

UNIVERSITÉ KASDI MERBAH OUARGLA

Faculté des sciences appliquées

Département de Génie de Génie Electrique



Mémoire

MASTER ACADEMIQUE

Domaine : Sciences et technologies

Filière : Génie électrique

Spécialité : Electrotechnique industriel

Présenté Par :

Ouddane Abdellatif

Kherroubi Oussama

Thème :

**Etude de la pollution magnétique générée par les
câble de puissance**

Soutenu publiquement

Le14 /06/2023

Devant le jury :

Mr Khelifa Moussa	MCB	Président	UKM Ouargla
Mr Ayad Ahmed Nour El Islam	MCA	Encadreur/rapporteur	UKM Ouargla
Mr Rouibah Tahar	MCB	Examineur	UKM Ouargla
Mr Rezzag Ilyes Bara		Co-encadreur	UKM Ouargla

Année universitaire 2022/2023

Dédicaces

Nous dédions ce modeste travail

Pour nos pères et mères en général

Pour nos frères et nos sœurs

Pour tout les membres de nos familles

Pour nos très chers amis

A tous les étudiants de électrotechniques

A tous les enseignants du département d'électrotechnique

A tous les travailleurs de l'université kasdi merbah ouargla

Abdellatif et Oussama

Remerciement

D'abord, nous remercions **ALLAH** le tout puissant qui nous éclairé nos chemins et qui nous a donné la force pour accomplir ce travail.

Nous tenons à remercier vivement **Mr. AYAD AHMED NOUR EL ISLAM** et **Mr. REZZAG BAARA ILYES** notre encadreur qui a fourni des efforts énormes, par ses informations ses conseils et ses encouragements, sa disponibilité, et sa qualité humaine.

Nous remercions affectueusement, le comité de jury d'avoir accepté l'évaluation de la qualité de ce mémoire.

Nous remercions aussi tous mes enseignants de l'université **KASDI MERBAH OUARGLA** , pour tous les efforts déployés et pour les informations et la formation.

Nous remercions tous les collègues de la promotion 2018.

Sommaire

Liste des figures

Liste des Tableaux

Introduction Générale.....1

Chapitre I : Généralité sur les câbles électriques souterrains

I. Introduction.....4

I.2 Généralité sur les réseaux électriques4

I.3.Lignes de transports.....5

I.3.1.Les Lignes aériens.....6

I.3.2Les lignes souterrains.....6

I.3.3.les lignes sous-marins7

I.4.Structure d'un câble à isolation synthétique.....8

I.4.1. Ame conductrice..... 8

I.4.1.1.Caractéristiques électriques.....8

I.4.1.2.Formes de l'âme conductrice.....10

I.4.1.3.Supraconducteurs.....11

I.4.2.Ecran semi-conducteur..... 11

I.4.3. Blindage métallique..... .11

I.4.4.Gaine de protection.....12

I.4.5.Isolation.....12

I.5.les câbles électriques aériennes13

I.6.Les câbles électriques souterrains.....14

I.6.1.Les câbles souterrains THT.....14

I.6.2.Les câbles Souterrains HT.....15

I.6.3.L'Utilisation de câbles souterrains.....18

I.7.Méthodes de pose.....19

I.8.Conclusion19

Chapitre II: Modèle électromagnétique et simulation des câbles électriques

II.1. Introduction.....21

II.2. Les champs électriques et champs magnétiques:21

II.2.1 Effets des champs magnétiques21

II.2.2 Effets des champs électriques	21
II.3. Phénomènes d'induction électromagnétiques dans les câbles souterrains.....	22
II.3.1. Résistance ohmique - Effets pelliculaires et de proximité.....	22
II.3.2. Courants induits dans écran métallique (gaine, enveloppe de plomb) - Pertes d'énergie.....	22
II.3.3. Pertes d'énergie des câbles souterrains.....	22
II.4. Les champs magnétiques au-dessus d'un câble souterrain:	23
II.4.1. Les effets à court terme.....	24
II.4.2. Les effets à long terme	24
II.5. Calcul du champ électromagnétique.....	24
II.5.1. Equations de Maxwell.....	24
II.6. Modèles électromagnétiques	27
II.6.1. Modèle magnétostatique.....	28
II.6.1.1. Modèle magnétostatique vectorielle.	28
II.7. Déclaration des conditions aux limites	29
II.8. Les techniques de résolutions des équations aux dérivées partielles.....	30
II.8.1. Méthode des Eléments Finis (MEF) :.....	30
II.9. Implémentation du modèle dans le logiciel COMSOL.....	32
II.9.1. Processus de simulation par le logiciel COMSOL	32
II.9.2. Structure du programme	33
II.10. Conclusion	35
Conclusion Générale.....	36
Références.	

Liste des figures

Chapitre I Généralité sur les câbles électrique

Figure I.1 : Schéma simplifié d'un système électrique global et de ses sous-systèmes.....	05
Figure I.2 : lignes des transports.....	06
Figure I.3 : les lignes souterraines	07

Figure I.4 : les lignes sous-marins	07
Figure I.5 : Câble d'énergie HT	08
Figure I.6 : Influence de la température ambiante sur le courant nominal.....	10
Figure I.7 : Différentes structures de l'âme conductrice	10
Figure I.8 : Constitution d'un câble souterrain isolé au polyéthylène.....	14
Figure I.9 : Coupe en 2D des câbles THT pour réseaux souterrains.....	15
Figure I.10 : câbles à conducteur compacts et segmentaires.....	16
Figure I.11 : différentes configuration géométriques pour le souterrain triphasé.....	19

Chapitre II : Modèle électromagnétique et simulation des câbles électriques

Figure II.1 : coupe d'une terre contient une ligne souterrain.....	23
Figure II.2 : Interface entre deux milieux différents	26
Figure II.3 : Discrétisation du domaine d'étude (maillage).....	31
Figure II.4 : Présentation du logiciel COMSOL Multiphasiques.....	33
Figure II.5 : Différents blocs du programme.....	33

Liste des tableaux

Tableau I.1 : matériaux conducteurs utilisés pour les câbles de transmission de puissance...09	09
Tableau I.2 : résistivité spécifique et son coefficient de température.....	09
Tableau I.3 : propriétés des isolants.....	13
Tableau I.4 : propriétés thermiques des isolants	13
Tableau II.1 : Champ magnétique d'une ligne souterraine.....	23

Introduction Générale

Introduction Général

Les lignes de transmission sont un lien vital dans le réseau électrique pour la transmission de d'énergie, soit en lignes souterrains ou des lignes aérienne. La présence des perturbations et des défauts dans les lignes électriques génèrent un champ électromagnétique très important dans la zone proche des lignes électriques, il peut causer des interférences électromagnétiques avec d'autres objets proches des lignes. Les phénomènes transitoires issus des lignes ; court-circuit, les harmonique, les opérations de manœuvres se propage d'une partie du système d'alimentation à une autre au travers des conducteurs [1].

Les propriétés électromagnétiques des lignes électriques sont classées en termes de modélisation selon plusieurs critères dont les plus importants sont : leurs caractéristiques (isolation, conduction, forme, diamètre, etc.), la distance entre les câbles, la profondeur, les caractéristiques de l'atmosphère qui s'y trouve, de ses caractéristiques techniques et structurelles et de la fréquence des signaux [1].

L'objectif principal de notre étude est d'étudier le champ magnétique produit par les câbles électriques à très haute tension, où nous avons étudié ce champ magnétique dans les câbles électriques souterrains, qu'ils soient dans l'air ou dans sous terre , où notre étude s'est déroulée en deux étapes, la première elle était pratique, car nous avons fait des mesures à la station GRTE-HMD 400/220 kV à l'aide d'un appareil Tesla mètre , quant à la deuxième étape est simulation par la méthode des éléments finis (MEF) à l'aide du programme COMSOL, . Enfin, nous avons comparé les résultats du travail appliqué avec les résultats de la simulation.

Ce mémoire comporte quatre chapitres :

Le premier chapitre : Nous avons abordé les réseaux électriques, puis les lignes de transport d'énergie électrique, puis les câbles électriques (aériens, souterrains) en termes de leur classification, nature, installation, ingénierie, caractéristiques, avantages et inconvénients.

Le deuxième chapitre : est consacré à la description des notions fondamentales et les équations d'électromagnétisme ainsi que les méthodes numériques pour la modélisation et la simulation des caractéristiques électromagnétiques dans et autour des câbles et des lignes électriques souterrains.

Le troisième chapitre : Ce chapitre est un travail appliqué, où nous avons mesuré la température de câble par rapport la température ambiante à l'aide l'arduino et nous avons mesuré le champ magnétique dans le câble électrique 400 kV d'un tesla mètre, au niveau du câble et à une distance de 1 mètre et à une distance de 2 mètres à différents moments et des changements dans l'intensité du courant électrique.

Dans le quatrième chapitre : Dans ce chapitre, nous présentons en féaux ces résultats du câble électrique souterrain 400 kV dans cas aérien et souterrain, où nous avons mesuré le champ électromagnétique au niveau du câble et à une distance de 1 mètre et après 2 mètres à différentes valeurs d'intensité de courant, en plus nous avons calculé le champ en cas de court-circuit.après cela, nous avons comparé les résultats de la simulation avec les résultats appliqués.

Chapitre I

Généralités sur les câbles

électriques

I.1.Introduction :

Un réseau électrique est un ensemble d'infrastructures permettant d'acheminer l'énergie électrique des centres de production vers les consommateurs d'électricité. Il est constitué de lignes électriques exploitées à différents niveaux de tension, connectées entre elles dans des postes électriques. Les postes électriques permettent de répartir l'électricité et de la faire passer d'une tension à l'autre grâce aux transformateurs [2].

Les principaux modes de transport de l'énergie électrique sont la transmission aérienne, souterraine et sous-marine. La transmission aérienne utilise fils alors que le souterraine utilise des câbles. Les lignes de transmission souterraines sont un moyen de transport d'énergie courant aux niveaux de tension moyenne et haute, en raison de la demande énergétique plus élevée. Les câbles souterrains ont été largement appliqués dans les réseaux électriques en raison de leur plus grande sécurité par mauvais temps (orages ou foudre), de leur coût moindre pour une distance plus courte et de leur maintenance réduite [2].

I.2.Généralité sur les réseaux électriques :

Un système électrique se compose de trois parties de base : la production, le réseau et les consommateurs (charges). Les sources de production d'énergie électrique, particulièrement les centrales nucléaires ou hydrauliques, sont généralement éloignées des centres de consommation. L'énergie électrique est acheminée à distance par des liaisons électriques à grand flux qui remplissent une fonction de transport d'énergie.

