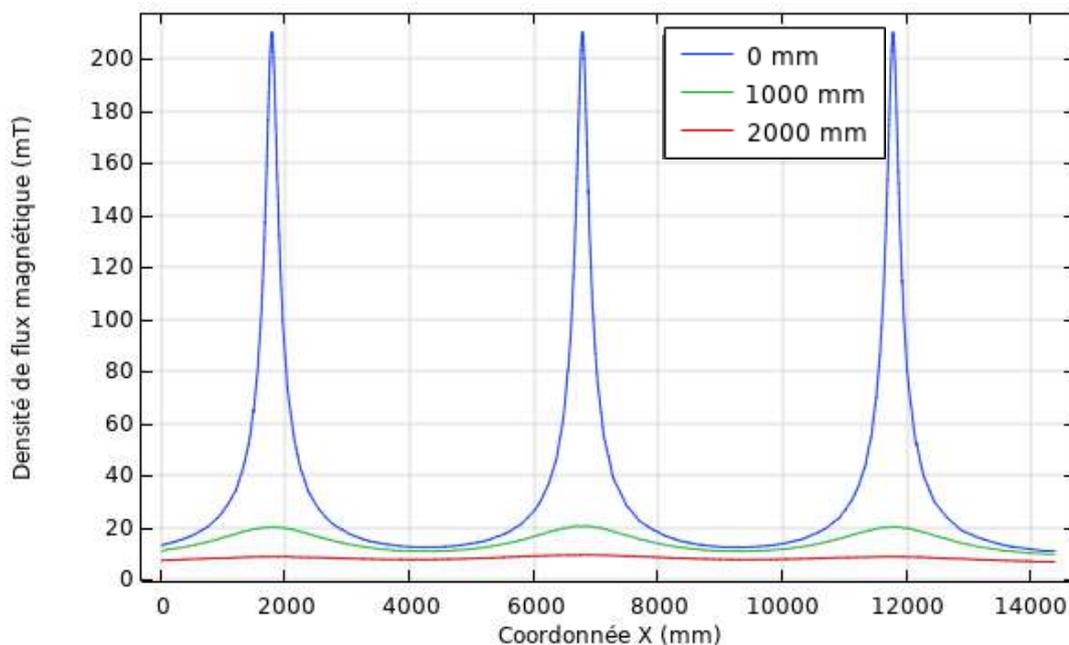
La figure (IV.11) illustre la DFM lorsqu'un court-circuit produit sur un CES de 400 kV avec une valeur de $I_{cc}=100$ kA. Grâce aux résultats de simulation, nous pouvons voir l'influence de la distance entre les câbles sur la répartition et la concentration des lignes du champ magnétique (couplage inductif entre phase) ainsi que sur le changement de l'intensité dans les deux cas.

IV.2.5.9. Mesure de la DFM en présence d'un court-circuit

Cette fois, nous allons calculer la DFM à l'intérieur et autour de la ligne de transport d'électricité lorsqu'un court-circuit (CC) se produit pour un courant de 100 kA. Les résultats de calcul sont présentés dans la figure IV.12 suivantes :



a- Souterrain



b- Aérien

Figure IV.12. DFM en présence d'un court-circuit de 100 kA.

La figure IV.12 montre les mesures de la DFM à proximité d'un câble électrique souterrain en défaut de court-circuit (CC). La présence de défauts de CC dans les câbles électriques entraîne

une DFM avec des valeurs différentes. Il a été constaté que la DFM lors d'un court-circuit est plus élevé lorsque les câbles sont en position souterrain, car il existe une puissance transmise et un courant de court-circuit dans les câbles. Le pourcentage de la DFM pour un courant 100 kA, est 112 fois de celle à l'état sain, qui est de 900A, soit 0,89% dans les deux cas.

IV.3. Câble électrique souterrain de puissance 220 kV

IV.3.1. Présentation de la structure du câble souterrain 220 kV

La figure IV.13 illustre la géométrie et de la conception d'un câble souterrain monophasé en XLPE de haute tension (HTB) de 220 kV, comprenant plusieurs parties (couches) avec des matériaux différents. Le câble souterrain 220 kV contient une partie essentielle ou il circule le courant s'appelle le conducteur d'une isolation, il est également protégé par des écrans en ruban de cuivre mis à la terre pour assurer la sécurité et un fonctionnement fiable [14,15].

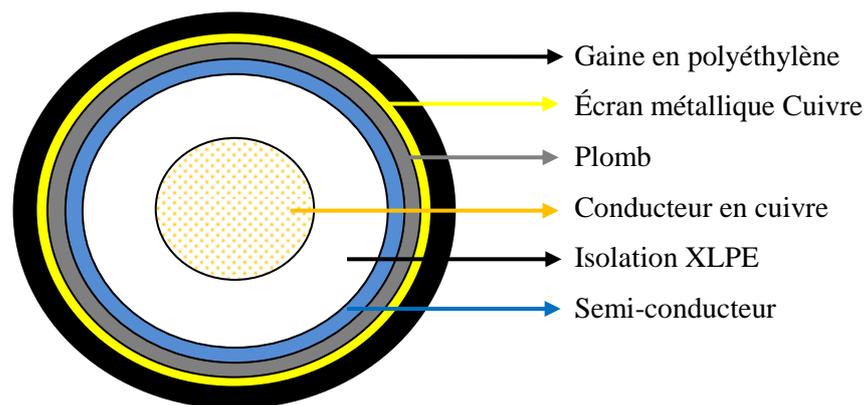


Figure IV.13 : Câble souterrain HTB 220 kV en XLPE.

La centrale électrique à gaz de Hassi Messaoud, située à Ouargla, dans le sud-est de l'Algérie contient des câbles souterrains en XLPE de 220 kV ABB pour faire une liaison entre les transformateurs et le réseau électrique. La configuration géométrique réelle de ce câble a été inspirée d'un cahier technique de la société Sonelgaz.

