

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE  
MINISTRE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR ET DE LA RECHERCHE  
SCIENTIFIQUE

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

*Faculté des Sciences et de la technologie*

*Département d'Électromécanique*

# *Mémoire*

*Présenté pour obtenir*

**LE DIPLOME DE MASTER**

**FILIERE : Electrotechnique**

**Spécialité : Commandes électrique**

Par

- **Krai Abdallah**
- **Bedjaoui Merouane**

*Intitulé*

*Analyse électromagnétique et thermique de câble souterrains haute tension à  
l'aide MFE*

*Soutenu le : .....*

*Devant le Jury composé de :*

<i>Nom &amp; Prénom</i>	<i>Grade</i>	<i>Qualité</i>	<i>Etablissement</i>
<i>M. ZAHAR Djamila</i>	<i>MCB</i>	<i>Président</i>	<i>Univ-BBA</i>
<i>M. AOUABED Fatiha</i>	<i>MCB</i>	<i>Encadreur</i>	<i>Univ-BBA</i>
<i>M. BOUCHAMA Ziyad</i>	<i>MCA</i>	<i>Examineur</i>	<i>Univ-BBA</i>
<i>M. REFFAS Abderrahim</i>	<i>MCA</i>	<i>Examineur</i>	<i>Univ-BBA</i>

*Année Universitaire 2021/2022*

## *Dédicace*

---

---

*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'électromécanique*

*A tous les travailleurs de l'université elbachir el ibrahimi*

*Abdallah et Merouane.*

## ***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 **Mme. AOUABED FATIHA** 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 d'EL BACHIR EL IBRAHIMI, pour tous les efforts déployés et pour les informations et la formation.

Nous remercions tous les collègues de la promotion 2022

# Sommaire

Liste des figures	
Liste des tableaux	
Liste des abréviations	
INTRODUCTION GENERALE.....	1
<i>Chapitre 01</i> .....	3
GENERALITE SUR LES CABLES ELECTRIQUES SOUTERRAINS.....	3
1.2. Généralité sur les réseaux électriques.....	3
1.2.1. Niveaux de tension.....	4
1.2.2. Architecture des réseaux électriques.....	5
1.3. Lignes des transports [4].....	5
1.3.1. Les Lignes aériens.....	6
1.3.2. Les lignes souterraines.....	7
1.3.3. Comparaison entre les lignes aériennes et souterraines.....	7
1.4. Réseaux HTA souterrains.....	7
1.5. Câbles souterrains.....	8
1.5.1. Les avantages des câbles souterrains.....	9
1.5.2. Les inconvénients des câbles souterrains.....	9
1.5.3. Coûts de maintenance.....	10
1.6. L'Utilisation de câbles souterrains.....	10
1.7. Construction de câbles électriques souterrains.....	10
1.8. Classifications des câbles souterrains.....	11
1.8.1. Par leurs constructions.....	11
1.8.2. Classification Par tension.....	13
1.8.3. Classifications des câbles souterrains selon leur âme [14].....	14
1.9. Types de câbles souterrains [7].....	14
1.9.1. Les câbles souterrains THT.....	14
1.9.2. Les câbles Souterrains HT.....	15
1.9.3. Les câbles souterrains Moyenne Tension MT [19].....	17
1.9.4. Les câbles souterrains bas Tension BT.....	17
1.10. Méthodes de pose.....	18
1.11. Conclusion.....	19
<i>Chapitre 02</i> .....	21
LES CHAMPS ELECTRIQUES ET MAGNETIQUES.....	21
2.1. Introduction :.....	21
2.2. Champ électromagnétique :.....	21
2.2.1. Champ électrique :.....	22
2.2.2. Champ magnétique :.....	22
2.3. Caractéristique du champ magnétique et électrique.....	22
2.4. Les effets des champs électriques et champs magnétiques :.....	23
2.4.1. Effets des champs magnétiques.....	23
2.4.2. Effets des champs électriques :.....	23
2.5. Les champs magnétiques au-dessus d'un câble souterrain :.....	24
2.5.1. Différence entre le profil de champ d'une ligne aérienne et d'un câble souterrain :.....	24
2.6. Equations de Maxwell.....	25
2.6.1. Propriétés magnétiques :.....	26
2.6.2. Caractéristiques diélectrique :.....	26
2.7. Conditions aux limites.....	27
2.8. Types des méthodes numériques.....	27
2.8.1. Méthode des Différences Finis (MDF).....	27
2.8.2. Méthode des intégrales de frontières (MIF).....	28

2.8.3. Méthode des Volumes Finis (MVF).....	28
2.8.4. Méthode des Eléments Finis (MEF).....	28
2.9. Conclusion.....	31
<i>Chapitre 03</i> .....	33
<b>SIMULATION ELECTROMAGNETIQUE ET THERMIQUE DANS LES CABLES</b>	
<b>SOUTERRAINS</b> .....	
3.1. Introduction.....	33
3.2. Description du logiciel COMSOL MULTIPHASIQUES.....	33
3.2.1. Procédure de simulation sous COMSOL MULTIPHYSICS .....	34
3.2.2. Avantages de conception avec COMSOL MULTIPHYSICS.....	36
3.3. Procédure de simulation électromagnétique et thermique d'un câble souterrain.....	37
3.3.1. Dessin et dimension de la géométrie du système.....	37
3.3.2. Les propriétés du matériau de la géométrie étudiée.....	38
3.3.3. Les conditions aux limites [42].....	39
3.3.4. Le maillage des câbles électriques souterrains .....	40
3.3.5. Résolution par la méthode des éléments finis.....	41
3.4. Résultats et discussion.....	42
3.4.1. Champ magnétique et pertes résistives.....	43
3.4.2. La distribution du champ magnétique et électrique .....	45
3.4.3. Champ magnétique et électrique près les câbles souterrains.....	46
3.4.4. Évolution transitoire de la température .....	47
3.4.5. Distribution de la température dans le câble pour différents temps.....	49
3.4.6. Effet de courant sur la distribution de la température.....	50
3.4.7. Effet de la conductivité thermique du sol sur la distribution de la température dans le système de câbles électriques souterrains .....	51
3.5. Conclusion.....	52
<i>Conclusion générale</i> .....	54