Pour le réseau, on distingue deux parties : la transmission et les systèmes de distribution. Ces systèmes diffèrent selon leurs topologies, leurs niveaux de tension, leurs tailles, leurs opérations, leurs objectifs, etc. (Figure .I.1) [2].

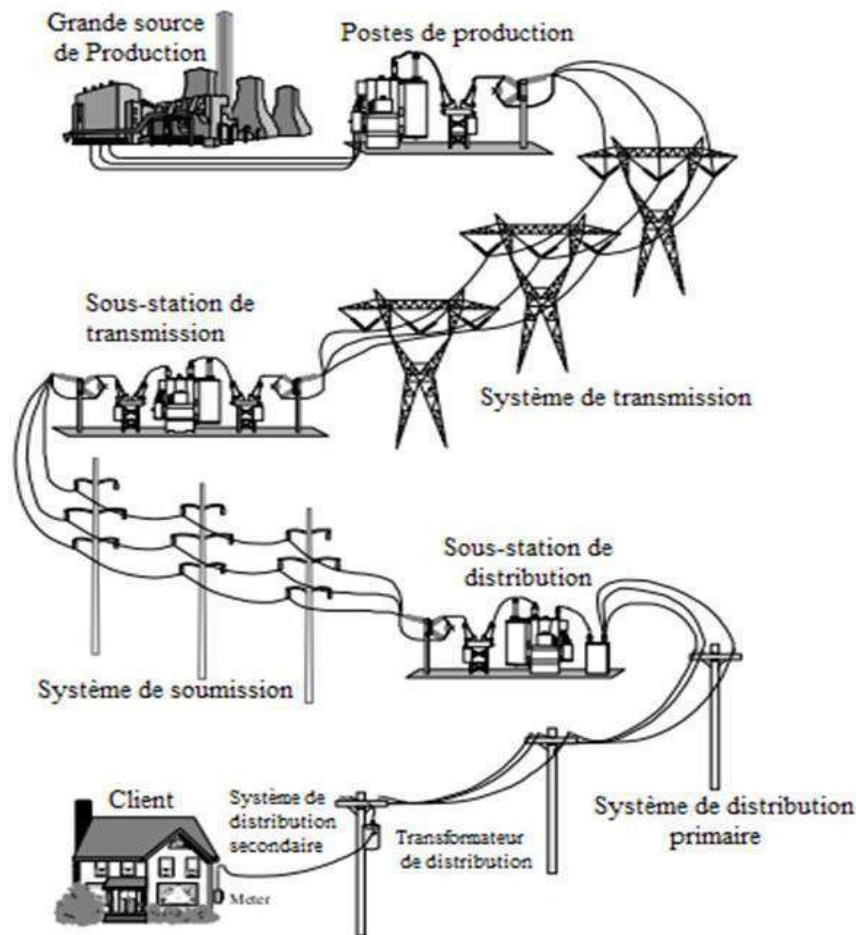


Figure I.1: Schéma simplifié d'un système électrique global et de ses sous-systèmes [2].

I.3.Lignes des transports :

Depuis 1994 la plupart des compagnies d'électricité ont pris la décision de ne plus établir de nouvelles liaisons aériennes en deçà de 150 kV. A terme donc tout le réseau de distribution et progressivement celui de répartition se fera en câbles souterrains. L'utilisation de câbles en plus haute tension (même s'il existe quelques cas à 220 kV, 400 kV et 500 kV) est confrontée à des problèmes technologiques significatifs (surtout les jonctions) ainsi qu'à un coût très élevé (si le coût en basse tension est similaire, voire inférieur pour une liaison souterraine, il devient jusqu'à environ 20 fois plus élevé à 400 KV par rapport à une liaison aérienne). En 2006, l'ordre de grandeur du coût d'une liaison aérienne 400KV de 1 millions de €/km.

Une ligne électrique est un ensemble de conducteurs, d'éléments accessoires destinés au transport de l'énergie électrique. Les conducteurs sont en générale en aluminium, ou cuivre [3].

Les isolants ont une partie solide (porcelaine, verre, papier en matière composites) combinée avec un gaz (air, SF₆), ou un liquide (huile). Les lignes électriques peuvent être classées selon plusieurs critères :

- **Situation dans l'espace** : lignes aériennes, lignes souterraines (câbles) ... etc.
- **Classe de tension** : ligne a base tension, à moyenne tension, et à haute tension.
- **Nature de la tension** : continue, alternative, monophasée ou triphasés.

On peut distinguer deux principaux types des lignes électriques : les lignes aériennes et les lignes souterraines [4].

I.3.1. Les Lignes aériens :

Une ligne aérienne est composée de conducteur nus, généralement en alliage d'aluminium suspendus au moyen de chaines d'isolateurs à des pylônes mis à la terre. Elle dispose également d'un ou plusieurs conducteurs supplémentaires appelés câbles de gardes connectés à la terre par chaque pylône, assurant principalement la protection contre la chute de la foudre sur les conducteurs de phase. Son rôle principal est de transporter l'énergie électriques de la source de production jusqu'à la zone de consommation (figure I.2).

Elle possède les caractéristiques suivantes :

- ✓ La tension reste constante sur toute la longueur de la ligne et pour toutes les charges comprises entre zéro est la charge nominale.
- ✓ Un bon rendement.
- ✓ Les pertes joules ne doivent pas surchauffer les conducteurs [4].



Figure I.2: lignes des transports [5].

I.3.2. Les lignes souterraines :

Il est composé de différentes parties assemblées de manière concentrique, les principales composants sont : au centre un conducteur permet de transporter l'électricité, ensuite vient une isolation électrique pour empêcher le courant de s'écouler vers la terre, le tout est entouré d'une gaine métallique afin de confiner le champ électrique à l'intérieur du câble et d'une

protection extérieure qui assure de bonnes propriétés mécaniques et le protège des agressions extérieures (figure I.3.) [6].



Figure I.3: les lignes souterraines [7].

I.3.3. Les lignes sous-marines :

Un câble électrique sous-marin est un câble de transmission pour transporter l'énergie électrique sous la surface de l'eau. Ceux-ci sont appelés "sous-marins" car ils transportent généralement de l'énergie électrique sous l'eau salée (bras océaniques, mers, détroits, etc.) mais il est également possible d'utiliser des câbles électriques sous l'eau douce (grands lacs et rivières). Il existe des exemples de ces derniers qui relient le continent à de grandes îles du fleuve Saint-Laurent.

Les câbles électriques sous-marins ont pour but le transport du courant électrique à haute tension. Le noyau électrique est un assemblage concentrique de conducteur interne, d'isolation électrique et de couches de protection (ressemblant à la conception d'un câble coaxial). voir la figure I.4 [8].

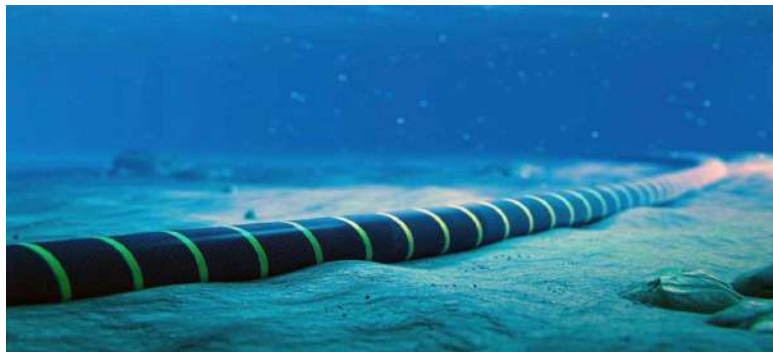
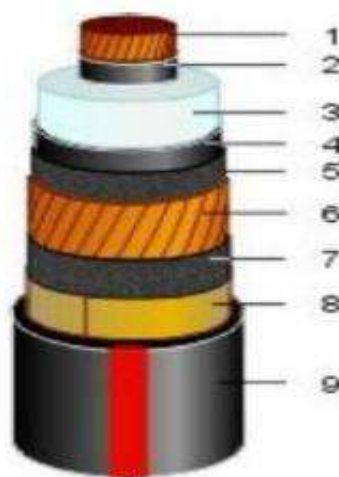


Figure I.4: les lignes sous-marines [9].

I.4. structure d'un câble à isolation synthétique :

La structure d'un câble d'énergie haute tension influe grandement sur son rendement. Les techniques de structure et de fabrication des câbles XLPE se sont grandement améliorées depuis les premiers câbles de production qui avaient de vastes problèmes avec les arborescences d'eau.

La figure (I.5) présente la structure d'un câble haute tension (HT) mono polaire à isolation XLPE et écran en cuivre méplats avec étanchéité radiale et longitudinale [10].



1. Conducteur en cuivre (ou aluminium).
2. Semi-conducteur intérieur
3. Isolation PE réticulée (XLPE)
4. Semi-conducteur extérieur
5. Ruban gonflant semi-conducteur
6. Ecran en fils de cuivre méplats
7. Ruban gonflant semi-conducteurs
8. Ruban Cu PE longitudinal, collé
9. Gaine PE extérieure

Niveaux de tension : 45 kV à 400 kV.
Section : de 240 mm² à 2000 mm²

Figure I.5: câble d'énergie HT.

Les principales caractéristiques qui figurent dans la construction des câbles HT sont le conducteur, l'isolant, la gaine métallique et l'enveloppe protectrice [11].

I.4.1 Ame conductrice :

L'âme conductrice ou tout simplement le conducteur est la partie principale d'un câble. Son objectif est de transmettre le courant nécessaire avec une faible perte d'énergie. Les deux matériaux largement utilisés sont le cuivre et l'aluminium [11].

I.4.1.1 Caractéristiques électriques :

Le tableau I.1 montre les propriétés électriques des métaux couramment utilisés dans les câbles. Prenant en considération le prix, le cuivre et l'aluminium sont clairement le meilleur choix pour les conducteurs, mais il y a eu une certaine expérience pratique avec le sodium [11].

Tableau I.1: matériaux conducteurs utilisés pour les câbles de transmission de puissance.

Matériaux	Avantage	Inconvénient
Aluminium	Peu couteux	Conductivité électrique Thermique est d'environ 60% que celle du cuivre.
Cuivre	Haute conductivité électrique et thermique	Couteux
Argent	Légèrement supérieur à celui du cuivre	Extrêmement couteux
Sodium	Extrêmement bon marché	Les questions de sécurité sur la manipulation et l'entretien. conductivité électrique et thermique médiocres

La résistivité spécifique et le coefficient de température du cuivre et de l'aluminium sont donnés dans le tableau I.2 [12].