IV.3.2. Propriétés géométriques, physique et électrique

Notre étude se concentre sur des câbles souterrains à haute tension (HTB) de 220 kV (trois phases, en configuration géométriques en position horizontal). Le Tableau IV.5 fournit des données dimensionnelles, y compris la géométrie et la taille, pour chaque domaine du câble. Le Tableau IV.6 présente les paramètres physiques de divers matériaux, et le Tableau IV.7 résume les caractéristiques électriques du câble d'alimentation souterrain en XLPE de 220 KV [14,15].

Tableau IV.5. Taille de la structure du câble haute tension souterrain [14,15].

Paramètre et la taille de câble	Valeur
Section transversale (mm ²)	630
Diamètre du conducteur (mm)	29,8
Épaisseur de l'isolation (mm)	23,0
Diamètre sur l'isolation (mm)	79,2
Épaisseur semi-conductrice	0,85
Épaisseur de la gaine en plomb (mm)	3,0
Écran métallique en cuivre	3,0
Diamètre extérieur (mm)	112,8

Tableau IV.6. Matériaux constituant le câble souterrain 220 kV [14,15].

Matériaux	Conductivité électrique σ [S/m]	Perméabilité relative (ϵ)
Polyéthylène	$1 \cdot 10^{-18}$	2,25
Air	$1 \cdot 10^{-14}$	1
Plomb	$4,55 \cdot 10^6$	1
Polypropylène	$1 \cdot 10^{-18}$	2,36
XLPE	$1 \cdot 10^{-18}$	2,5
Semi-conducteur	2	1
Cuivre	$5,998 \cdot 10^7$	1
Sable	1	28

Tableau IV.7. Caractéristiques électriques du câble XLPE [14,15].

Section transversale	630 mm²
Tension nominale	127/220 kV
Courant nominal	775 A
Tension maximale	245 kV
Matériau	Cuivre

IV.3.3. Résultats de la simulation pour des câbles souterrains HTB 220 KV

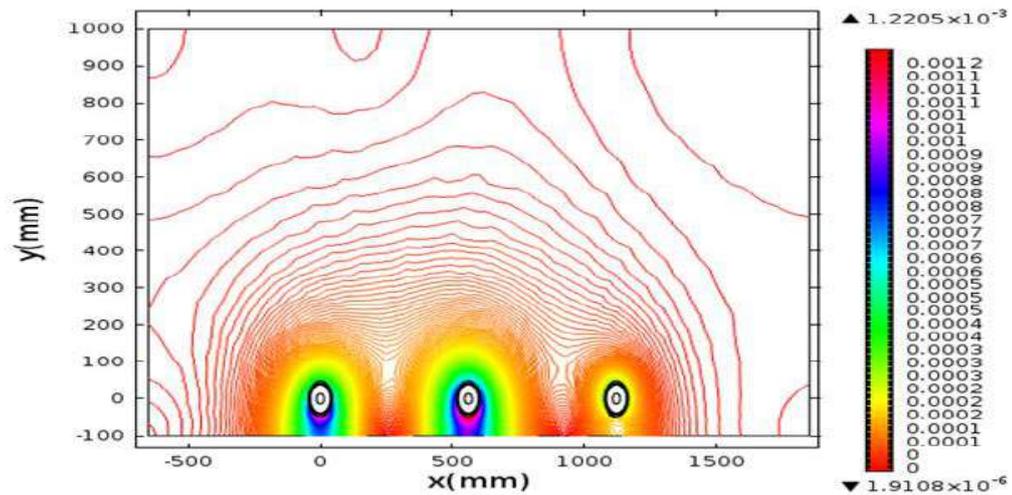
IV.3.3.1. Conditions normales dans un câble souterrain triphasé

La Figure IV.14-a montre la distribution de la DFM autour des câbles de puissance souterrains XLPE de 220 kV placé à 1 mètre sous-sol. La méthode des éléments finis (MEF) est utilisée pour calculer l'amplitude du champ magnétique autour et à côté de la surface du câble.

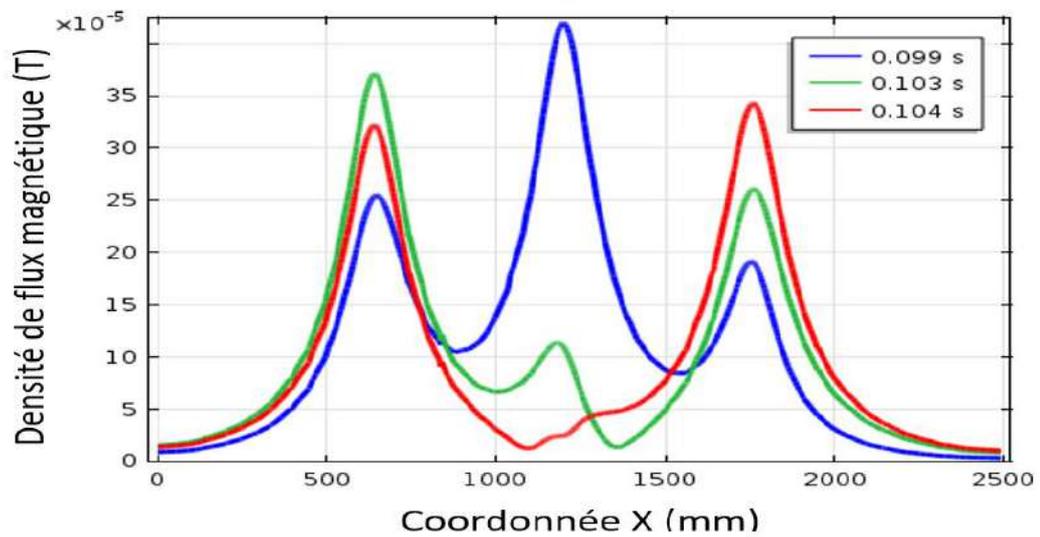
L'objectif principal de simuler les câbles souterrains 220 kV avec la MEF pour montrer l'efficacité ainsi que pour comprendre comment les divers paramètres influent sur la DFM.