## Liste des figures

Figure 1.1 Schéma simplifié d'un système électrique global et de ses sous-systèmes. ....	4
Figure 1.2 Différentes topologies des réseaux électriques Constitution du réseau électrique.....	5
Figure 1.3 lignes des transports [6].....	6
Figure 1.4 Réseaux HTA souterrains en double dérivation .....	8
Figure 1.5 Réseaux HTA souterrains en coupure d'artère [4] .....	8
Figure 1.6 Câble électrique souterrain .....	9
Figure 1.7 Construction de câbles.....	11
Figure 1.8 câbles ceinturés.....	12
Figure 1.9 Câble de type H et S.L [11] .....	12
Figure 1.10 Type de câbles de pression. [13].....	13
Figure 1.11 Constitution d'un câble souterrain isolé au polyéthylène réticule Légende [15].....	15
Figure 1.12 Coupe en 2D des câbles THT pour réseaux souterrains [6].....	16
Figure 1.13 câbles à conducteur compacts et segmentaires [17]. ....	16
Figure 1.14 Couches de câbles XLPE. [11] .....	17
Figure 1.15 Câble Moyenne Tension MT [19] .....	17
Figure 1.16 Câbles bas Tension BT [21] .....	18
Figure 1.17 différentes configuration géométriques pour le souterrain triphasé. [3] .....	18
Figure 2.1 Différence entre le champ d'une ligne aérienne et d'un câble souterrain [30] .....	25
Figure 2.3 Discrétisation du domaine d'étude (maillage) .....	30
Figure 3.1 Produits offert par COMSOL .....	34
Figure 3.2 Diagramme de différentes étapes de résolution dans COMSOL. [37].....	35
Figure 3.3 La géométrie du câble.....	37
Figure 3.4 Maillage de câble.....	40
Figure 3.5 Norme de densité actuelle ( $A/m^2$ ) .....	44
Figure 3.6 les pertes résistives ( $W/m^3$ ) avec flèche proportionnelle de la l'intensité du champ magnétique ( $A/m$ ). .....	44
Figure 3.7 Distribution du champ magnétique et électrique .....	45
Figure 3.8 champ magnétique.....	46
Figure 3.9 Champ électrique.....	47
Figure 3.10 La répartition de la température à l'intérieur du câble et du sol environnant à deux moments différents .....	48
Figure 3.11 Température transitoires à différentes parties du câble .....	49
Figure 3.12 distribution de la température dans le câble pour différents temps.....	50
Figure 3.13 effet de courant sur la distribution de la température .....	51
Figure 3.14 la variation de la température du câble avec augmentation de la conductivité thermique du sol.....	52

## Liste de tableaux

---

---

Tableau 1.1 La norme CEI (Commission Électrotechnique Internationale) .....	4
Tableau 1.2 La norme NF C 15-100 .....	4
Tableau 1.3 Comparaison entre les lignes aériennes et souterraines.....	7
Tableau 1.4 Méthodes de pose des câbles souterrains [17].....	18
Tableau 2.1 Caractéristiques des champs électriques et magnétiques .....	23
Tableau 2.2 Champ magnétique d'une ligne souterraine [27] .....	24
Tableau 3.1 Caractéristiques géométriques de câble. ....	38
Tableau 3.2 les caractéristiques des matériaux utilisés dans le câble.....	39

# Listes des Acronymes et Symboles

## Liste des symboles

$\vec{E}$ : Vecteur champ électrique [V/m].

$\vec{H}$ : Vecteur champ magnétique [A/m].

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

$\overline{dM}$ : Déplacement élémentaire le long d'une ligne de champ.

$\vec{j}$ : Densité de courant en ( $A/m^2$ ).

$\vec{D}$ : Induction électrique en ( $C/m^2$ ).

$\rho$ : Densité de charge volumique en ( $C/m^3$ ).

$\frac{\partial \vec{D}}{\partial t}$ : Densité de courant de déplacement en ( $A/m^3$ )

$\mu_r$ : Perméabilité relative du milieu.

$\epsilon_r$ : Permittivité relative du milieu considéré (F/m).

$\vec{n}$ : le vecteur composant normal.

Q : source de chaleur ( $W/m$ ).

T : température de conducteur (K).

A : vecteur de potentiel magnétique.

$\rho$  : Densité de masse ( $Kg/m^3$ )

$C_p$  : Capacité thermique ( $J/Kg.m$ ).

K : conductivité thermique ( $W/m.K$ ).

$\sigma$  : Conductivité électrique ( $S/m$ ).

$\alpha$  : Coefficient de température de résistance ( $K^{-1}$ ).

$\omega$  : La fréquence angulaire ( $rad/s$ ).

$R_e$  : Opérateur réel de grandeur complexe.

## List des abréviations

MDF: La méthode des différences finies.

MVF: La méthode des volumes finis

MIF: La méthode intégrale de frontière

MEF: La méthode des éléments finis

XLPE : Cross-Linked Polyethylene.

CEI : Comité électrotechnique international.



## ملخص

الهدف الرئيسي من هذا العمل هو المحاكاة ثنائية الأبعاد لتوزيع درجة الحرارة والمجال الكهرومغناطيسي في الكابلات الكهربائية تحت الأرض ثلاثية الطور 33 كيلو فولت من خلال النمذجة المزدوجة الكهرومغناطيسية الحرارية. بينت النتائج أن عدة ضغوط مختلفة تؤثر على توزيع المجال الكهرومغناطيسي في الكابلات الكهربائية تحت الأرض مثل : التيار نفاذية الدرع وتأثير التوصيل الحراري للأرض على درجة الحرارة القصوى لموصل الكابل. قمنا بحساب ومحاكاة توزيع المجالات الكهرومغناطيسية ودرجة الحرارة داخل وحول الكبل باستخدام طريقة عددية باستخدام البرنامج التجاري COMSOL MULTIPHYSICS ، والذي أثبت أنه أحد أفضل الحلول.

**كلمات مفتاحية:** كهرومغناطيسي، المحاكاة، الكابلات، تحت الأرض.

---

## Résumé

L'objectif principal de cette recherche est de simuler en 2D la distribution de la température et du champ électromagnétique dans les câbles électriques souterrains triphasés à trois conducteurs de 33 kV grâce à une modélisation couplée électromagnétique-thermique. Les résultats montrent que plusieurs contraintes différentes affectent la distribution du champ électromagnétique dans les câbles électriques souterrains tels que : courant, perméabilité de l'armure et l'effet de la conductivité thermique du sol sur la température maximale du conducteur du câble. On a calculé et simulé la distribution des champs électromagnétique et la température dans et autour de câble en utilisant une méthode numérique par logiciel commercial COMSOL MULTIPHYSICS qui s'est avérée être une des meilleures solutions.

**Mot clé :** Electromagnétique, Simulation, Câble, Souterraine.

---

## Abstract

The main objective of this work is to simulate in 2D the distribution of temperature and electromagnetic field inside three-phase, three-core, 33 kV underground power cables through a coupled electromagnetic-thermal modeling. The results show that several different stresses affect the distribution of the electromagnetic field in the underground electric cables such as: current, armour permeability and the effect of soil thermal conductivity on the maximum temperature of the cable conductor. We calculated and simulated the temperature and electromagnetic fields distribution within the underground power cable system using the numeric finite element method by COMSOL MULTIPHYSICS package, which proved to be one of the best solutions.