Tableau I.2: résistivité spécifique et son coefficient de température

	Cuivre	Aluminium
R_{20} :résistivité électrique spécifique 20° C, Ω mm ² /m	0.01786	0.02874
α :coefficient thermique de la résistivité électrique spécifique 20°C,1/K	0.00392	0.0042

La température maximale du conducteur est déterminée par la température qu'il peut supporter pendant de longues périodes de temps sans dommages. La température maximale, peut être affectée par la capacité à dissiper, la chaleur et la température ambiante du milieu dans lequel le câble sera installé. Pour un fonctionnement en toute sécurité, la somme de la température ambiante et l'élévation de la température dans le système d'isolation ne doit pas dépasser la température totale admissible du conducteur. L'effet de la température est indiqué à la figure (I.6) La perte totale du câble en fonction de la résistance du conducteur à un degré inférieur à la température maximale permise [12].

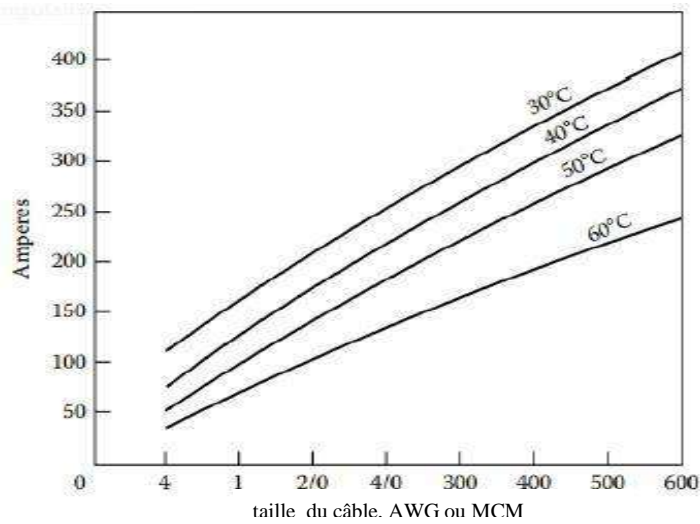


Figure I.6: Influence de la température ambiante sur le courant nominal [12].

I.4.1.2 Formes de l'âme conductrice :

Différents types de conception du conducteur peuvent être vus dans la figure I.7. Des conducteurs creux sont généralement utilisés afin de permettre la circulation de l'huile pour refroidir le conducteur. Tressé et Segmenté offrent plus de flexibilité et réduisent le courant de déplacement raison de l'effet de peau [13].

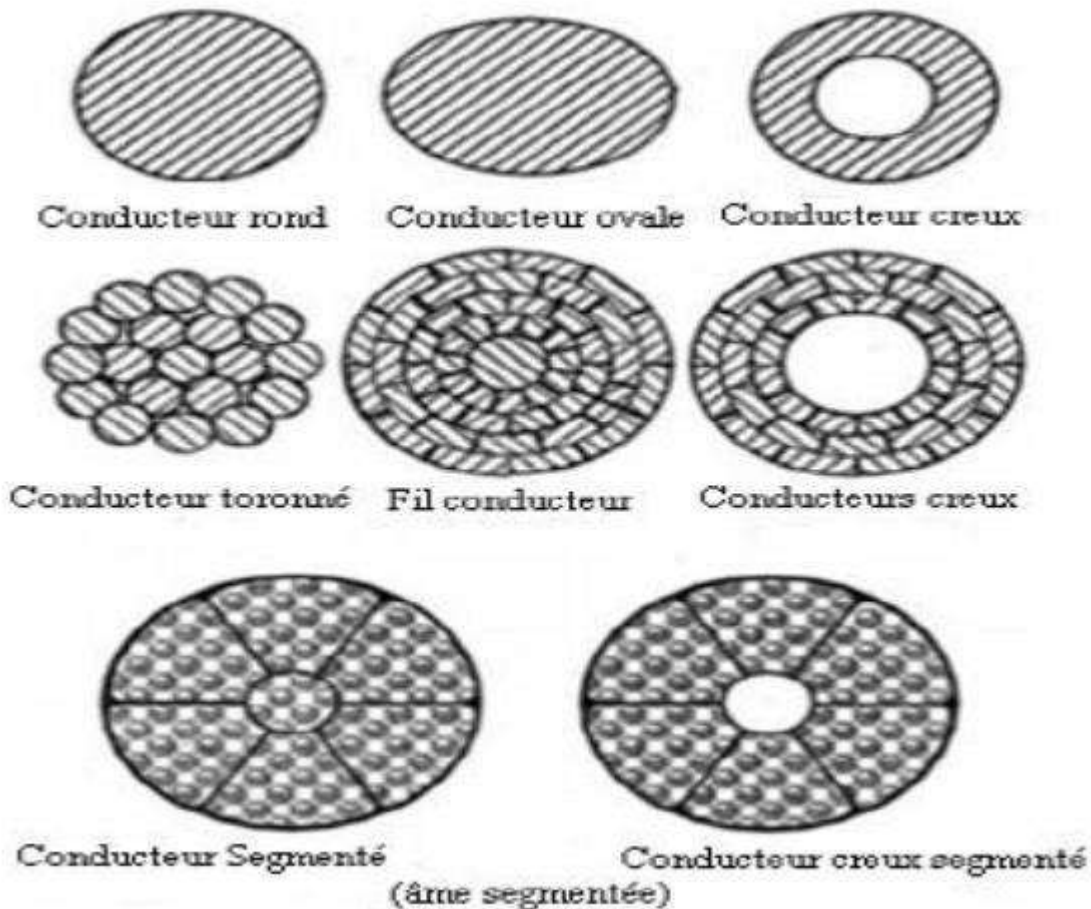


Figure I.7: Différentes structures de l'âme conductrice

I.4.1.3 Supraconducteurs :

Depuis la découverte de la supraconductivité à haute température, en 1986, un certain nombre de compositions d'oxyde ont été trouvées avec une température critique (T_c) de supraconductivité au-dessus de 77K, qui est la température la plus basse du nitrogène liquide [14].

Très vite, des échantillons de câbles supraconducteurs cryogéniques ont été conçus et produits par des laboratoires, mais le paramètre le plus compliqué à réaliser dans ce type de câble est l'isolation diélectrique. L'un des inconvénients majeurs : la puissance nécessaire pour le processus de refroidissement est seulement peu inférieure aux pertes enregistrées.

Concernant les performances par rapport au câble conventionnel, les pertes devaient être réduites de moitié en utilisant un câble de transport supraconducteur pour la même puissance transitée [15].

I.4.2. Ecran semi-conducteur :

Des couches semi-conductrices sont utilisées des deux côtés de l'isolation. La couche interne est appelée l'écran du conducteur et son but est de créer une surface en forme de cylindre lisse sur le dessus du conducteur. Ceci permet de fluidifier le champ électrique radial et d'éviter la formation de cavités entre le conducteur et l'isolant, ce qui conduirait à des décharges partielles qui pourraient endommager l'isolation. Le matériau semi-conducteur est habituellement basé sur le même matériau que l'isolant.

La couche externe est appelée écran d'isolation. Sa fonction est d'homogénéiser le champ électrique radial et de fournir un chemin sûr aux courants de fuite. L'écran d'isolation empêche également les décharges partielles au-dessus de l'isolant. Il est généralement fabriqué à partir du même matériau que l'écran conducteur [16].

Les écrans semi-conducteurs sont l'un des aspects les plus complexes dans la technologie du câble. L'atténuation des impulsions de décharges partielles hautes fréquences dans des câbles est due à la couche semi-conductrice. Ceci impose une limitation majeure de la longueur du câble qui peut être surveillée par un système de mesure de décharges partielles [16].

I.4.3. Blindage métallique :

Le blindage métallique est un facteur de sécurité important dans les câbles haute tension. En cas de dommage mécanique causé au câble, un commutateur rapide offre un accès à faible impédance au courant de défaut. Le courant de charge est produit par le condensateur formé entre le conducteur et le blindage métallique [16]. Le cuivre et l'aluminium sont des matériaux typiques pour le blindage métallique du fait de leur bonne conductibilité électrique

et de la résistance contre la corrosion, ils résistent ainsi mieux aux décharges partielles qui se propagent à travers le blindage métallique ce qui rend cette partie de câble particulièrement intéressante.

Cet écran métallique relié à la terre a une fonction comme un blindage électrique afin de produire un champ électrique libre autour du câble. De plus, cette composante a d'autres fonctions telles que [17]:

- Fournir un trajet de retour pour le courant de charge capacitive dans les conditions d'exploitation.
- Réalisation de mise à la terre qui permet d'écouler les courants de défaut jusqu'à ce que le système soit hors tension.
- Protection contre les contacts accidentels.
- Protection mécanique de l'isolant, ils servent comme armure.
- Rôle d'étanchéité : grâce à leur technologie (écran massif, écran rubané...), les écrans métalliques peuvent assurer l'étanchéité radiale du câble.

I.4.4. Gaine de protection :

Ce composant a pour fonction de protéger le câble d'éventuelles possibilités de dommages mécaniques et de la corrosion provoquée par l'eau. Le polyéthylène haute densité (HDPE) est couramment utilisé comme matériau pour cette gaine de protection car il offre une bonne protection mécanique et une excellente résistance à l'abrasion avec une faible pénétration de l'humidité [17].

I.4.5. Isolation :

L'isolation (diélectrique) est la partie la plus cruciale d'un câble puisqu'elle permet une séparation suffisante entre le conducteur et la masse électrique la plus proche afin d'empêcher la rupture diélectrique. Les matériaux d'isolation les plus couramment utilisés dans les câbles extrudés sont le polyéthylène réticulé (XLPE), le caoutchouc éthylène-propylène (EPR) et polyéthylène réticulé avec retardateur d'arborescence (TR-XLPE) [18].

Les câbles à isolation synthétique (PE ou XLPE) sont utilisés dans la gamme moyenne tension, tandis que les isolants en PVC ne sont utilisés que pour des tensions allant jusqu'à 5kV à cause du facteur de dissipation élevé. L'isolation XLPE est utilisée pour des tensions plus élevées (110 kV et plus). Les principaux paramètres électriques des matériaux d'isolations sont présentés dans le tableau I.3 :

Tableau I.3: propriétés des isolants [19].

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

L'isolation thermodurcissable comprend le PE réticulé (XLPE), le retardateur d'arborescence XLPE (WTR XLPE) aussi connu pour XLPE (TR XLPE) et le caoutchouc éthylène-propylène (EPR). Ce sont des isolants en usage populaire. Les principaux paramètres thermiques des matériaux d'isolation sont présentés dans le tableau I.4.

Tableau I.4: propriétés thermiques des isolants [20].