La Figure IV.14 (b et c) montre la distribution de la DFM à différents niveaux au-dessus de la surface du sol à proximité d'un câble souterrain. Le câble est alimenté par un courant de : 720 A, et les mesures ont été prises à environ 1 mètre du câble. À partir des résultats présentés dans la Figure IV.14, on peut remarquer que les intensités et la distribution de la DFM sont affectées à la fois par la distance et la position centrale des trois câbles souterrains. Il est à noter que les valeurs de densité de flux magnétique diminuent à mesure que la hauteur au-dessus de la position du câble (selon la position y) et de la distance horizontale (selon x).

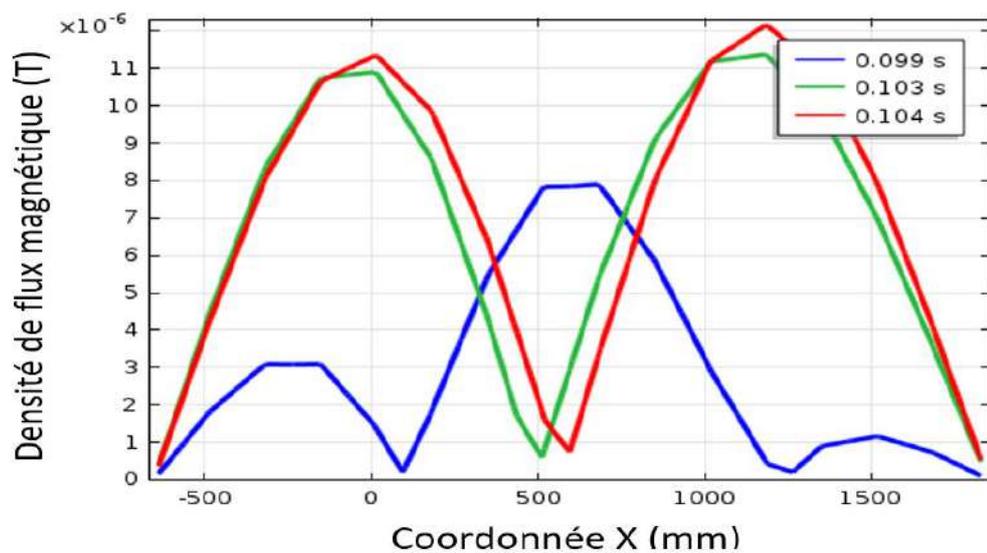
Les résultats de simulation du champ magnétique ont été comparés aux résultats expérimentaux. Pour comparer nos résultats nous devons calculer l'incertitude (le calcul d'erreur entre les valeurs numériques obtenues par le modèle MEF et les valeurs expérimentales mesurée sur site).



a- Distribution de la DFM



b- Calcul de la densité de flux magnétique près de la surface des câbles 220 kV



c- Calcul de la DFM à 1 mètre

Figure IV.14. Calcul de la DFM pour des câbles souterrains 220 kV

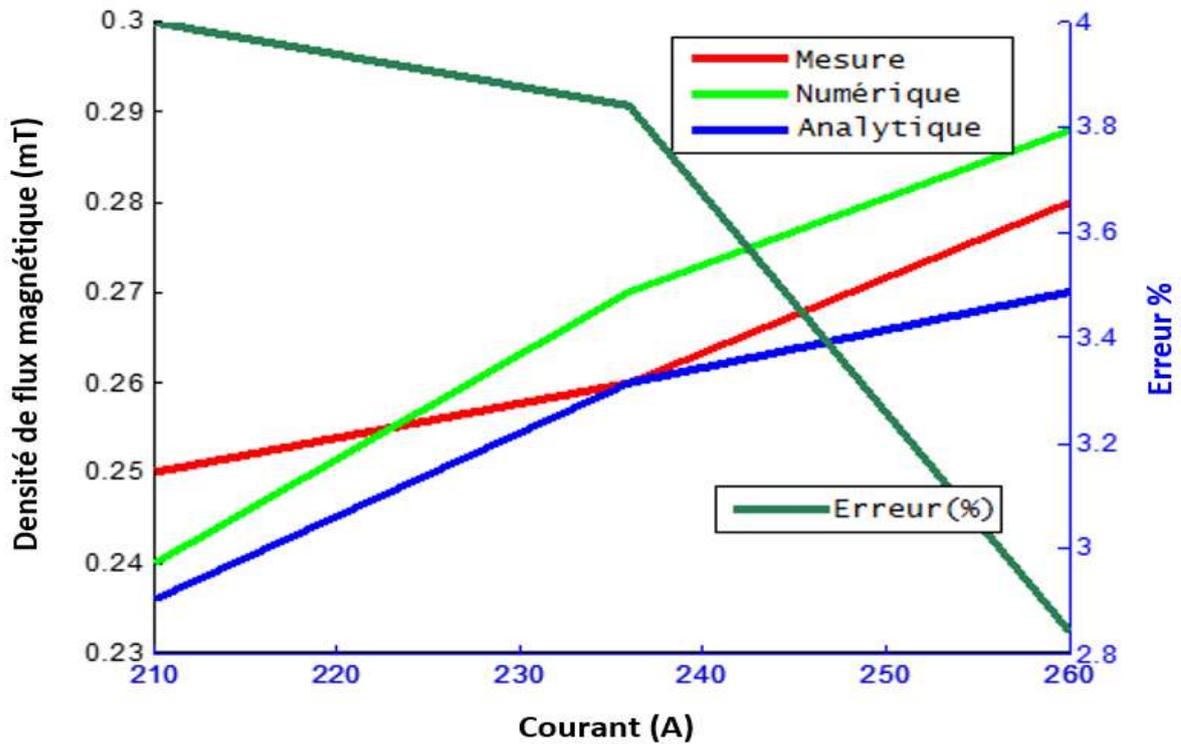


Figure IV.15. Comparaison des résultats en fonction de la variation du courant.