**Key Words:** Electromagnetic, Simulation, Cable, Underground.

# **Introduction Générale**

## INTRODUCTION GENERALE

---

La demande importante d'électricité a été un grand défi dans les systèmes de transport et de distribution à cause de l'augmentation progressive de consommation. Les câbles électriques souterrains sont largement utilisés par les services publics pour transmettre et distribuer l'énergie électrique aux points correspondants différents niveaux de tension des centrales aux zones urbaines afin d'offrir un voie écologique et fiable pour cette puissance. Par conséquent, cela conduit les utilitaires pour évaluer les performances des câbles souterrains compte tenu de leur conception, de leur fiabilité, de leur durée de vie, coûts de fabrication et d'installation. Une modélisation suffisamment précise est en général plus difficile à obtenir pour les câbles électriques souterrains que pour lignes aériennes en raison de la complexité de la configuration géométrique de câble souterrain. Diagnostic avancé et des techniques de simulation peuvent être utilisées pour évaluation l'état de câbles électriques et surveiller par conséquent les raisons probables lié au processus de défaillance de système. [1]

Modélisation numérique pour les câbles souterrains fournissent, en particulier lorsqu'ils sont calibrés avec résultats empiriques, un outil intéressant pour étudier effet de chauffage électromagnétique à l'intérieur d'eux, améliorer la conception, identifier la réponse diélectrique du système d'isolation et déterminer répartition de la température aux différentes couches de câble, afin de réduire les coûts de fabrication et d'améliorer la conception. [2].

La simulation du couplage modèle électromagnétique-thermique des câbles électriques souterrains peut fournir un outil simple pour identifier toute augmentation température due aux normales et anormales conditions de fonctionnement, ce qui pourrait être nocif et peut raccourcir sa durée de vie à long terme opération. En conséquence, le but de ce travail est étudié la distribution de la température et des champs électromagnétique à l'intérieur de câbles électriques souterrains triphasés à trois conducteurs de 33 kV par modélisation du couplage électromagnétique-thermique à l'aide de logicielle COMSOL de simulation numérique basé sur la méthode des éléments finis.

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

Le premier chapitre sera consacré à un rappel sur les généralités des câbles électriques.

Dans le deuxième chapitre, nous allons voir les différentes méthodes de calcul du champ électromagnétiques.

Dans le troisième chapitre, nous calculons de la température et des champs électromagnétiques à l'intérieur de câbles électriques souterrains

Enfin, nous terminerons notre travail par une conclusion générale.

# **Chapitre 1**

## Généralité sur Les câbles électriques souterrains

# Chapitre 01

## GENERALITE SUR LES CABLES ELECTRIQUES SOUTERRAINS

---

### 1.1. 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.

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.

Le choix entre des lignes électriques aériennes ou souterraines pour un réseau électrique dépend de plusieurs contraintes telles que la nature de la région, de l'exploitation et de la maintenance et des avantages et des inconvénients de chaque type [3]

### 1.2. Généralité sur les réseaux électriques

Un système électrique se compose de trois segments 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 segment de 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.1.1).

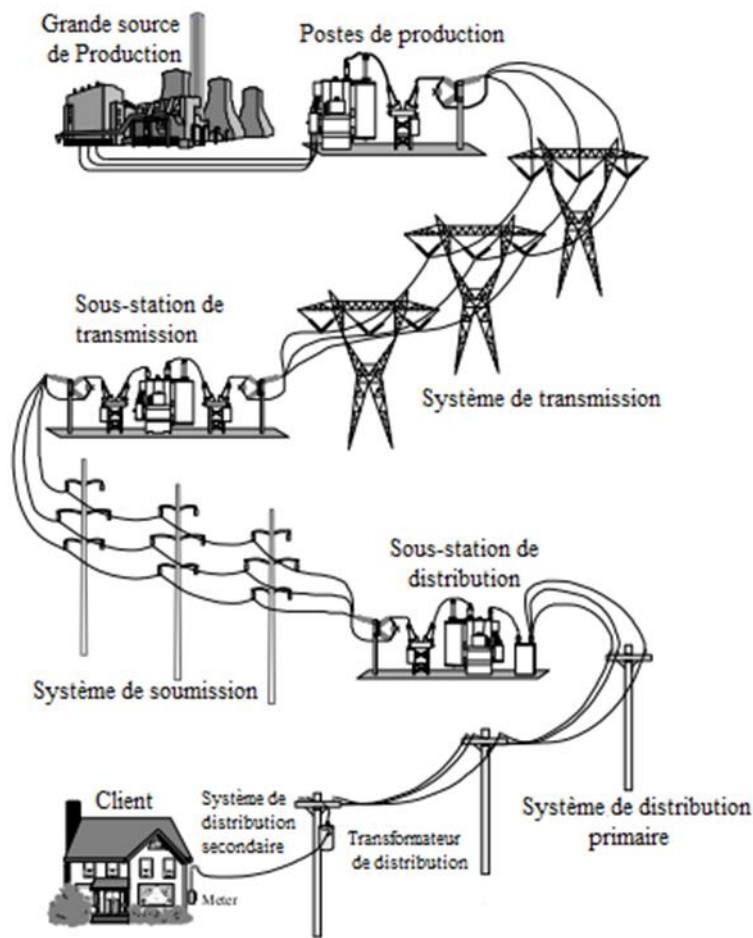


Figure 1.1 Schéma simplifié d'un système électrique global et de ses sous-systèmes.

1.2.1. Niveaux de tension

Les niveaux de tension sont définis par :

a. La norme CEI 38

Tableau 1.1 La norme CEI (Commission Électrotechnique Internationale)

	THT & HT	MT	BT
Norme CEI 38	1 kV-1000 kV	1000 V et 35 kV	100 V et 1000 V
Valeurs standards	45-66-110-132-150-220 kV	3.3-6.6-11-22 kV -33 kV	400V-690 V -1000 V (à 50Hz)

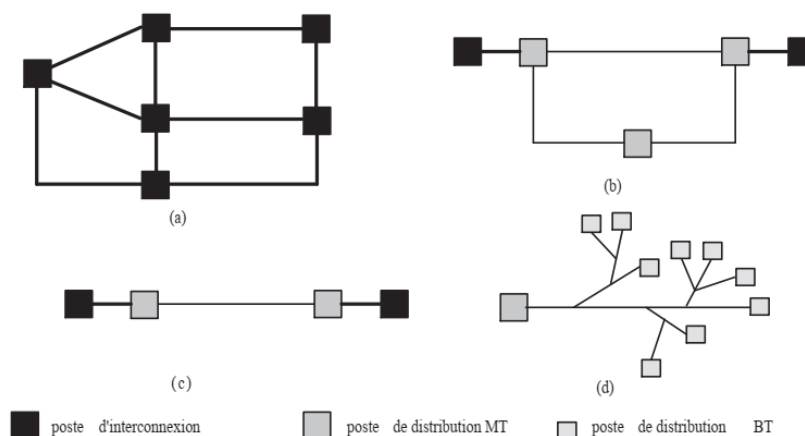
b. La norme Française NF C 15-100

Tableau 1.2 La norme NF C 15-100

Norme Française NF C 15-100	HTB	HTA	BTB	BTA	TBT
	>50 kV	1 kV - 50 kV	100 V et 1 kV	50 V – 500 V	< 50 V
Valeurs standards	63-90-150- 225 -400 kV	5.5-6.6-10-15 -20 - 36 kV	230V-380 V -400 V		12- 24 -48 V

### 1.2.2. Architecture des réseaux électriques

L'énergie électrique produite est directement injectée sur le réseau de transport maillé à très haute tension pour être transportée sur de grandes distances avec un minimum de pertes. Elle "descend" ensuite sur les réseaux de répartition, puis ceux de distribution d'où elle est distribuée aux gros consommateurs et aux réseaux de distribution à basse tension. Les réseaux de transport d'énergie et d'interconnexion sont liés entre eux sous forme des boucles, voici leurs différentes structures de liaisons, voir la figure 1.2. [3]



(a) Réseau maillé, (b). Réseau bouclé, (c). Réseau radial, (d). Réseau arborescent.