	Température de Fonctionnement	Température de court-circuit
LDPE	70°C	125°C
XLPE	90°C	250°C
EPR	90°C	250°C
Papier	$50-55^{\circ}\text{C}$	
Papier-huile	$85-90^{\circ}\text{C}$	

I.5.les câbles électriques aériennes :

Les conducteurs aériens à haute tension ne sont pas recouverts d'isolant. Le matériau conducteur est presque toujours un alliage d'aluminium, réalisé en plusieurs brins et éventuellement renforcé par des brins d'acier. Le cuivre était parfois utilisé pour la transmission aérienne, mais l'aluminium est plus léger, induit des performances légèrement réduites et coûte beaucoup moins cher.

Aujourd'hui, les tensions au niveau des réseaux de transport électrique sont généralement de 110 kV et plus. Les tensions inférieures, telles que 66 kV et 33 kV, sont généralement considérés comme des tensions de sous-transmission, mais sont parfois utilisées sur des lignes longues avec des charges légères. Les tensions inférieures à 33 kV sont généralement utilisées

pour la distribution. Les tensions supérieures à 765 kV sont considérées comme extra-haute tension et nécessitent des conceptions différentes par rapport aux équipements utilisés à des tensions inférieures.

Étant donné que les fils de transmission aériens dépendent de l'air pour l'isolation, la conception de ces lignes exige des distances minimales à respecter pour maintenir la sécurité. Des conditions météorologiques défavorables, comme des vents violents et des températures basses, peuvent entraîner des pannes de courant [21].

I.6.les câbles électriques souterrains :

Certes, les investissements liés à l'installation de nouveaux câbles sont parfois prohibitifs. Mais en contrepartie, leur impact environnemental et esthétique est bien moindre que celui des lignes aériennes. Dans cette optique, les câbles souterrains ont pris et prendront encore une ampleur certaine.

I.6.1.Les câbles souterrains THT :

Les câbles souterrains de très haute tension THT sont principalement employés pour le transport et la distribution de l'énergie électrique dans les zones fortement urbanisées (grandes villes (figure I.8.)), parfois pour résoudre des problèmes locaux particuliers, techniques ou d'environnement pour les quels la mise en œuvre de lignes aériennes difficile ou impossible [22].

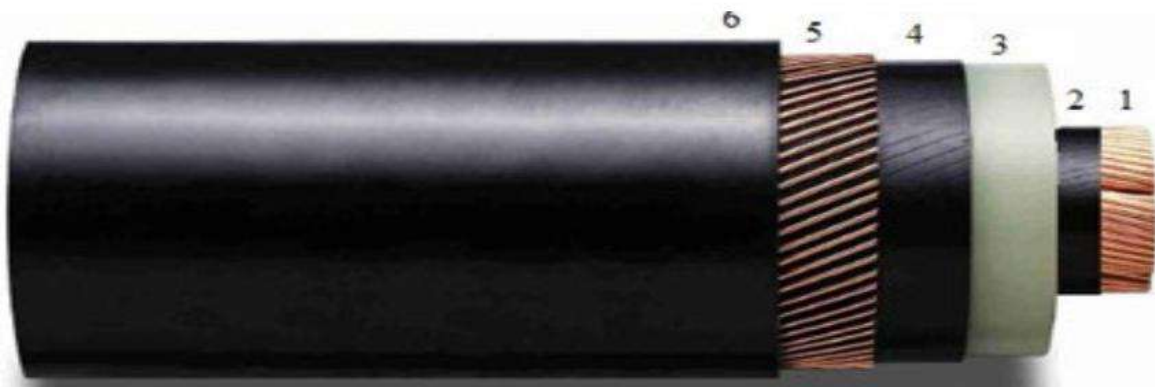


Figure I.8: Constitution d'un câble souterrain isolé au polyéthylène réticule.

Légende : (1) âme conductrice, (2) couche semi-conductrice interne, (3) isolant au polyéthylène réticulé, (4) couche semi-conductrice externe, (5) écran conducteur, (6) protection au PVC [4].

I.6.2. Les câbles Souterrains HT :

La structure du câble haute tension en polyéthylène synthétique réticulé implique toujours les termes suivants:

Conducteur rond compact composé de plusieurs couches de fils concentriques enroulés en spirale. Dans les conducteurs compacts à conducteurs ronds, en raison de la faible résistance des contacts électriques entre les fils, les effets de peau et de proximité sont pratiquement identiques à ceux d'un conducteur plein (figure I.9).

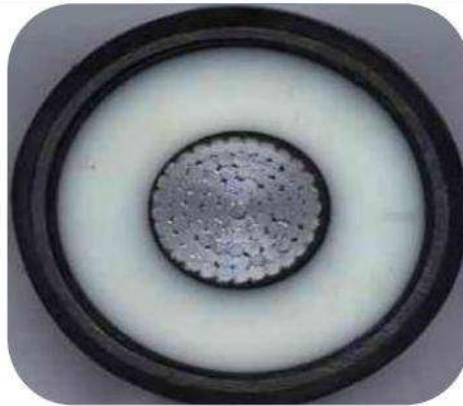


Figure I.9: Coupe en 2D de Câble de 225 KV d'un diamètre= 11cm pour réseaux souterrain [4].

Les conducteurs segmentaires : également appelés conducteurs "Milliken" (figure I.10.), sont composés de plusieurs conducteurs en forme de segment assemblés pour former un noyau cylindrique :

Le conducteur de grande section est divisé en plusieurs conducteurs en forme de segment. Il y a de 4 à 7 de ces conducteurs, appelés segments ou secteurs. Ils sont isolés les uns des autres au moyen de rubans semi-conducteurs ou isolants. La structure de type Milliken réduit les effets extrêmement défavorables de la peau et de proximité [23].



a- Conducteurs ronds compacts

b- Les conducteurs segmentaires

Figure I.10: câbles à conducteur compacts et segmentaires [23].

Écran semi-conducteur sur le conducteur :

Pour éviter la concentration de champ électrique, il existe une interface en XLPE ultra-lisse entre le conducteur et l'isolant.

Isolation XLPE :

Comme son nom l'indique, l'isolation isole le conducteur lorsqu'il travaille à haut tension de l'écran travaillant au potentiel de mise à la terre. L'isolation doit pouvoir résister au champ électrique dans des conditions de fonctionnement nominales et transitoires.

Écran semi-conducteur sur isolation :

Cette couche a la même fonction que l'écran conducteur: Passage progressif d'un milieu isolant, où le champ électrique est non nul, à un milieu conducteur, ici l'écran du câble métallique) dans lequel le champ électrique est nul.

Écran métallique :

Lorsque la tension atteint des dizaines voire des centaines de kV, un écran métallique est nécessaire. Sa fonction principale est d'annuler le champ électrique en dehors du câble. Il agit comme la deuxième électrode du condensateur formé par le câble [23].

L'utilisation d'un écran métallique implique:

- La nécessité de le connecter à la terre à au moins en un point du parcours.
- Drainage du courant capacitif qui passe à travers l'isolation.
- Drainage de la séquence zéro courants de court-circuit, ou une partie d'entre eux. Cette fonction est utilisée pour déterminer la taille de l'écran métallique.
- La circulation des courants induite par les champs magnétiques provenant d'autres câbles à proximité. Ces courants de circulation entraînent une perte d'énergie supplémentaire dans les câbles et doivent être pris en compte lors de l'évaluation de la capacité de transmission d'un système de câbles.
- La nécessité d'isoler électriquement l'écran métallique de la terre sur la plus grande partie de la longueur du câble Installé.
- La nécessité de protéger l'écran métallique contre la corrosion chimique ou électrochimique. La seconde fonction de l'écran métallique est de former une barrière radiale pour empêcher l'humidité de pénétrer dans le câble, en particulier son système isolant.
- Le système d'isolation synthétique ne doit pas être exposé à l'humidité. Lorsque l'humidité et un champ électrique puissant sont présents ensemble, l'isolation se détériore selon la procédure d'appel de l'eau, ce qui peut éventuellement entraîner une défaillance de l'isolation [24].

La gaine de protection anticorrosion :

La veste a une double fonction:

- Il isole l'écran métallique depuis la terre (en particulier pour les lignes avec des connexions d'écran spéciales).
- Il protège les composants métalliques de l'écran contre l'humidité et la corrosion [24].

Mise à la terre des écrans métalliques :

- Lorsqu'un courant alternatif traverse le conducteur d'un câble, une tension proportionnelle au courant d'induction, à la distance entre les phases et à la longueur de la ligne est générée sur l'écran métallique.
- L'extrémité non mise à la terre est soumise à une tension induite qui doit être contrôlée.

Dans des conditions de fonctionnement normales, cette tension peut atteindre plusieurs dizaines de volts. Certaines méthodes simples permettent d'éviter les risques d'électrocution. Dans le cas d'un courant de court-circuit de plusieurs kA, la tension d'induction proportionnelle au courant peut atteindre plusieurs kV. En pratique cependant, cette valeur reste inférieure à la tension nécessaire pour perforer l'enveloppe de protection extérieure du câble.

Il est donc nécessaire de limiter l'augmentation de potentiel de l'écran en utilisant un limiteur de tension à gaine (ISVL) entre l'écran métallique et la terre. Ces limiteurs de tension de gaine fonctionnent essentiellement comme des résistances électriques non linéaires [24].

I.6.3.L'Utilisation de câbles souterrains :

Plusieurs problèmes sont généralement pris en compte en ce qui concerne l'utilisation de câbles souterrains.

. Le premier est la manière réelle dont les câbles sont posés sous terre. En pratique, trois méthodes principales sont utilisées : placer les câbles dans des caniveaux en béton armé, enterrer directement les câbles et les placer dans des tunnels souterrains. Le choix de ces méthodes est généralement basé sur les caractéristiques géographiques de la zone dans laquelle l'échouement est censé se faire [25].

. Le deuxième problème est lié au type réel de câbles utilisés dans le processus. Il existe différents types de câbles qui peuvent être posés sous terre et utilisés pour transporter l'électricité. Ce qu'il est important de noter, c'est que le choix des câbles est largement déterminé par le type d'installation à réaliser. Par exemple, les câbles en plastique, également connus sous le nom de XLPE et les câbles à isolation fluide sont utilisés lorsqu'une petite partie seulement de la ligne de transmission doit être enterrée. D'autre part, les câbles HVDC sont considérés comme des types de câbles souterrains à usage intensif et ils sont utilisés pour la transmission principale [25].

I.7.Méthodes de pose :

Outre les aspects électriques et thermiques de la conception du câble, il est nécessaire de prendre en compte les contraintes mécaniques et thermomécaniques auxquelles le système de câbles sera soumis lors de l'installation et de la mise en service [24]. Le choix d'un conduit s'effectue en fonction des influences externes du local, voir la figure I.11.