Le modèle analytique peut produire d'importantes erreurs d'approximation lorsqu'il est comparé aux résultats numériques et de mesure, ce qui peut être attribué aux paramètres linéaires et négligés de divers composants.

L'efficacité du modèle de simulation a été évaluée par des tests avec la MEF et le logiciel MATLAB. Le modèle a ensuite été validé pratiquement en menant des expériences avec diverses variations de courant. Les valeurs du champ magnétique ont montré un bon accord, se situant constamment dans la plage des incertitudes de mesure. La Figure IV.15 présente les résultats de la comparaison, indiquant une forte concordance entre les valeurs simulées et expérimentales. Dans le cas du câble souterrain 220 kV, l'erreur est restée en dessous de 5%, démontrant un très bon niveau de précision [16, 20, 21].

IV.3.3.2. Influence de la variation de la puissance électrique demandée

La figure IV.16 illustre clairement la relation entre la DFM et la variation de charge à deux positions différentes (proche et à 1 mètre du câble). Il est évident que l'amplitude de la DFM à différents niveaux (hauteurs) au-dessus de la surface du câble souterrain est directement affectée par la variation d'un courant très important.

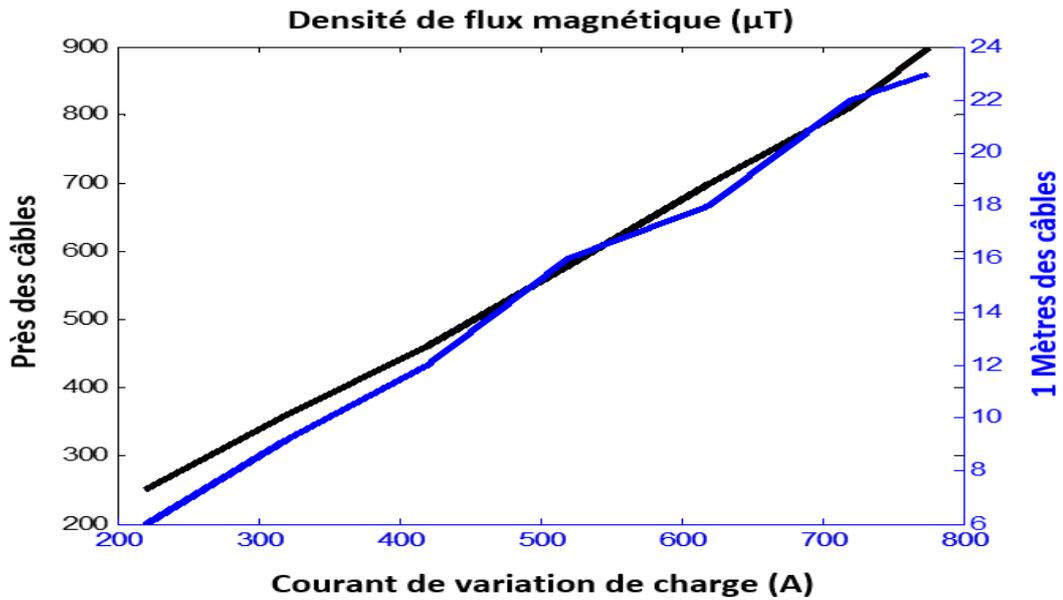


Figure IV.16. Variation de charge dans les câbles de puissance souterrains 220 kV

IV.3.3.3. Impact du changement de la distance sur la structure horizontale

a. Variation de la distance horizontale :

L'objectif est de montrer l'effet de la variation de la distance entre les structures plates (horizontales) sur la DFM est démontré dans la figure IV.17. Cette étude suppose que les courants dans les trois phases sont symétriques et équilibrés, avec des emplacements des câbles variables.

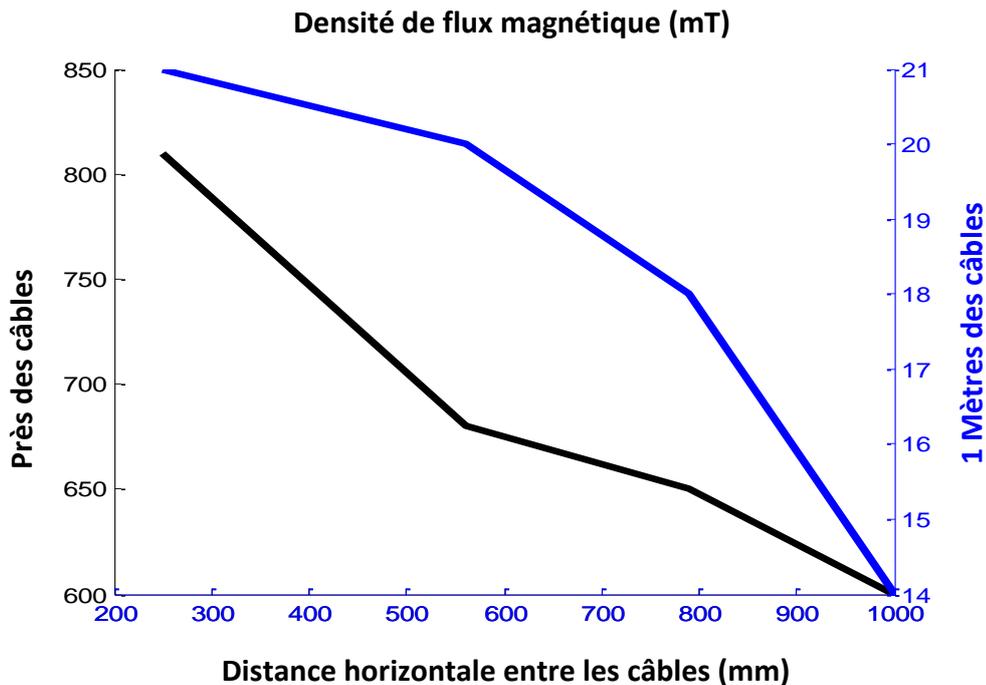


Figure IV.17. Influence de la distance horizontale entre les câbles avec un courant de 720 A.