**Figure 1.2** Différentes topologies des réseaux électriques Constitution du réseau électrique

Le transport de l'énergie électrique est actuellement assuré par :

- Ligne aérienne.
- Câble souterrain.
- Poste électrique.

### 1.3. Lignes des transports [4]

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. [5]

Les isolants ont une partie solide (porcelaine, verre, papier en matière composites) combinée avec un gaz (air, SF<sub>6</sub>), 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.

### 1.3.1. 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 électrique de la source de production jusqu'à la zone de consommation (figure 1.3).

Elle possède les caractéristiques suivantes : [6]

- ✓ 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.

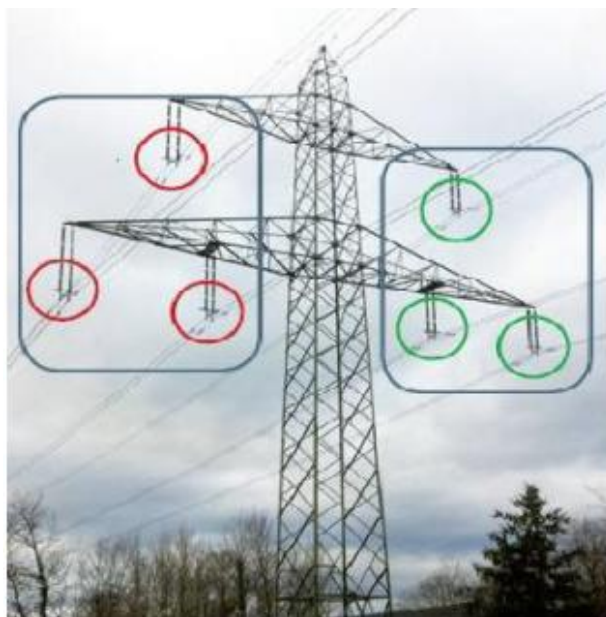


Figure 1.3 lignes des transports [6]



### 1.3.2. Les lignes souterraines

Les lignes souterraines sont constituées par un ou plusieurs câbles unipolaires ou par un câble multipolaire. Un câble unipolaire comprend un conducteur de phase central en cuivre ou en aluminium entouré par un isolant (papier imprégné à l'huile, gaz sous pression, polyéthylène), une gaine métallique, une protection contre l'humidité et les agressions extérieures [5].

Un câble tripolaire est composé de trois conducteurs de phase isolés et groupés sous une gaine métallique commune. Les câbles sont utilisés pour transporter l'énergie électrique à l'intérieur (de localités) pour faire la liaison entre une ligne aérienne et le poste de couplage...etc.

### 1.3.3. Comparaison entre les lignes aériennes et souterraines

Dans ce paragraphe sont comparées les réseaux aériens et souterrains se distinguent en termes les avantages et Inconvénients.

**Tableau 1.3** Comparaison entre les lignes aériennes et souterraines

Types de lignes	Lignes aériennes	Lignes souterraines
<b>Avantages</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Sont moins coûteuses que les lignes souterraines du point de vue des frais d'installation et de réparation.</li> <li>• Elles permettent une surveillance aisée de leur état et un repérage facile des accidents et des défauts.</li> <li>• Elles peuvent être réparées très rapidement en cas d'accident ou de défaut.</li> <li>• Elles peuvent être surchargées en intensité de courant sans trop de danger.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Sont soustraites aux surtensions atmosphériques (foudre).</li> <li>• Ne causent pas d'interférences avec les circuits de télécommunications.</li> <li>• Ne produisent aucune gêne pour les réceptions de radiodiffusion et télévision.</li> <li>• Seule solution possible pour traverser de larges fleuves ou des bras de mer lorsque la distance à franchir dépasse 3km [4].</li> </ul>
<b>Inconvénients</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• L'exposition aux surtensions d'origine atmosphérique.</li> <li>• Leur installation donne lieu à des oppositions des propriétaires des terrains surplombés.</li> <li>• Elles soulèvent des problèmes d'esthétique et de respect des sites.</li> <li>• Elles sont susceptibles d'induire des forces électromotrices perturbatrices ou dangereuses dans les circuits de télécommunication.</li> <li>• Elles sont susceptibles de produire des perturbations radioélectriques gênant les réceptions de radiodiffusion et de télévision.</li> <li>• Selon certains, les champs électriques et magnétiques peuvent exercer une influence néfaste sur la santé [4].</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Sont d'un coût beaucoup plus élevé que celui des lignes aériennes. La différence est d'autant plus grande que la tension est plus élevée.</li> <li>• Le repérage des défauts y est délicat et lent.</li> <li>• Les réparations sont coûteuses et parfois malaisées.</li> <li>• Leurs armures et gaines doivent être protégées contre les effets de corrosion dus aux courants vagabonds.</li> <li>• Risquent d'être détérioré</li> <li>• Leur isolement est susceptible d'être détérioré par élévation de température des conducteurs en cas de surcharge [4].</li> </ul>

### 1.4. Réseaux HTA souterrains

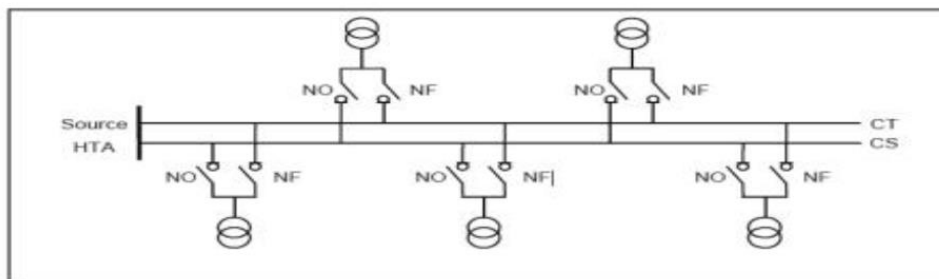
Les zones urbaines ou mixtes à forte densité de charge sont alimentées par des câbles HTA enterrés en double dérivation (figure 1.4) ou en coupure d'artère (figure 1.5).