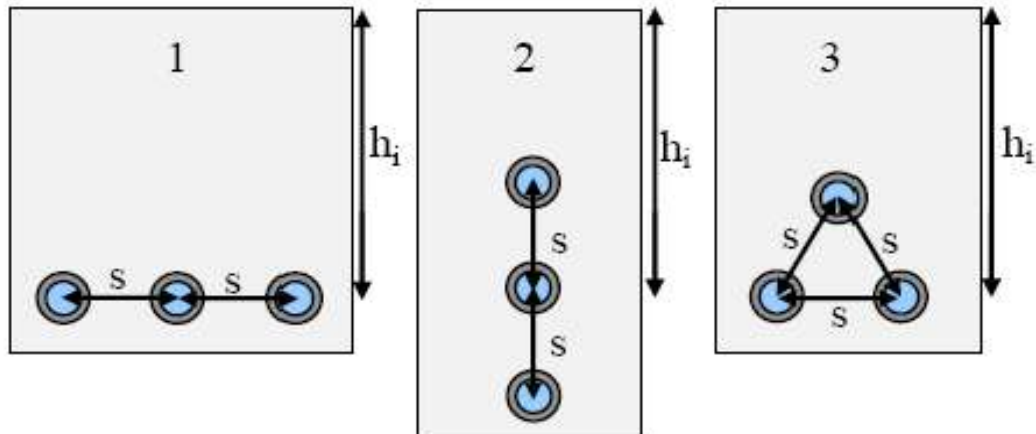


Figure I.11: Différentes configurations géométriques pour le souterrain triphasé.

(1) horizontal, (2) vertical, (3) triangulaire [2].

I.8.Conclusion :

L'objectif principal de ce chapitre est de donner un aperçu des câbles électriques. Nous avons identifié les types de lignes de transport d'énergie (souterraines, aériennes et sous-marines), après quoi nous avons mentionné les câbles électriques, surtout les câbles électriques souterrains en termes de classification, d'ingénierie, composition et nature, et nous avons également mentionné les avantages et les défauts de ces câbles électriques. Enfin nous avons cité quelques défauts et des problèmes des câbles électriques souterrains.

Chapitre II

Modèle électromagnétique et simulation des câbles électriques souterrains

II.1.Introduction :

Pour la simulation de tout dispositif magnétique, il est nécessaire de disposer des caractéristiques électriques, magnétiques et géométriques des différents milieux impliqués. Grâce aux équations de Maxwell, il devient plus simple de calculer et de représenter le champ électromagnétique produit aux bornes d'un câble. Ainsi, l'élaboration de modèles mathématiques destinés à simuler les caractéristiques électromagnétiques des câbles électriques devient essentielle [26].

L'objectif est de visualiser et de calculer la distribution des paramètres magnétiques autour des lignes électriques, à la fois en situation statique et en présence éventuelle de défauts dans les phases. Ces approches nous permettent d'analyser le comportement magnétique des systèmes électriques et d'évaluer leur performance en termes de distribution du champ magnétique. Cette compréhension est essentielle pour la conception et l'optimisation des installations électriques, en particulier pour la détection défauts potentiels.

II.2. Les champs électriques et champs magnétiques:

II.2.1 Effets des champs magnétiques :

Le champ magnétique à 50 Hz induit des courants électriques dans le corps humain. Seule l'exposition à des champs magnétiques intenses peut amener une perception immédiate.

Les seuils de perception immédiate retenus par l'Organisation Mondiale de la Santé (OMS) sont les suivants:

- pour des champs magnétiques à 50 Hz compris entre 500 μ T et 5.000 μ T des effets biologiques mineurs ont été rapportés.
- pour des champs magnétiques à 50 Hz compris entre 5.000 μ T et 50.000 μ T on recense des effets sur le système nerveux et la vision.
- pour des champs magnétiques à 50 Hz compris entre 50.000 μ T et 500.000 μ T on constate une stimulation des tissus excitables et des dommages sur la santé sont possibles.
- pour des champs magnétiques à 50 Hz supérieurs à 500.000 μ T une fibrillation ventriculaire a été rapportée [27].

II.2.2 Effets des champs électriques:

Le corps humain est un conducteur d'électricité. Lorsque le corps est soumis à un champ électrique important, des charges électriques vont s'accumuler à la surface du corps.

L'accumulation de ces charges électriques peut se traduire par:

- des vibrations de la pilosité, un chatouillement superficiel de la peau. des micro-étincelles entre la peau et des objets au contact (vêtements, lunettes, montres,...).

Le seuil de perception des champs électriques varie d'un individu à l'autre:

- en dessous de 10 kV/m, une minorité de personnes perçoit une sensation de « souffle » sur la peau.

- à partir de 20 kV/m, la majorité des personnes perçoit les champs électriques, sous forme de picotements [27].

II.3. Phénomènes d'induction électromagnétiques dans les câbles souterrains :

II.3.1. Résistance ohmique - Effets pelliculaires et de proximité :

La résistance en courant alternatif d'un conducteur de câble souterrain est plus élevée que la résistance en courant continu par suite des effets pelliculaire et de proximité. La résistance en courant continu peut être considérée comme égale à la résistance d'un conducteur circulaire de même section et dont la longueur est égale à la longueur du câble augmentée de 2 % pour tenir compte du spiral âge des brins qui constituent chaque conducteur. Dans les câbles tripolaires, les conducteurs, revêtus de leur isolement, étant tordus ensemble il y a lieu d'en tenir compte par une majoration de longueur supplémentaire de 2%.

Il est difficile de calculer exactement l'accroissement de résistance dû à l'effet pelliculaire dans le cas de conducteurs subdivisés en un grand nombre de brins, comme c'est le cas pour les câbles souterrains. L'effet de proximité ne conduit à une variation appréciable de la résistance effective que pour de très grandes sections [28].

II.3.2. Courants induits dans écran métallique (gaine, enveloppe de plomb) - Pertes d'énergie :

Le flux magnétique alternatif dû à la circulation du courant dans les conducteurs produit dans l'écran des câbles des forces électromotrices alternatives longitudinales. Si plusieurs câbles se trouvent côte à côte et que leurs écrans sont électriquement en contact, ces f.e.m. donnent lieu à des courants dans les écrans ce qui crée des pertes supplémentaires. Il est commode de tenir compte de ces pertes, en les attribuant d'une manière conventionnelle à une augmentation fictive de la résistance des conducteurs. Des courants de Foucault induits localement et provoquant des pertes peuvent néanmoins se produire pour des câbles tripolaires de très forte section parcourus normalement par des courants intenses [29].

II.3.3. Pertes d'énergie des câbles souterrains:

Dans les isolants solides soumis à un champ électrique alternatif il se produit des pertes d'énergie attribuables aux causes suivantes :

1. la conductance massive de l'isolant lequel n'est jamais parfait.
2. la conductance superficielle, qui dépend de l'état de la surface.
3. l'hystérésis diélectrique.
4. les effluves et décharges dans les espaces vides [29].

II.4. Les champs magnétiques au-dessus d'un câble souterrain:

Les câbles souterrains posés en "trèfle non jointif" avec enrobage béton avec un transit de 1000 A, les champs magnétiques mesurés à 1 m au dessus du sol sont donnés par le tableau I.1:

Tableau II.1 champ magnétique d'une ligne souterraine [29].

Tension	l'axe	5 m	10 m
400 Kv	13,2 μ T	2,7 μ T	0,7 μ T
225 Kv	11,5 μ T	2 μ T	0,6 μ T
63/90 kV	8,6 μ T	1,4 μ T	0,4 μ T

Les champs magnétiques varient avec l'intensité du courant transporté et la distance, la température, la nature de la terre [28].

Les câbles souterrains ne produisent pas de champ électrique. En effet, celui-ci est confié à l'intérieur de la gaine métallique qui entoure les conducteurs. Les champs magnétiques ne sont pas atténués par l'enfouissement sous terre des conducteurs.

Les câbles souterrains génèrent des champs magnétiques qui peuvent même être supérieurs à ceux générés par une ligne aérienne, mais ils décroissent plus vite avec la distance [30].

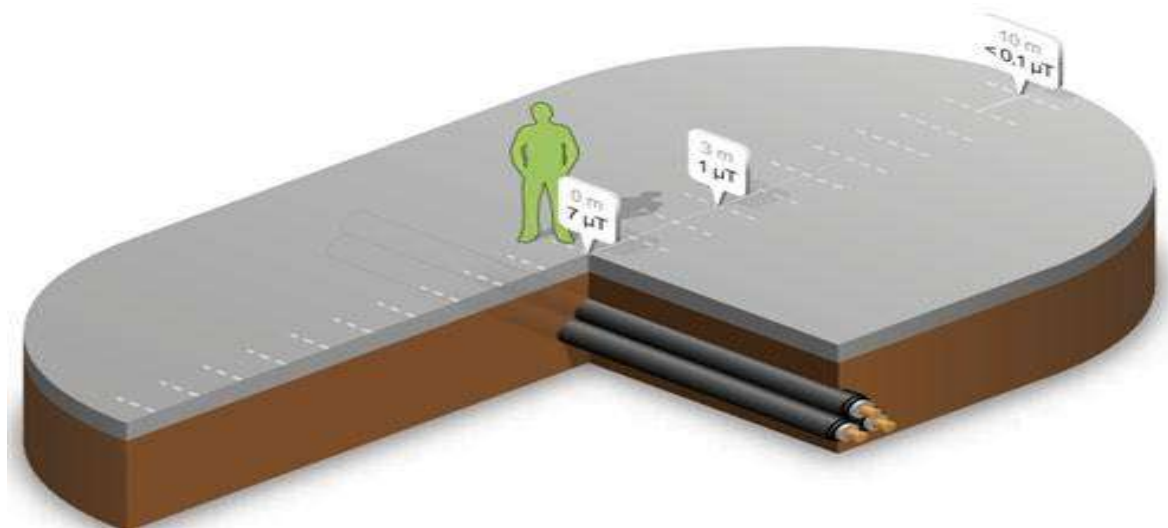


Figure II.1: coupe d'une terre contient une ligne souterrain [30].

Une personne se trouvant juste au-dessus de l'axe d'un câble souterrain est exposée à un champ magnétique typique d'environ 7 μ T au niveau des pieds (mais cinq fois plus faible à hauteur du buste, figure II.1). À une distance de 3 m de l'axe du câble, le champ ne dépasse

plus le micro tesla (quelle que soit la hauteur de mesure) et il devient tout à fait négligeable à 10 m [30].

II.4.1. Les effets à court terme :

Les champs électromagnétiques peuvent exercer une force sur les particules chargées électriquement se trouvant dans le corps humain, et même des courants induits peuvent donner lieu à des changements biologiques dans le corps. Le système nerveux est le plus sensible aux effets des champs. Ils peuvent voir apparaître des éclairs lumineux dans leur champ de vision car la rétine est très innervée. Des contractions incontrôlées de leurs muscles.