La magnitude de la DFM des trois phases est influencée par la distance horizontale, ce qui présente la variation de leur configuration plate de position des phases, voir la Figure IV.17.

Selon la figure IV.17, on s'attend à ce que le champ magnétique maximal diminue en fonction la distance horizontale entre les trois phases augmente, ce qui entraîne la minimisation de l'effet mutuel entre les champs magnétiques des trois phases. Plus précisément, la densité de flux magnétique maximale diminue de 810 μT à 600 μT lorsque la distance horizontale est augmentée de 250 mm à 1000 mm.

b. Variation de la distance verticale

Le Tableau IV.8 montre les effets de la variation des hauteurs du centre, des deux phases et des trois phases sur l'intensité du flux magnétique produite. La DFM maximale varie avec les changements de position verticale de la hauteur de phase (position verticale, plus haute et plus basse que les autres phases), comme on peut l'observer dans le Tableau IV.8.

Tableau IV.8. Influence de la distance en profondeur entre les câbles souterrains avec un courant 720 A

Distance verticale (mm)	1 mètre des câbles Densité de flux magnétique (μT)		
	Centre d'une phase	Deux phases	Trois phases
-250	22	12	12
-125	21	17	16
0	21	21	21
125	20	28	25
250	23	35	34

La DFM a atteint sa valeur minimale de 12 μT lorsque la hauteur de la phase triphasée a été abaissée à une hauteur de -125 mm dans les cas des phases à deux et trois. En revanche, la DFM était de 35 μT lorsque la hauteur de la phase était de 250 mm. Les valeurs d'intensité du champ magnétique n'ont pas été significativement affectées par la variation de la position de la phase centrale unique. Cela est dû au fait que le champ magnétique significatif est généré par les deux autres phases, qui sont très proches et inférieures aux phases extérieures. La variation de la distance dans les deux directions (hauteur et horizontale) pourrait potentiellement réduire et atténuer les émissions électromagnétiques comme une solution classique.

IV.3.3.4. Conditions anormales dans les câbles souterrains (Défaut)

Il existe quatre caractéristiques principales de défaut : la position (distance), le type (fréquence et forme), l'angle de début (déphasage) et la résistance (linéaire ou non-linéaire). Dans le cas des câbles de puissance souterrains XLPE de 220 kV, trois suppositions ont été choisies pour les défauts : 1- monophasé, 2-biphasé et 3-triphasé. Dans la phase défectueuse, le courant est plus élevé par rapport à la phase saine. Les défauts sont simulés avec un courant de 4 kA et une fréquence de 40 Hz.

Tableau IV.9. Défaut avec surintensité dans trois phases

Position des défauts	Phase unique	Deux phases	Trois phases
Près des câbles	0.0036	0.004	0.0054
À 1 mètre des câbles (T)	12e-5	13.5 e-5	15 e-5

La présence des défauts dans les câbles souterrains peut affecter significativement l'intensité et la forme d'onde du champ magnétique généré. Le Tableau IV.9 présente les variations du champ magnétique observées après l'introduction de différents types de défauts dans les trois phases. Lorsque les trois phases sont en défaut, la densité de flux magnétique maximale augmente à différentes positions (atteignant jusqu'à 5,4 mT).

IV.3.3.5. Court-circuit établie au câble HTB 220 kV

Un court-circuit peut être identifié par la forme d'onde du courant, qui présente des amplitudes et des fréquences variables en fonction du type de défaut, tel que les court-circuit entre phases ou entre phase/terre. Chaque fois qu'un court-circuit se produit à un point le long du câble, des signaux de défaut circuleront à la fois à travers le conducteur central et la gaine métallique. Des études suggèrent que, en cas de CC, le courant de la phase affectée est généralement plus élevé par rapport aux deux phases saines. Par exemple, dans cet article, nous proposons une plage d'amplitude de 40 kA à 90 kA à une fréquence de 40 Hz pour les courts-circuits.

Tableau IV.10. Câbles souterrains 220 kV sous court-circuit

I (kA) 40 Hz	40	60	80	90
B (T) Près des câbles	0.068	0.08	0.14	0.16
À 1 mètre des câbles (T)	28e-4	30e-4	60e-4	65e-4

L'amplitude du champ magnétique dépend clairement de l'ampleur du courant de défaut. Comme le montre le Tableau IV.10, le champ magnétique atteint 0,16 T et 6,5 mT à des distances de près et de 1 mètre du niveau du câble, respectivement.

IV.4. Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons employé le logiciel COMSOL Multiphasiques 4.3 pour modéliser l'intensité et la répartition du champ électromagnétique généré par les câbles de transport d'énergie souterrains à une fréquence de 50 Hz. La simulation a été réalisée en deux configurations : en mode souterrain et à la sortie des caniveaux (souterrain et aérien), à différentes distances. La présence de défauts ou les variations de charge ont une influence directe sur l'intensité et la distribution du champ autour et à proximité des lignes souterraines.

Par exemple, nous avons observé que la relation entre la valeur du champ magnétique et l'intensité du courant dans le cas d'un court-circuit (CC) est la suivante : la valeur du champ magnétique et l'intensité du courant dans un état sain sont environ 112 fois supérieures, soit 0,89%.