En double dérivation, les postes HTA/BT sont normalement alimentés par le câble de travail (CT), le câble de secours (CS) permet de garantir une bonne continuité de service en cas de défaut. La

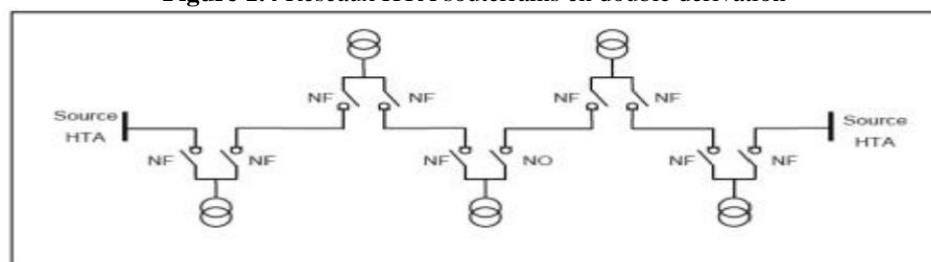
technique en coupure d'artère est moins couteuse que la précédente et permet une isolation rapide des défauts, mais nécessite un temps d'intervention plus long.

Le dimensionnement des ouvrages souterrains est principalement lie aux courants admissibles dans les câbles en raison de la densité des charges à desservir.

Les ouvrages de distribution neufs ou les rénovations en zones rurales sont également réalisées en câble enterrer depuis les années 1990, en raison de la baisse notoire du surcote lie à cette technique. De plus, une volonté politique croissante de qualité environnementale tend à la réduction de l'impact visuel des ouvrages. [7].



**Figure 1.4** Réseaux HTA souterrains en double dérivation



**Figure 1.5** Réseaux HTA souterrains en coupure d'artère [4]

## 1.5. Câbles souterrains

Les lignes de transmission souterraines sont un moyen courant de transport d'énergie à moyenne et haute tension, en raison de la demande énergétique plus élevée. Les câbles souterrains ont été largement appliqués dans les réseaux électriques car ils sont plus sûrs par mauvais temps (orages ou foudre), moins chers pour des distances plus courtes, respectueux de l'environnement et peu d'entretien.

Il existe plusieurs défauts dans les câbles souterrains, des défauts naissants et permanents sont progressivement dus au processus de vieillissement, une surcharge électrique, une déficience mécanique, des conditions environnementales défavorables et une pollution chimique, peuvent causer des dommages à l'isolation. [8]

Par conséquent, nous constatons qu'il existe de nombreux types qui peuvent être classés selon différents motifs, tels que la tension de fonctionnement, le type de conducteur, le type d'isolant ou le nombre de conducteurs dans un seul câble, et ils peuvent également être classés en fonction de leur domaine d'utilisation.



**Figure 1.6** Câble électrique souterrain

### **1.5.1. Les avantages des câbles souterrains**

Plusieurs avantages sont associés à la pose de types spécifiques de câbles sous le sol à des fins de transmission d'électricité. Voici un bref aperçu de ces avantages.

- Par rapport aux câbles aériens, les câbles souterrains sont beaucoup plus sûrs. En effet, les câbles électriques souterrains ne sont pas exposés aux nombreux dangers auxquels sont exposés les câbles aériens.
- Il est moins coûteux d'entretenir les câbles souterrains au fil du temps que les câbles aériens. En pratique, le coût d'installation des câbles souterrains dépasse de loin celui associé à l'installation de câbles aériens. Mais une fois les câbles souterrains installés, il est très peu probable qu'ils doivent être réparés de temps en temps, comme c'est le cas avec les types de câbles électriques aériens.

La transmission souterraine de l'électricité est associée à la fiabilité. En effet, les cas d'interruption constante de l'alimentation électrique à la suite d'orages ou de défauts associés aux lignes de transport aériennes ne sont pas courants lorsque les lignes de transport d'électricité sont posées sous terre. [9]

### **1.5.2. Les inconvénients des câbles souterrains**

- La pose des câbles nécessitait une excavation qui pouvait être difficile dans les zones encombrées.
- Les modifications du réseau de câbles existant sont laborieuses car elles nécessitent une toute nouvelle excavation
- Susceptible d'être endommagé par les eaux souterraines et l'humidité du sol.
- La dissipation thermique est moins efficace.

Comme les câbles souterrains sont plus épais que les câbles aériens, le coût impliqué est élevé. [10]

### 1.5.3. Coûts de maintenance

Les facteurs suivants déterminent les coûts globaux pouvant être engagés dans le processus d'entretien des câbles de transmission électrique souterrains.

- Il est pratiquement difficile de détecter un défaut dans une ligne de transmission électrique souterraine et de résoudre le problème. Par conséquent, le besoin de techniques plus avancées pour détecter et réparer les défauts dans les câbles souterrains contribue aux coûts globaux de maintenance des lignes de transport d'électricité souterraines. [11]
- Il est également difficile de mettre à niveau un câble souterrain. Quels que soient les types spécifiques de câbles et de systèmes utilisés, la mise à niveau des lignes souterraines signifie simplement l'installation de nouvelles lignes d'alimentation. Par conséquent, ce facteur contribue aux coûts globaux encourus lors du processus d'entretien des câbles souterrains. [9]

### 1.6. 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 [9]
- 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. [9]

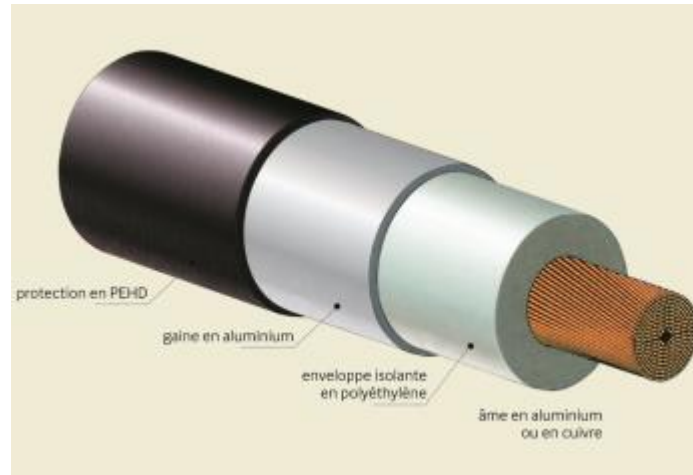
### 1.7. Construction de câbles électriques souterrains

Les câbles souterrains en lui-même est composé des éléments suivants (figure 1.7):

- ❖ Une âme en cuivre ou aluminium, conductrice, nécessaire au transport de l'électricité.
- ❖ Une isolation de haute qualité en polyéthylène capable de résister aux contraintes électriques

liées à la haute tension.