II.4.2. Les effets à long terme :

Des études épidémiologiques mettent en évidence depuis longtemps déjà un lien statistique faible, mais néanmoins significatif, entre une exposition prolongée à des champs magnétiques de basse fréquence générés par le réseau à haute tension et un risque accru de leucémie chez l'enfant et même d'autres maladies pour les techniciens et les agents de la maintenance. Il est question ici d'une exposition résidentielle à des champs magnétiques dont l'intensité moyenne est supérieure à 0,3 – 0,4 μT sur une période prolongée [31].

II.5. Calcul du champ électromagnétique :

L'étude magnétique de n'importe quel dispositif électrique nécessite la connaissance des champs électromagnétiques \vec{B} et du \vec{H} dans chaque parties est très nécessaire pour accès au calcul donc des valeurs du flux, l'effet inductif ou capacitif etc...., elles sont en fonction du champ et de l'induction magnétique. Le calcul du champ magnétique est basé essentiellement sur l'exploitation des lois de l'électromagnétisme et la résolution des équations différentielles aux dérivées partielles de Maxwell qui constituent le modèle de départ [31].

II.5.1. Equations de Maxwell :

James Maxwell (1831-1878), physicien écossais de talent exceptionnel, d'avoir unifié en 1865 ces deux théories de l'électricité et du magnétisme distinctes en une seule et unique dite « Électromagnétisme », cette théorie unifiée les quatre équations de Maxwell. La plupart des phénomènes électromagnétiques sont régis par les équations aux dérivées partielles de Maxwell qui doivent être adaptées au milieu à plusieurs domaines du dispositif à étudier [31]. Tout dispositif électromagnétique En tout point de l'espace obéit aux équations suivantes:

$$\text{div } \vec{D} = \rho \qquad \text{Loi de Maxwell – Gauss} \qquad \text{(II.1)}$$

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

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

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

Avec :

\vec{E} : Champ électrique en (v/m).

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

\vec{H} : Champ magnétique en (A/m).

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

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

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

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

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

- Propriétés magnétiques.
- Caractérisation diélectrique [32].

a-Propriétés magnétiques

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

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

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

Où :

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

$\mu_r = 1$ pour un milieu amagnétique. μ_r : perméabilité relative du milieu considéré

$\mu_0 = 4\pi 10^{-7}$ perméabilité du vide (H/m) [32].

b-Caractéristiques diélectrique

Induction du champ électrique est donnée par :

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

Où :

$\epsilon = \epsilon_0 \epsilon_r$ Avec ϵ_0 : Permittivité de l'air et ϵ_r : Permittivité relative du milieu considéré en(F/m).

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

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

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

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

J_s : la densité de courant imposée dans l'inducteur et J_{ind} la densité du courant induit.

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

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

Le terme $\sigma \vec{E}$ exprime le courant résultant du champ électrique \vec{E} et le terme $\sigma(\vec{v} \wedge \vec{B})$ exprime le courant résultant du mouvement [31].

c- Relations de continuité entre deux milieux différents

Si le système est composé de deux milieux différents, Les champs électriques et magnétiques des différents milieux sont liés à l'interface par des relations de continuité afin de relier deux milieux de propriétés électromagnétiques différentes. Soient deux milieux M1 et M2. On appelle $(\vec{E}_1, B_1, \vec{H}_1, \vec{D}_1)$:les différents champs de M1 et $(\vec{E}_2, B_2, \vec{H}_2, \vec{D}_2)$: et de M2. Soit \vec{n}_{12} la normale unitaire à la frontière entre M1 et M2 dirigée de M1 vers M2 (Figure II.2).

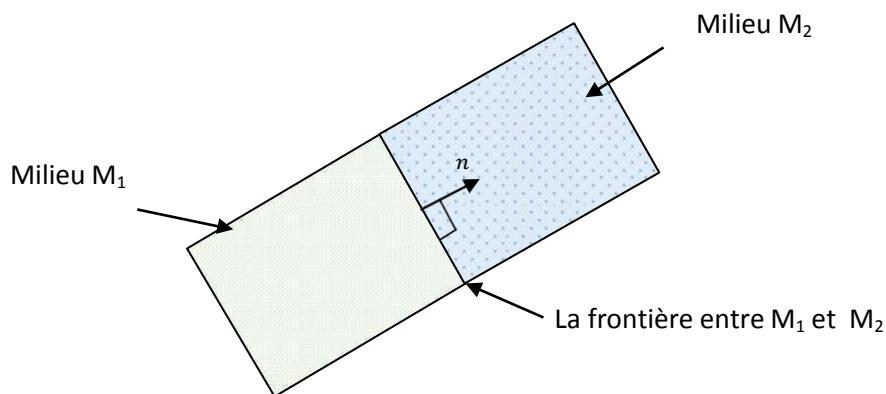


Figure II.2: Interface entre deux milieux différents.

Dans le cas général, un dispositif électrotechnique comporte des milieux différents (fer, air, aluminium, cuivre, ...etc.). Avant d'aborder la résolution du problème, il est nécessaire de connaître le comportement des champs électromagnétiques à travers l'interface entre deux milieux différents [31,33].

d- Conditions de passage

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

La continuité de La composante normale de l'induction magnétique

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

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

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

La continuité de la composante tangentielle du champ électrique

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

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

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

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

D'après les équations précédentes, on constate qu'il y a une continuité des composantes respectivement normale de l'induction magnétique \vec{B} et tangentielle du champ électrique \vec{E} et une discontinuité des composantes respectivement tangentielle du champ magnétique \vec{H} et, normale de l'induction électrique \vec{D} par la présence du courant et des charges surfaciques, à la traversée de la surface de séparation des deux milieux 1 et 2. Le système d'équations contient beaucoup d'inconnues et se prête donc mal à une résolution numérique [31,34].

II.6.Modèles électromagnétiques :

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

- Modèle électrostatique.
- Modèle électrocinétique.
- Modèle magnétostatique.
- Modèle magnétodynamique [34].

II.6.1. Modèle magnétostatique :

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

II.6.1.1. Modèle magnétostatique vectorielle :

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

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

Le calcul du champ magnétique des lignes électriques :

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

La combinaison des équations précédentes donne :

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

Après remplacement on obtiendra la formule de l'équation différentielle partielle finale pour l'effet inductif pour la variable A en magnétostatique suivante [34]:

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

Le calcul du champ électrique des lignes électriques

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

$$\begin{cases} E = -\text{grad } V \\ \text{div } D = p \\ \text{div } J = -j\omega p \end{cases} \quad (\text{II.24})$$

La loi de Faraday s'évalue à zéro:

$$\text{rot}(E) = -j\omega B = 0 \quad (\text{II.25})$$

Inclure le courant de déplacement dans la définition du courant, cela vous donne $\text{div } J' = 0$ et $J' = \sigma E + j\omega D$ pour la loi de conservation actuelle et la définition actuelle, respectivement.

Nous obtiendrons l'équation différentielle partielle 2D suivante pour la variable V :

$$-\text{div}((\sigma + j\omega\epsilon)\nabla V) = 0 \quad (\text{II.26})$$

L'interface « Electric Currents » utilise cette loi de conservation pour déterminer la valeur de V dans les domaines. Pour les limites de ce modèle, plusieurs conditions de Dirichlet sont utilisées. L'alimentation des trois phases est comme suite [34]:

$$V_a = V_0 \quad V_b = V_0 e^{-j\frac{2\pi}{3}} \quad V_c = V_0 e^{+j\frac{2\pi}{3}} \quad (\text{II.27})$$

II.7. Déclaration des conditions aux limites :

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

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

Dans le cas où on a la dérivé du vecteur potentiel magnétique \mathbf{A} par rapport au temps est différent de zéro, c'est-à-dire la condition aux limites de Neumann. Donc on spécifie les dérivées des valeurs que la solution doit vérifier sur les frontières/limites du domaine [34].

II.8. Les techniques de résolutions des équations aux dérivées partielles :

Les méthodes de résolution des EDPs dans les milieux linéaires nous pouvons citer :

- la méthode des différences finies(MDF)
- la méthode des éléments finis(MEF)
- la méthode des volumes finis(MVF)
- la méthode des intégrales de frontières(MIF)
- la méthode des circuits couplés(MCC).

L'objectif d'utilisation des méthodes numériques de discrétisation à pour but de ramener la résolution du système d'équations différentielles dans le domaine d'étude, compte tenu des conditions aux limites, à celle d'un système d'équation algébriques dont la solution conduit à la détermination des champs électromagnétiques et du déplacement [35].

II.8.1 .Méthode des Eléments Finis (MEF) :

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

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

La méthode des éléments finis en 2D en se basant sur l'approche résidus pondérés qui ne tient pas compte de l'aspect énergétique du problème traité. La méthode consiste à dissocier le domaine étudié en éléments finis, et approcher l'inconnu dans chaque élément par des fonctions d'interpolation. Ces fonctions sont généralement des polynômes de Lagrange de premier ou deuxième degré. L'interpolation dans un élément est effectuée en fonction de ses valeurs nodales, ce qui impose la continuité de l'inconnu sur les interfaces des éléments.

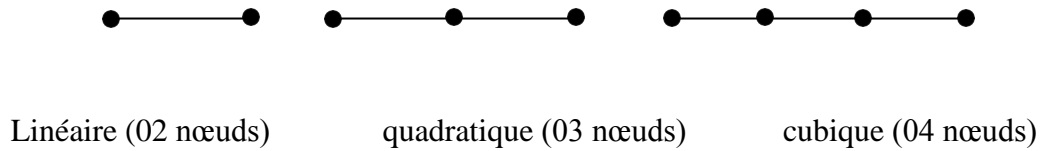
Le principe de la méthode des éléments finis est la transformation de l'équation aux dérivées partielles (EDP) qui régit le problème traité à un système d'équation algébrique dont la résolution permet de définir l'inconnu à un ensemble de points (nœuds) de la discrétisation. Consiste à découper la géométrie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

Il existe différents types d'éléments :

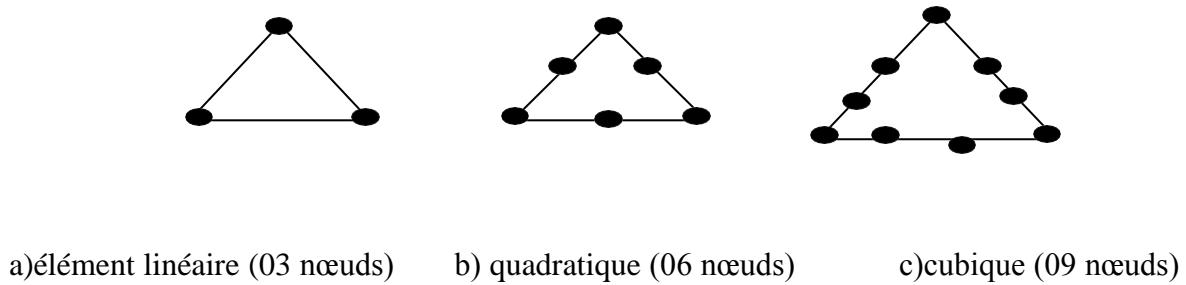
- élément linéique (1D).
- élément surfacique (2D).
- élément volumique (3D) [35].