En conclusion, la comparaison entre les résultats expérimentaux et ceux de la simulation est très étroite et similaire. La présence de défauts rend la DFM (Distribution du Champ Magnétique) supérieure aux normes internationales.

Conclusion Générale

Ce travail présente une évaluation de la pollution magnétique résultant des câbles électriques souterrains fonctionnant à 400 kV et 220 kV avec une isolation en XLPE triphasée. L'étude utilise un modèle mathématique et recourt à des simulations numériques à travers l'analyse par éléments finis pour examiner les caractéristiques du câble électrique souterrain.

Les résultats des simulations mettent en évidence l'effet de la charge, de la distance, de la position, de la fréquence et du type de défauts sur la distribution et les intensités du flux magnétique, tant dans des conditions normales qu'anormales. Les intensités et la distribution du champ magnétique sont calculées et analysées le long d'une distance autour du centre du câble à différents niveaux d'élévation par rapport à la surface du sol. De plus, plusieurs scénarios de défaut proposés sont simulés afin de mettre en évidence leur influence sur la variation et l'amplitude du champ magnétique.

Les simulations comprennent différents agencements des câbles triphasés dans des orientations horizontales et verticales. Ces agencements visent à mettre en évidence la distance et la largeur entre les phases dans le couplage de champ magnétique le plus fort. Après l'application de la solution de distance, une comparaison des niveaux d'émission magnétique avant et après révèle une diminution significative de la densité de flux magnétique. Plus précisément, il y a une réduction d'environ 30% dans l'axe horizontal et de 43% dans l'axe vertical.

Enfin, à travers une simulation numérique, l'efficacité de l'éloignement est concluante en tant que solution technique efficace pour atténuer les intensités et la distribution des champs magnétiques. Les résultats de simulation ont été validés par comparaison avec les mesures expérimentales, démontrant un accord significatif.

Dans l'ensemble, les résultats de simulation proposés peuvent être utilisés pour la surveillance et la détection basées sur les paramètres magnétiques afin d'évaluer la pollution et de protéger l'environnement.

En perspective, les travaux futurs se concentrent sur la recherche d'un modèle numérique pour un câble électrique sous-marin à trois conducteurs aussi une simulation 3D de câbles électriques, il a également prévu l'étude des défauts techniques et du vieillissement des câbles électriques en plus, étude de l'arbre électrique au niveau de l'isolation du câble de puissance.

Référence

- [1] Lebas, P. (2008). Diagnostic des câbles souterrains par détection de décharges partielles (Thèse, Université de Liège).
- [2] Salam, M. A. (2020). Fundamentals of Electrical Power Systems Analysis. Singapore: Springer.
- [3] Rezzag Bara, I., & Layat, B. (2019). Amélioration du profil de tension d'un réseau électrique par l'insertion optimale de source de production (Application sur le réseau de distribution de N'goussa) (Mémoire de master, Université de Ouargla, Algérie).
- [4] Akroune Moussa, R. (1989). Calcul et analyse de régime permanent des lignes aériennes de transport d'énergie électrique de grande longueur de très haute tension (Thèse, Université Annaba, Algérie).
- [5] Meziant, R., & Sahli, S. (2017). Calcul du champ électromagnétique généré par les réseaux électriques en vue de la compatibilité électromagnétique (Thèse, Université Bejaia, Algérie).
- [6] Electricité de France (EDF). (n.d.). Le réseau de transport. Récupéré sur <https://www.edf.fr/groupe-edf/espaces-dedies/l-energie-de-a-a-z/tout-sur-l-energie/lacheminement-de-l-electricite/le-reseau-de-transport>
- [7] Rezzag Bara, I., & Ayad, A. N. E. I. (2022, March 05-06). Simulation of magnetic field pollution around in the human body in proximity of power lines. 1st International Symposium on Industrial Engineering, Maintenance and Safety, Oran, Algérie.
- [8] Les Échos. (2018, January). Une ligne souterraine pour sécuriser le réseau électrique breton. Récupéré sur <https://www.lesechos.fr/2018/01/une-ligne-souterraine-pour-securiser-le-reseau-electrique-breton-965949>
- [9] Subsea Cable. (2021). Récupéré sur <https://www.transitionsenergies.com/wp-content/uploads/2021/10/subsea-cable-952x500.jpg>
- [10] Nasar, S. A., & Trutt, F. C. (1999). Electric Power Systems (Livre).
- [11] Bergius, O. (2012). Implementation of on-line Partial Discharge Measurements in Medium voltage cable network (Thèse, Tampere University of Technology, Finlande).
- [12] Choo, C. T. (2010). Space charge determination in HVDC power cable and its influence on electric field (Doctoral dissertation, University of Southampton).
- [13] Gill, P. (2016). Electrical power equipment maintenance and testing (Livre).
- [14] Worzyk, T. (2009). Submarine power cables: design, installation, repair, environmental aspects. Springer Science & Business Media (Livre).
- [15] Rezzag Bara, I., Krika, W., Ayad, A. N. E. I., Benyekhlef, L., & Boudjella, H. (2022, Juin 20-22). Assessment of magnetic field pollution created by submarine power cable on fish. The

Référence

International Conference on Materials for Environment, Energy and Bioresource Application (ICM2EBA 2022), Trois Riviers, Canada.

[16] Ostergaard, J., Tonnesen, O., Kaas-Pedersen, J., Nielsen, A. H., & Traeholt, C. (2002). A new concept for superconducting dc transmission from a wind farm. *Physica C: Superconductivity*.

[17] Thue, W. A. (2011). *Electrical power cable engineering* (Livre).

[18] Peschke, E., & Von Olshausen, R. (1999). *Cable systems for high and extra-high voltage*. Publicis MCD Werbeagentur GmbH.