- ❖ Un écran servant à éliminer le champ électrique et les courants en cas de court-circuit.
- ❖ Une gaine extérieure : Cette couche protège la gaine métallique intérieure et agit comme isolant pour résister aux tensions induites et transitoires [12]



**Figure 1.7** Construction de câbles

## 1.8. Classifications des câbles souterrains

On peut Classifier les câbles électriques souterrains suivants plusieurs critères :

- Selon la nature des Phases (câble unipolaire ou tripolaire).
- Selon la nature d'isolement (Câble synthétique ou à isolation par XLPE, isolation par papier imprégné).
- Selon la forme ou la structure (Conducteurs de forme circulaire, ou sectoriel)

### 1.8.1. Par leurs constructions

#### 1.8.1.1. Câbles ceinturés

La tension maximale est de 11 KVA. Les âmes sont généralement toronnées et peuvent être de forme non circulaire pour mieux utiliser l'espace disponible. Dans un câble triphasé, les trois conducteurs sont regroupés puis reliés par la ceinture de papier isolante imprégnée d'un diélectrique approprié. Les espaces entre les conducteurs et la ceinture sont remplis de matériau diélectriques fibreux. Cela donne au câble une forme de section circulaire. Une gaine de plomb est utilisée pour recouvrir la ceinture afin de la protéger de l'humidité et d'assurer sa résistance mécanique. La gaine de plomb est ensuite recouverte d'une ou plusieurs couches d'un matériau de blindage et enfin d'une gaine extérieure. Cependant, il n'est pas idéal pour un niveau de tension supérieur à 11KV car la rigidité diélectrique chute après quelques années. [11]

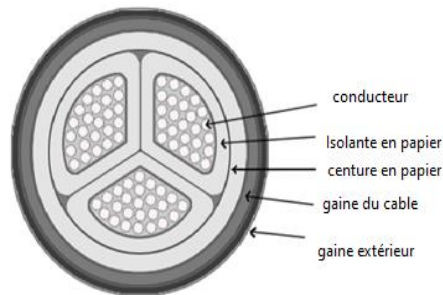


Figure 1.8 câbles ceinturés

### 1.8.1.2. Câbles blindés

La tension maximale est de 66 KVA. Ce type est divisé en deux types de câbles de type H et de type SL.

#### a. Câbles de type H

Il a d'abord été conçu par M. Hochstadter. Les trois noyaux sont isolés individuellement avec du papier puis recouverts d'un écran / couver le métallique. Ces couvertures métalliques sont perforées. En conséquence, une telle construction permet aux trois écrans métalliques de se toucher. Ces trois capots métalliques sont ensuite regroupés dans un ruban métallique généralement en cuivre. Une gaine de plomb entoure cette construction. Les couvercles métalliques et la gaine sont mis à la terre. L'avantage évident est que les contraintes électriques sont radiales et non tangentielles et donc de moindre amplitude. De plus, les couvercles métalliques améliorent la dissipation de la chaleur. [11]

#### b. Câbles de type S.L

Il est similaire aux câbles de type H, à la différence que chacun des trois conducteurs possède sa propre gaine de plomb. Grâce à cette disposition, la nécessité de la gaine globale utilisée précédemment est supprimée. L'avantage d'une telle construction est que les chances d'une rupture noyau à noyau sont grandement minimisées. De plus, la flexibilité du câble est améliorée.

Les limites sont sévères. Une telle construction est limitée aux tensions jusqu'à 66 kV uniquement. Les gaines individuelles sont plus minces, et s'il y a des défauts de construction, l'humidité peut pénétrer dans le câble et réduire sa rigidité diélectrique

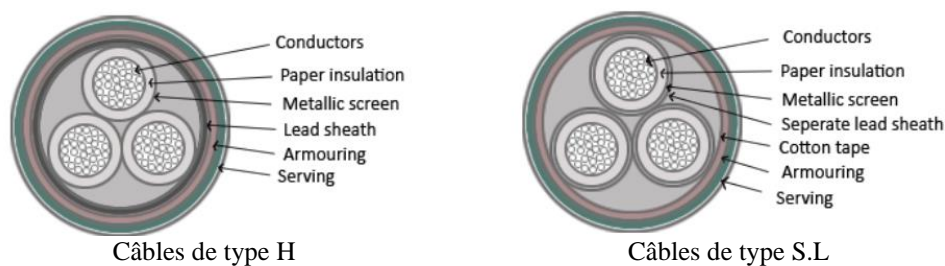


Figure 1.9 Câble de type H et S.L [11]

### 1.8.1.3. Câbles de pression

Pour des tensions supérieures à 66 kV, les contraintes électrostatiques dans les câbles dépassent les valeurs acceptables et les câbles massifs deviennent peu fiables. Cela se produit principalement parce que des vides sont créés lorsque les tensions dépassent 66 kV. Par conséquent, au lieu de câbles solides, nous utilisons des câbles de pression. Typiquement, ces câbles sont soit remplis d'huile, soit remplis de gaz.[11]

#### a. Câbles remplis d'huile

L'huile circule sous une pression appropriée à travers des conduits prévus à cet effet. Cette alimentation et cette pression d'huile sont maintenues grâce à des réservoirs maintenus à des distances appropriées. L'huile utilisée est la même que celle employée pour l'imprégnation des isolants en papier.[11]

#### b. Câbles remplis de gaz

Du gaz sous pression (généralement de l'azote sec) circule autour des câbles dans un tuyau en acier étanche à l'air. De tels câbles sont des câbles transportant des valeurs de courant de charge plus élevées et peuvent fonctionner à des valeurs de tension plus élevées. Mais le coût global est plus. [11]

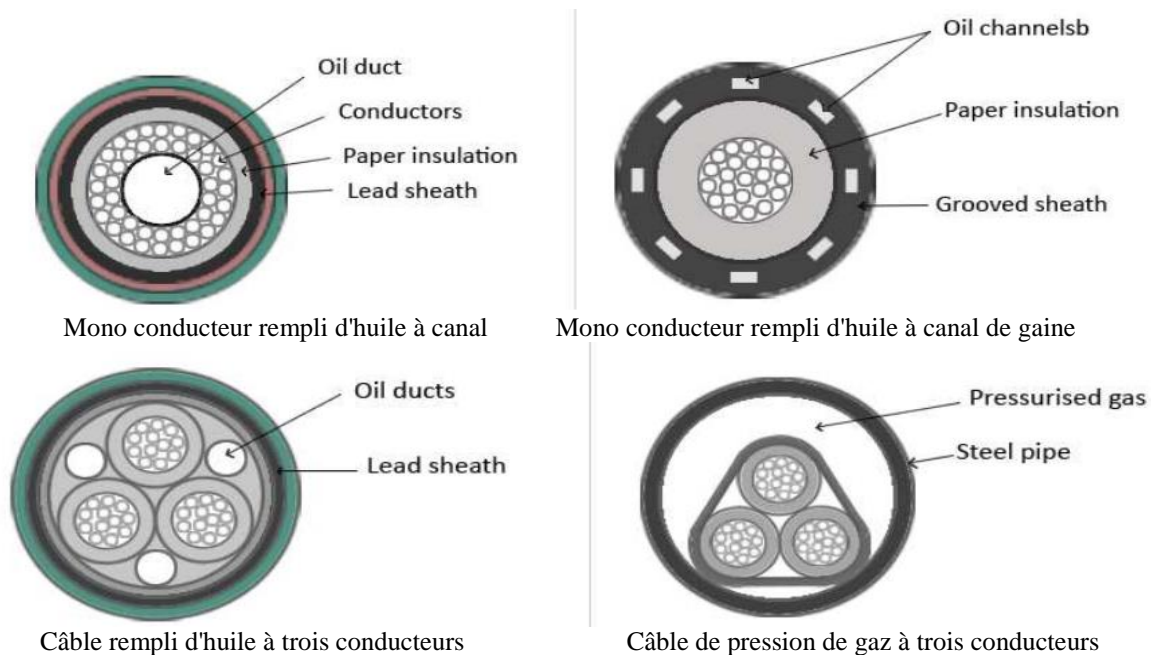


Figure 1.10 Type de câbles de pression. [13]