Pour notre cas le domaine d'étude, soit à deux dimensions, on rencontre le plus souvent des éléments linéaires, quadratiques ou cubiques. Pour aboutir à une meilleur exactitude de la solution, on procède a raffiner le maillage.

-Problème à une dimension (élément droit) :



-Problème à deux dimensions (triangle ou quadrilatère)



Problème à trois dimensions

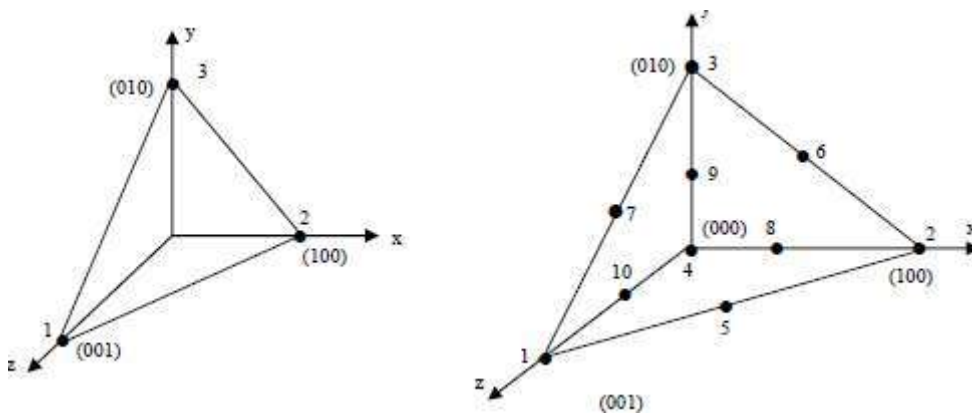


Figure II.3: Discrétisation du domaine d'étude (maillage).

a- Fonction d'approximation

Le potentiel vecteur magnétique $A^{\vec{}}$ dans un milieu peut être trouvée par des fonctions d'approximations (dites fonctions de formes), l'expression varie d'un type d'élément à un autre. Ces fonctions doivent garantir la continuité du potentiel aux interfaces de discrétisation. Généralement on utilise des fonctions polynomiales [35].

b- Formulation Intégrale

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

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

La formulation intégrale peut être développée de deux manières:

- Variationnelle.
- Résidus pondérés.

b-1 Formulation Variationnelle

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

$$\mathfrak{S}(A) = \int_{\Omega} L d\Omega \quad (\text{II. 28})$$

L : la fonction de Lagrange qui assemble entre les énergies cinétique et potentielle du système. Ainsi que Ω c'est le domaine d'étude [35].

II.9. Implémentation du modèle dans le logiciel COMSOL :

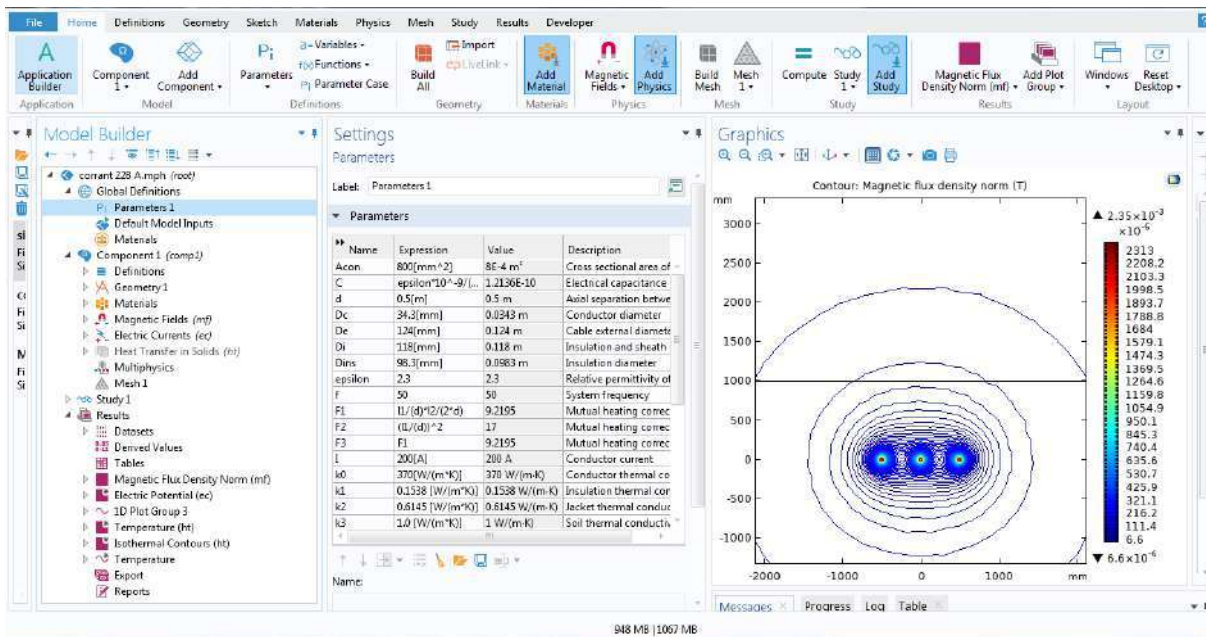
Pour la simulation des caractéristiques électromagnétiques des lignes électriques, plusieurs facteurs influencent ce phénomène. Parmi ceux-ci, on trouve la tension et l'intensité du courant électrique, la nature des matériaux des câbles électriques et la distance entre les câbles, pour n'en nommer que quelques-uns. Afin de mieux comprendre le phénomène d'interaction magnétique entre les lignes de champ et le sol, ainsi que l'impact des défauts électriques sur les caractéristiques électromagnétiques du milieu, nous allons procéder à une simulation numérique en utilisant la méthode des éléments finis, Lorsque cette étude nécessite l'utilisation d'un programme COMSOL Multiphasiques 5.6 [35].

II.9.1.Processus de simulation par le logiciel COMSOL :

Le logiciel COMSOL Multiphysics, basé sur la méthode des éléments finis, permet le calcul du champ magnétique dans les domaines électrostatique et magnétostatique. Cette méthode offre la possibilité de déterminer avec précision la valeur du champ magnétique en tout point du domaine, ce qui facilite l'étude de géométries complexes et la distribution adéquate du champ dans des systèmes variés. Il est possible d'obtenir des solutions acceptables et

simplifiées.

Le logiciel COMSOL Multiphysics intègre les différentes étapes du processus de simulation, telles que la définition de la géométrie, les propriétés des matériaux, le maillage, le choix du domaine physique à étudier, la résolution et l'exportation des résultats. Toutes ces fonctionnalités sont regroupées dans une interface graphique conviviale, comme illustrée dans la figure II.4 [35].



Construction physique déclaration des paramètres Géométrie à étudier

Figure II.4: Présentation du logiciel COMSOL Multiphysiques.

II.9.2. Structure du programme :

En premier lieu, nous allons présenter la structure de notre programme qui est constituée de trois parties. En se basant sur les équations de Maxwell données au début, nous allons développer notre structure de simulation.

Le programme développé sous l'environnement COMSOL est structuré comme suit :

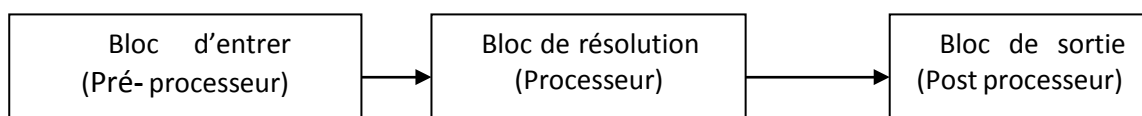


Figure II.5: Différents blocs du programme

A) Bloc d'entrée (Préprocesseur)

Dans ce bloc, on trouve les différentes données concernant la description de la géométrie des câbles électriques et des lignes de transmission THT ,HT MT, BT ainsi que la discrétisation,

les différentes propriétés physiques, le calcul des coefficients des équations algébriques et les conditions aux limites.

Le bloc est constitué de trois parties : partie base de données, partie de maillage et partie d'affectation. Ces trois parties sont décrites comme suit :

A-1 Base de données

Cette partie est consacrée à la description de la géométrie du dispositif et englobe :

- Le nombre de régions du domaine d'étude.
- Les dimensions et la géométrie de chaque région.

A-2 Maillage

Le maillage est une discrétisation qui contient un nombre de nœuds, de triangles et d'éléments qui dépendent du système à étudier.

Les erreurs numériques inhérentes à la méthode des éléments finis sont le plus souvent dues au maillage [35].

A-3 Affectation

Cette partie est dédiée à l'introduction des propriétés physiques et électromagnétiques (Conductivité électrique, perméabilité magnétique) de chaque région selon le phénomène à étudier (thermique, magnétostatique, électrocinétique, magnétodynamique), en l'occurrence la densité de courant source.

L'espace de cette partie est utilisé pour le calcul de coefficients des équations algébriques à résoudre à partir des propriétés physiques de la partie précédente.

B) Bloc de résolution (Processeur)

Ce bloc est caractérisé par les équations algébriques discrétisées, par les méthodes de résolution telle que la méthode de Gauss ou Gauss Seidel. Les résultats du calcul permettent d'évaluer les composantes du vecteur potentiel magnétique, densité des courants induits, champ magnétique, etc.....

Après avoir calculé le vecteur potentiel magnétique \mathbf{A} , on peut déterminer les autres paramètres magnétiques le champ et l'induction magnétique à partir des équations développées bien avant.

C) Bloc de sortie (Poste processeur)

Ce bloc est destiné à l'affichage et la visualisation de toutes les grandeurs électromagnétiques, à savoir le vecteur potentiel magnétique, les lignes de champ magnétique.

Présenter les résultats de façon intelligible et synthétique :

- sous forme numérique.
- sous forme graphique [36].

II.10. Conclusion :

Dans ce chapitre, nous avons introduit et défini les concepts de champs magnétiques et électriques, ainsi que les phénomènes électromagnétiques dans les câbles électriques souterrains. Nous avons également abordé les équations aux dérivées partielles (EDP) et discuté des différentes méthodes de résolution des EDP. Pour notre étude, nous avons opté pour la méthode des éléments finis en 2D, en utilisant le logiciel COMSOL pour effectuer les calculs. Nous avons détaillé les données nécessaires, telles que le domaine, les conditions aux limites et le maillage de la géométrie. Afin de modéliser numériquement les lignes de champ autour des câbles électriques, l'utilisation d'un outil de calcul numérique tel que le logiciel COMSOL Multiphysics s'avère essentielle pour obtenir les valeurs du champ magnétique en chaque point du domaine d'étude.