[19] De Kock, J., & Strauss, C. (2004). *Practical power distribution for industry*. Elsevier.

[20] Gonen, T. (1988). *Electric Power Transmission System Engineering* (Livre).

[21] Demay, J. C., & Bobo, J. C. (1976). *Câbles haute tension, Matériaux pour câbles haute tension à isolation polyéthylène ou polyéthylène réticulé chimiquement*. *Revue générale d'électricité*.

[21] Ouddane, Abdellatif, & Kherroubi, Oussama. (2023). *Étude de la pollution magnétique générée par les câbles de puissance* (Mémoire, Université de Ouargla, Algérie).

[22] Zellagui, M. (2018). *Câbles souterrains MT et BT (PINC-SDE Promotion 2, Institut de Formation de l'Electricité et du Gaz Centre de Formation Ain M'lila, Algérie.)*.

[23] Zellagui, M. (2010). *Étude des protections des Réseaux électrique MT (30 et 10 KV)* (Mémoire de magistère, Université Mentouri Constantine, Algérie).

[24] Chouairi, A., et al. (2015). *Analyse de l'endommagement et prédiction de la durée de vie des câbles électriques dans les réseaux de distribution aériens basse tension : Application aux conducteurs en cuivre et aux câbles en aluminium torsadé*. 22ème Congrès Français de Mécanique, Lyon.

[25] Herouini, K., & Benalia, O. (2021). *Thermal effects in underground power cable* (Thèse, Université de Ouargla, Algérie).

[26] Brugg Cables. (s.d.). *XKDT-YT Tripolaire MT Isolation Polymère*. (Cahier technique)

[27] Helinc Cables S.A. (s.d.). *Câble basse tension* (Catalogue).

[28] Leoni Studer AG. (2008). *Câbles d'énergie et Accessoires* (Cahier technique).

[29] Nexans France. (2004). *Les câbles souterrains HT* (Cahier technique).

[30] Ayad, A. N. E. I., Krika, W., Boudjella, H., Benhamida, F., & Horch, A. (2019). *Simulation of the electromagnetic field in the vicinity of the overhead power transmission line*. *European Journal of Electrical Engineering*.

[31] De Lichtervelde, F. *Les champs électromagnétiques dans les réseaux de distribution* (Article, Gestionnaire du Réseau de Transport Belge, Bruxelles).

Référence

- [32] Follenfant, P. (2010, Août). La maîtrise de l'urbanisme autour des lignes de transport d'électricité (Rapport, Conseil Général de l'Industrie de l'énergie et des Technologies).
- [33] Scribd. Paramètres Lignes Électriques (Cahier technique).
- [34] Elia Group. (2015, Février). Les champs électromagnétiques et le réseau à haute tension (Rapport, Elia, Département Communication).
- [35] Ministère des Solidarités et de la Santé. Champs électromagnétiques extrêmement basse fréquence (Document). Récupéré sur https://sante.gouv.fr/IMG/pdf/Champs_electromagnetiques_extremement_basse_frequence_DGS_2014.pdf
- [36] Mishra, S., Roy, S., Routray, A., Swain, S. C., & Sadhu, P. K. (2023). Enhanced fault classification in underground cable systems: a three-step framework utilizing evolutionary optimization for signal tracking and parameter estimation. *Microsystem Technologies*, 1-16.
- [37] Berrabah, N. (2017, Novembre 08). Problèmes inverses pour le diagnostic de câbles électriques à partir de mesures de réflectométrie (Thèse, Lab Paris-Saclay).
- [38] Ayad, A. N. E. I., Boudjella, H., Krika, W., Rezzag Bara, I., & Larouci, B. (2024). Simulation of Electrical Trees Grow in Three-Core Submarine Cable. *Przeglad Elektrotechniczny*, 2024(2).
- [39] Ayad, A. N. E. I. (2009). Étude et modélisation d'un capteur à Courant de Foucault pour le contrôle non destructif (Mémoire ingéniorat, Université de Sidi Bel Abbes, Algérie).
- [40] Naceur, S. (2007). Contribution à la modélisation numérique d'une pompe MHD en tenant compte de la nature des matériaux des électrodes et du fluide (Mémoire, Université de Batna, Algérie).
- [41] Delimi, R. (2008). Méthodes comparées pour le calcul des forces d'origine électromagnétique : application aux paliers magnétiques (Mémoire, Université Mentouri Constantine, Algérie).
- [42] Farid, H. (2013). Association de la commande pour l'étude par éléments finis des phénomènes magnéto élastiques et vibratoires dans les systèmes électrotechniques (Thèse, Université Mouloud Mammeri, Tizi-Ouzou, Algérie).
- [43] Bécherrawy, T. (2012). Electromagnétisme: Equations de Maxwell, propagation et émission. Lavoisier (Livre).
- [44] Karady, G. G., & Holbert, K. E. (2013). Electrical energy conversion and transport: an interactive computer-based approach. John Wiley & Sons (Livre).
- [45] Abdallah, K., & Merouane, B. (2021/2022). Analyse électromagnétique et thermique de câbles souterrains (Mémoire, Université Mohamed El-Bachir El-Ibrahimi, Bordj Bou Arreridj, Algérie).