## 1.8.2. Classification Par tension

Les câbles souterrains sont généralement classés en fonction de leur tension nominale. Ils sont regroupés comme suit :

- Câbles basse tension ayant une capacité de traitement de tension maximale de 1000 V

- Câbles haute tension ayant une capacité de traitement de tension maximale de 11 kV
- Câbles Super Tension ayant une capacité de traitement de tension maximale de 33 kV
- Câbles à très haute tension ayant une capacité de traitement de tension maximale de 66 kV
- Câbles extra-haute tension utilisés pour des applications avec une tension requise supérieure à 132 kV.

### **1.8.3. Classifications des câbles souterrains selon leur âme [14]**

- Câble unipolaire
- Câble à trois conducteurs

En règle générale, un câble souterrain a un, trois ou quatre conducteurs. Ces câbles sont bien sûr construits en conséquence.

Les câbles souterrains sont généralement utilisés pour délivrer une alimentation triphasée. Un câble à 3 conducteurs est préféré jusqu'à 66 kV. Au-delà, l'isolation requise pour le câble est trop importante. Pour des tensions plus élevées, les constructions à 3 noyaux deviennent trop volumineuses et, par conséquent, même avec certaines limitations, nous utilisons des câbles à un noyau.

Les câbles souterrains utilisés dépendent de :

- Tension de fonctionnement
- Demande de charge.
- Type de prestation

## **1.9. Types de câbles souterrains [7]**

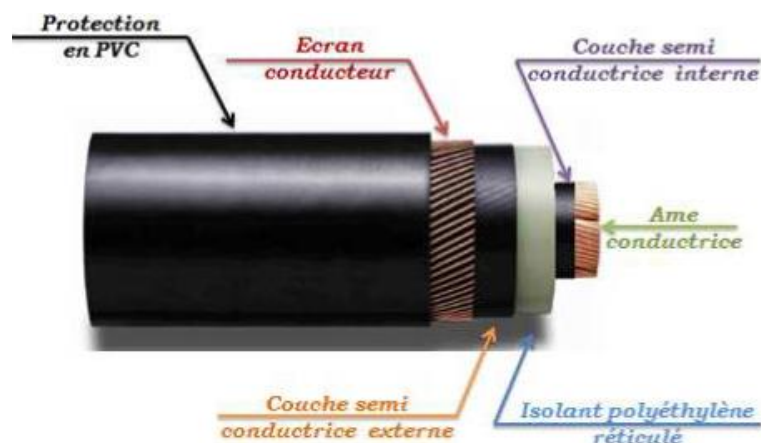
Certes, les investissements liés à l'installation de nouveaux câbles sont parfois prohibitifs. Mais en contrepartie, leur impact environnemental et esthétique est bien moindre que celui des lignes aériennes. Dans cette optique, les câbles souterrains ont pris et prendront encore une ampleur certaine.

### **1.9.1. Les câbles souterrains 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. Ces propriétés se combinent pour transmettre l'énergie aux utilisateurs finaux aussi efficacement que possible, ce qui est particulièrement important pour les générateurs d'énergie renouvelable et à faible émission de carbone à distance. La réduction de ces pertes de transmission d'énergie apporte une contribution précieuse à la réduction des émissions de gaz à effet de serre.



Aussi sont principalement employés pour le transport et la distribution de l'énergie électrique dans les zones fortement urbanisées (grandes villes (figure 1.11.)), parfois pour résoudre des problèmes locaux particuliers, techniques ou d'environnement, pour lesquels la mise en œuvre de lignes aériennes est difficile ou impossible [16].



**Figure 1.11** Constitution d'un câble souterrain isolé au polyéthylène réticulé Légende [15].

## 1.9.2. Les câbles Souterrains 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 [11]

### 1.9.2.1. La structure du câble haute tension en polyéthylène synthétique réticulé

#### a. 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. [6]



a. Câble de 225 KV d'un diamètre= 11cm      b. Câble de 400 KV d'un diamètre= 13cm

**Figure 1.12** Coupe en 2D des câbles THT pour réseaux souterrains [6]

### b. Les conducteurs segmentaires

Également appelés conducteurs "Milliken" (figure 1.13), sont composés de plusieurs conducteurs en forme de segments assemblés pour former un noyau cylindrique

#### ➤ Le conducteur

De grande section est divisée 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 [6].



a- Conducteurs ronds compacts

b- Les conducteurs segmentaire

**Figure 1.13** câbles à conducteur compacts et segmentaires [17].

#### ➤ 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

Le polyéthylène réticulé, également appelé XLPE, est un matériau isolant créé à la fois par la chaleur et la haute pression. Les premières méthodes de réticulation sont apparues dans les années 1930. En général, le polyéthylène a d'excellentes propriétés électriques, avec ses faibles pertes diélectriques, c'est un matériau isolant approprié pour la haute tension. La construction d'un câble XLPE est expliquée ci-dessous

Un câble XLPE typique est construit comme illustré à la figure 1.14 d'un conducteur (cuivre ou

aluminium), isolé avec du polyéthylène réticulé (XLPE), des fils blindés, puis blindé avec un écran métallique (aluminium ondulé et sans soudure ou fils de cuivre avec ruban de cuivre à hélice ouverte comme liant). Ensuite, il est recouvert de PVC ou de polyéthylène anticorrosion [11]

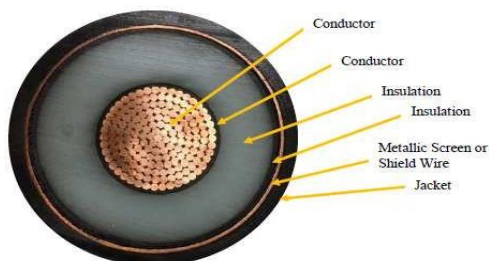
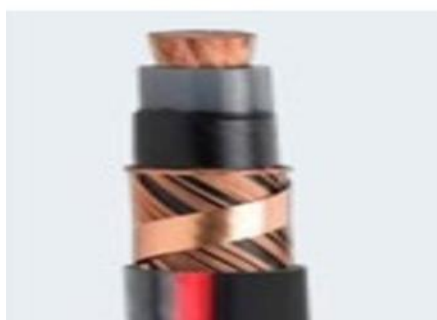


Figure 1.14 Couches de câbles XLPE. [11]

### 1.9.3. Les câbles souterraines Moyenne Tension MT [19]

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



a. Câble unipolaire



b. Câble Tripolaire

Figure 1.15 Câble Moyenne Tension MT [19]

### 1.9.4. Les câbles souterrains bas 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.

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 1.16).