Conclusion général

Conclusion général

Les effets de la pollution électromagnétique à basse fréquence sont effectivement un sujet de recherche fondamental et important. Il existe des normes internationales qui définissent les distances minimales recommandées entre les zones et les appareils sensibles (agglomérations urbaines régionales) et les lignes électriques, afin de limiter la pollution électromagnétique sur l'environnement et la santé humaine, ainsi que pour réduire les interférences électromagnétiques.

Le principal objectif de ce mémoire est de présenter la distribution du champ électromagnétique à proximité des lignes électriques souterraines, en tenant compte de différentes géométries et tensions, tant dans des conditions normales que transitoires. Pour atteindre cet objectif, deux méthodes ont été utilisées. Premièrement, une étude appliquée a été réalisée sur les câbles électriques souterrains de 400 kV au sein de la société Sonalgaz-GRTE Hassi Messoud. Un tesla mètre a été utilisé pour mesurer le champ magnétique, et la température du câble a été calculée à l'aide d'un Arduino programmé. Ces mesures ont permis d'évaluer le champ magnétique et la température des câbles utilisés dans les installations de l'entreprise, contribuant ainsi à une meilleure compréhension des niveaux de pollution magnétique. Deuxièmement, la méthode des éléments finis avec le logiciel COMSOL Multiphysics a été utilisée pour simuler le champ magnétique et électrique généré par les câbles électriques à haute tension. Ces simulations ont permis d'évaluer l'impact de différents paramètres, tels que l'intensité du courant et la géométrie des câbles, sur la distribution du champ électromagnétique.

En conclusion, ce mémoire a contribué à une meilleure compréhension de la pollution magnétique associée aux câbles électriques à haute tension. Les résultats obtenus peuvent être utilisés pour évaluer les risques potentiels pour la santé humaine et l'environnement, ainsi que pour orienter les décisions de conception et de planification des installations électriques à haute tension.

Des études complémentaires et des efforts continus de recherche sont nécessaires pour approfondir nos connaissances et développer des stratégies efficaces visant à minimiser cette pollution et ses impacts

Références :

- [1]. Smahi W, Slimani A . " Simulation d'une agression rayonnée d'un câble électrique " Mémoire fin d'étude Department of Electrical Engineering, Kasdi Merbah University Algeria 2018.
- [2]. Pierre Lebas " diagnostic des câbles souterrains par détection de décharges partielles, " Thèse Doctorat université de Liège. 2008.
- [3]. R. Akroune Moussa " calcul et analyse de régime permanent des lignes aériennes de transport d'énergie électrique de grande longueur de très haute tension, " Thèse de magistère, université Annaba .1989.
- [4]. Meziant Rachida et Sahli Siham, " Calcul du champ électromagnétique généré par les réseaux électriques en vue de la compatibilité électromagnétique " Mémoire fin d'étude université Bejaia. 2017.
- [5].<https://www.edf.fr/groupe-edf/espaces-dedies/l-energie-de-a-a-z/tout-sur-l-energie/l-acheminement-de-l-electricite/le-reseau-de-transport>.
- [6]. Haddad Lyazid et Hami Khodir " Calcul des paramètres et caractéristiques des lignes électriques triphasées " Mémoire fin d'étude Université Abderrahmane mira – BEJAÏA 2015.
- [7].<https://www.lesechos.fr/2018/01/une-ligne-souterraine-pour-securiser-le-reseau-electrique-breton-965949>.
- [8]. T Worzyk, " Springer Submarine Power Cables - Design, Installation, Repair, Environmental aspects ", Berlin Heidelberg 2009.
- [9]. https://www.transitionsnergies.com/wp-content/uploads/2021/10/subsea-cable_952x500.jpg.
- [10]. Ossi Bergius. "Implementation of on-line Partial Discharge Measurements in Medium voltage cable network. " Tampere University of technology, 2012.
- [11]. Chin Tze Choo. " Space charge determination in HVDC power cable and its influence on electric field ". University of Southampton, 2010.
- [12]. Paul Gill. " Electrical power equipment maintenance and testing ". CRC press, 2008.
- [13]. Thomas Worzyk. " Submarine power cables: design, installation, repair, environmental aspects ". Springer Science& Business Media, 2009.
- [14]. François Gervais. " Les nouveaux supraconducteurs ". Tec et Doc, 1991
- [15]. Jacob Ostergaard, Ole Tonnesen, Jorgen Kaas-Pedersen, Arne Hejde Nielsen, and Chresten Traeholt. " A new concept for superconducting dc transmission from a wind farm.

- Physica C: Superconductivity ", Elsevier, 372:1560-1563, 2002
- [16]. William A Thue. " Electrical power cable engineering " CRC Press, 2011.
- [17]. E Peschke and R Von Olshausen. " Cable systems for high and extra-high voltage ". Publicis MCD Werbeagentur GmbH, 1999.
- [18]. Jan De Kock and Cobus Strauss. " Practical power distribution for industry ". Elsevier, 2004.
- [19]. T. Gonen. " Electric Power Transmission System Engineering". CRC Press, 1988.
- [20]. J.C. Demay, J.C. Bobo, "câbles haute tension, Matériaux pour câbles haute tension à isolation polyéthylène ou polyéthylène réticulé chimiquement", RGE Revue générale d'électricité.85(9) (1976)731-736. ..
- [21]. Hans Dieter Betz, Ulrich Schumann, Pierre Laroche, " [Lightning: Principles, Instruments and Applications](#). " [[archive](#)], Springer, 2009, p. 202–203. (ISBN 978-1-4020-9078 3) (consulté le 13 mai 2009).
- [22]. Zellagui Mouhemed." Etude des protections des Réseaux électrique MT (30 et 10 KV) " Université mentouri constantine 2010.
- [23]. Nexans France." Les câbles Souterraines HT ". cahier technique 2004.
- [24]. Mohamed Zellagui. " câbles souterraines MT et BT ". Mémoire fin d'étude Université Batna 2. 2018.
- [25]. <https://www.dfliq.net/blog/underground-electrical-transmission-cables-basics>.
- [26]. William A. Thue " Electrical Power Cable Engineering " Marcel Dekker, INC. New York • Basel U.S.A 2003.
- [27]. Ferdinand de Lichtervelde " Les champs électromagnétiques dans les réseaux de distribution " Article gestionnaire du réseau de transport belge. Bruxelles.
- [28]. Philippe Follenfant " la maîtrise de l'urbanisme autour des lignes de transport d'électricité " Conseil Général de l'Industrie de l'énergie et des Technologies Août 2010
- [29]. Scribd " Parametres Lignes Electriques " cahier technique.
- [30]. Elia Group company " Les champs électromagnétiques et le réseau à haute tension "Elia, département Communication - Février 2015.
- [31]. Ayad A.N.E.I " Etude et modélisation d'un capteur à Courant de Foucault pour le contrôle non destructif " ingéniorat 2009 université de sidi bel abbes Algérie.
- [32] Sonia Naceur " Contribution à la modélisation numérique d'une pompe MHD en tenant compte de la nature des matériaux des électrodes et du fluide" université de Batna mémoire de magister en électrotechnique 2007.

[33]. Ryma Delimi " méthodes comparées pour le calcul des forces d'origine électromagnétique application aux paliers magnétiques " magister Université Mentouri – Constantine Algérie 2008.

[34] Hocini Farid " association de la commande pour l'étude par éléments finis des phénomènes magnéto élastiques et vibratoires dans les systèmes électrotechniques " thèse de doctorat université mouloud Mammeri, Tizi-Ouzou 2013.

[35]. Tamer Bécherrawy " Électromagnétisme : équations de Maxwell propagation et émission " UNIMARC | BibTeX | RIS2012.

[36].Theory for the Magnetic Fields, No Currents Interface User's Guide magnetostatic equation AC/DC Module May 2012 COMSOL 4.3pdf www.comsol.com.

[37].Extra high voltage cable "http://www.iljinelectric.com/eng/product/prd_info.jsp?cd=1012

[38]. LEONI Studer AG «Câbles d'énergie et Accessoires» cahier technique Décembre 2008.

الخلاصة : تمت دراسة وقياس المجال المغناطيسي حول الكابلات الكهربائية تحت الأرض في هذه المذكرة باستخدام طريقتين مختلفتين. أولاً، تم إجراء تطبيق عملي لدراسة المجال المغناطيسي حول الكابلات الكهربائية تحت الأرض في محطة التحويل سونالغاز باستخدام جهاز تسلامتر، وتم قياس درجة حرارته باستخدام برمجية أردو ويزو. ثانياً تمت محاكاة المجال الكهرومغناطيسي حول الكابلات الكهربائية تحت الأرض في حالتين: بدون وجود ماس كهربائي، تتسبب هذه العيوب في ظهور تشوهات في الكبل وارتفاع درجة حرارته، مما يؤدي إلى تدهوره وشيخوخته .

الكلمات الرئيسية : كابل كهربائي ، طريقة العناصر النهائية ، خط تحت الأرض ، المجال المغناطيسي

. Comsol , tesla mètre , arduino

Résumé : Dans cette note, nous avons étudié et mesuré le champ magnétique autour des câbles électriques souterrains 400 kV en utilisant deux méthodes différentes. Tout d'abord, une application pratique a été réalisée pour étudier le champ magnétique autour des câbles électriques souterrains dans une station Sonelgez-GRTE, en utilisant un tesla mètre, et sa température a été mesurée à l'aide d'un programme Arduino. Deuxièmement, une simulation du champ électromagnétique autour des câbles électriques souterrains a été effectuée dans deux cas : sans présence de court-circuit et en présence de court-circuit. Ces défauts entraînent des déformations dans le câble et une augmentation de sa température, ce qui conduit à sa détérioration et à son vieillissement.

Mots clés : câble électrique, méthode des éléments finis, ligne souterraine, champ magnétique, Comsol, tesla mètre, Arduino.

Abstract: In this report, we studied and measured the magnetic field around 400 kV underground power cables using two different methods. Firstly, a practical application was conducted to study the magnetic field around the underground power cables at the Sonelgez-GRTE station using a teslameter, and its temperature was measured using an Arduino program. Secondly, a simulation of the electromagnetic field around the underground power cables was performed in two cases: without a short circuit and with a short circuit. These faults result in deformations in the cable and an increase in its temperature, leading to its deterioration and aging.

Key words: power cable, finite element method, underground line, magnetic field, Comsol, teslameter, Arduino.