Référence

- [46] Laidaoui, R. (2016/2017). Modélisation et simulation d'un processus à changement de phase Liquide – Solide (Mémoire, Université BaDji Mokhtar – Annaba, Algérie).
- [47] Ben Hamouda, M. (2015, Mars). Étude, conception et modélisation de la diffusion de la chaleur dans les tissus biologiques (Mémoire, Université du Québec).
- [48] Amina, H. S. (2013, Janvier). Contribution à l'étude du modèle développé d'un isolateur pollué (Mémoire, Université d'Oran, Algérie).
- [49] Kara, A. (2013, Décembre). Contribution à l'étude d'un modèle dynamique de contournement d'un isolateur pollué (Mémoire, Université de Sétif, Algérie).
- [50] Saleem, S. A., Mihoub, M., Al Hatmi, H. A., & Al Zarouni, M. I. (2024). Assessment of extremely low frequency electric and magnetic field of 400kV transmission lines and substations in Oman. International Conference on Renewable Energy, Green Computing and Sustainable Development (ICREGCSD 2023).
- [51] Seong, M., Kim, D. H., & Kim, S. C. (2021). Analysis of electric and magnetic fields distribution and safe work zone of 154 kV power line in underground power cable tunnel. Safety Science, 133, 105020. <https://doi.org/10.1016/j.ssci.2020.105020>
- [52] Younsi, M. O. (2014). Analyse, diagnostic et optimisation énergétiques d'un parc de machines électriques sur site industriel (Thèse, Université Lille Nord de France).
- [53] Lyu, Z., Liang, Z., Yao, H., Zhang, Y., & Wei, W. (2023). Condition Assessment of XLPE Cable Insulation Based on Improved Fractional Zener Model. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation.
- [54] PHYWE Systeme GmbH, Teslameter, digital 13610-01 et 13610-02 (Cahier technique)
- [55] Rezzag Bara, I., & Krika, W. (2024). Study and measurement of magnetic emission generated by underground 400kV power cables. Przegląd Elektrotechniczny, 2024
- [56] Rezzag Bara, I., Ayad, A. N. E. I., Krika, W., Fezazi, O., & Larouci, B. (2024). Magnetic pollution produced by underground XLPE 220 kV power cable in power plant. Diagnostyka, 25.

خلاصة.

هذا العمل يركز على تقييم وتوقع التلوث الكهرومغناطيسي الناتج عن الكابلات الكهربائية التحت ارضية، مثل كابلات (إكسيلان بولي إيثيلين) 400 كيلو فولت و 220 كيلو فولت، باستخدام المحاكاة التحليلية العددية (تحليل العناصر المحدودة) والقياس التجريبي. يهدف العمل إلى تقليل الانبعاثات المغناطيسية من خلال ضبط المسافات الأفقية والرأسية للكابلات، مما يعتبر حلاً تقنياً. بالإضافة إلى ذلك، قامت الدراسة بتحقيق تأثير الأخطاء ذات المقدار والتردد المتغيرين، مع مراعاة أحمال وظروف مختلفة. تشير نتائج المحاكاة إلى أن عدة عوامل تساهم في تصاعد التلوث المغناطيسي. تشمل هذه العوامل الاقتراب الكبير بين الكابلات والأخطاء وكثافات التيار العالية... الخ ومع ذلك، مع زيادة المسافة بين الكابلات سواء أفقياً أم رأسياً، ينخفض تأثير الحقل المغناطيسي، مما يؤدي إلى تقليل التلوث المغناطيسي. تم إجراء مقارنة لتقييم الانبعاثات المغناطيسية للكابل التحت ارضية، مما أظهر تشابهاً ملحوظاً بين القيم المقاسة والمحسوبة. في النهاية، يعتبر النموذج المحاكي المعتمد أداة قيمة لتقييم وتوقع وتخفيف التلوث الكهرومغناطيسي في ظروف ومواقف أخطاء مختلفة.

الكلمات المفتاحية: الكابلات، المجال المغناطيسي، التلوث الكهرومغناطيسي، الطاقة، تحت الأرض.

Résumé.

Ce travail se concentre sur l'évaluation et la prédiction de la pollution électromagnétique générée par les câbles électriques souterrains, tels que XPLE 400 kV et 220 kV, en utilisant une approche analytique, une simulation numérique (l'analyse par éléments finis) et des mesures expérimentales. L'objectif du travail est de minimiser les émissions magnétiques en ajustant les distances horizontales et verticales (x, y) des câbles, agissant ainsi comme une solution technique. De plus, l'étude a examiné l'impact des défauts de différentes magnitudes et fréquences, en tenant compte de différentes charges et conditions. Les résultats de la simulation indiquent que plusieurs facteurs contribuent à l'escalade de la pollution magnétique. Ces facteurs comprennent une proximité étroite entre les câbles, les défauts et les intensités de courant élevées... Cependant, à mesure que la distance entre les câbles augmente à la fois horizontalement et verticalement, la force du champ magnétique diminue, entraînant une réduction de la pollution magnétique. Une comparaison a été réalisée pour évaluer les émissions magnétiques du câble souterrain, révélant une similitude notable entre les valeurs mesurées et calculées. En fin de compte, le modèle de simulation validé constitue un outil précieux pour évaluer, prédire et atténuer la pollution électromagnétique dans différentes conditions et positions de défaut.

Mots clés : Câbles, Champ Magnétique, Pollution électromagnétique, Énergie, Souterrain.

Abstract.

This work focuses on the evaluation and prediction of electromagnetic pollution generated by underground power cables, such as XPLE 400 kV and 220 kV, using analytical, numerical simulation (the finite element analysis), and experimental measurement. The work aim is to minimize the magnetic emissions through the adjustment of the horizontal and vertical distances (x, y) of cables, serving as a technical solution. Additionally, the study investigated the impact of faults with varying magnitude and frequency, considering different loads and conditions. The simulation results indicate that several factors contribute to the escalation of magnetic pollution. These factors include a close proximity between cables, faults, and high current intensities.... However, as the distance between cables increases both horizontally and vertically, the strength of the magnetic field decreases, leading to a reduction in magnetic pollution. A comparison was carried out to assess the magnetic emissions of the underground cable, revealing a notable resemblance between the measured and calculated values. Ultimately, the validated simulation model serves as a valuable tool for evaluating, predicting, and mitigating electromagnetic pollution under different fault conditions and positions.

Keywords: Cables, Magnetic Field, Electromagnetic pollution, Power, Underground.