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 [20].



Figure 1.16 Câbles bas Tension BT [21]

1.10. 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 [15]. Le choix d’un conduit s’effectue en fonction des influences externes du local, voir la figure 1.17 et le Tableau 1.4.

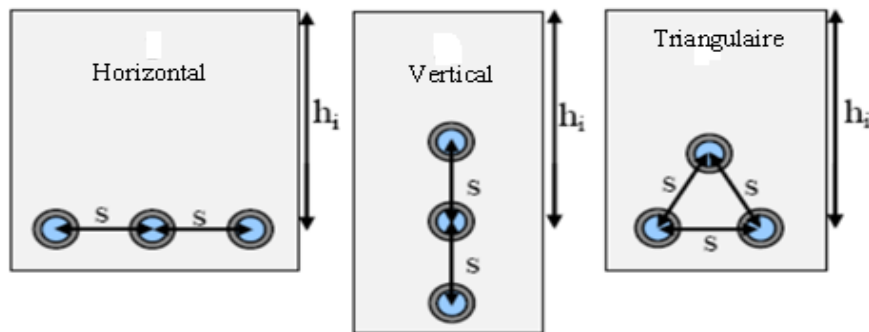


Figure 1.17 différentes configuration géométriques pour le souterrain triphasé. [3]

Tableau 1.4 Méthodes de pose des câbles souterrains [17]

Câbles enfouis directement dans la formation de trèfles	Câbles enfouis dans des conduits en formation de trèfle	Câbles directement enfouis en formation à plat
Câbles en l’air à l’intérieur d’une galerie en formation trilobite	Câbles enterrés à plat dans des conduits	Des câbles posés à plat dans une galerie

### **1.11. Conclusion**

Dans ce chapitre nous avons présentés une brève vision sur la classification, la nature, la composition, ainsi que la géométrie des câbles électriques souterrains des réseaux électriques. On a mentionné les avantages et inconvénients sous forme de comparaison entre les lignes aériennes et les câbles souterrains.

Dans le deuxième chapitre, nous allons présenter, l'état d'art sur les effets des champs électromagnétique et thermique sur les câbles souterrains et les différentes méthodes numériques utilisées pour l'évaluation de la répartition du potentiel et du champ électrique dans les câbles électriques.

## *Chapitre 2*

# Les champs électriques et magnétiques

# Chapitre 02

## LES CHAMPS ELECTRIQUES ET MAGNETIQUES

---

### 2.1. Introduction

Le champ électromagnétique est une combinaison de champs de force électriques et magnétiques. Ils sont générés naturellement ou à cause d'activités humaines. Le concept de champ est général et permet de rendre compte de manière quantitative des forces qui peuvent s'exercer sur certains objets, particules, ions, atomes, molécules, etc. À l'action de ces forces est associé un échange d'énergie entre l'objet que l'on considère, par exemple la molécule, et son environnement.

Il est donc naturel de rechercher des moyens permettant la visualisation de ces champs électromagnétiques. Dans notre deuxième chapitre on s'intéresse aux équations de Maxwell et aux modèles mathématiques des phénomènes électromagnétiques ainsi qu'une simple présentation des méthodes numériques de calculs du champ magnétique comme la méthode des éléments finis afin de visualiser et calculer la distribution des paramètres magnétiques autour et à proximité des câbles électriques.

### 2.2. Champ électromagnétique

Les champs électromagnétiques (CEM) sont tout aussi fondamentaux et présents dans la nature que le champ de gravitation. Sur terre, ces champs sont beaucoup plus intenses que le champ de gravitation car ce sont eux qui assurent la cohésion des atomes entre eux, ce qui permet de constituer des molécules et de manière générale la matière.

Le champ électrique et le champ magnétique, qui sont les deux composantes du champ électromagnétique, sont d'une manière générale intimement liés et permettent par exemple la propagation des ondes électromagnétiques avec lesquelles nous pouvons communiquer à distance. Ils ont néanmoins des propriétés différentes, qui dépendent en particulier de leur fréquence. Leur origine commune est la charge électrique [23].

Toute utilisation de l'électricité génère un champ électrique et un champ magnétique. L'intensité du champ est grande à proximité de sa source et diminue rapidement à mesure qu'on

s'éloigne de celle-ci. La notion de champ s'applique aussi à d'autres phénomènes physiques présents dans notre environnement habituel [22].

### 2.2.1. Champ électrique

Le champ électrique est le champ vectoriel qui résulterait de l'action à distance de particules électriquement chargées sur une particule test de charge unité au repos dans le référentiel d'étude. C'est donc la force subie par la particule au repos divisée par la charge de cette particule. Il s'agit d'un champ vectoriel qui à tout point de l'espace associe une direction, un sens, et une grandeur (amplitude).

Cependant, ce champ décroît comme l'inverse du carré de la distance  $r$  qui sépare la charge qui crée le champ de l'endroit où le champ est mesuré. Il est de plus proportionnel à la charge  $q$  qui le crée. Il s'exprime en volts / mètre (V/m)

$$E = \frac{k \cdot q}{r^2} \quad (2.1)$$

Avec :  $\mathbf{E}$  : champ électrique.  $q$  : charge électrique.  $r$  : distance

$k = 1 / 4\pi\epsilon_0$ .  $\epsilon_0 = 8.85 \cdot 10^{-12} \text{ F} \cdot \text{m}^{-1}$

### 2.2.2. Champ magnétique

Le champ magnétique (CM) exprime la force exercée entre deux charges électriques en mouvement. Il est lié au courant électrique qui définit la circulation des charges dans un élément conducteur. Ainsi, lorsqu'un appareil est allumé, il produit un champ magnétique et disparaît lorsque l'appareil est éteint. Contrairement au champ électrique, le champ magnétique n'est pas atténué par les arbres, les clôtures ou les bâtiments, et celui-ci traverse assez facilement la matière.

Le champ magnétique est noté  $\mathbf{H}$ . Cependant, on utilise souvent la quantité  $\mathbf{B}$  appelée induction magnétique ou densité de flux magnétique. Pour le quantifier, qui ne diffère du champ  $\mathbf{H}$  que par une constante de proportionnalité notée souvent  $\mu$ .  $\mathbf{B}$  s'exprime en teslas (T). Pour les mêmes raisons que pour le champ électrique, le champ magnétique décroît rapidement avec la distance et peut généralement être négligé à grande distance [22, 24]

## 2.3. Caractéristique du champ magnétique et électrique

La comparaison entre les caractéristiques des deux champs électrique et magnétique est résumée par le tableau suivant [25] :



**Tableau 2.1** Caractéristiques des champs électriques et magnétiques

Champ magnétique	Champ électrique
<ul style="list-style-type: none"> <li>✓ Il s'exprime en Ampères par mètre (A/m), Tesla (T), en Gauss (G).</li> <li>✓ La valeur du champ magnétique est en fonction de l'intensité du courant électrique circulant dans un conducteur. Plus l'ampérage est fort plus le champ magnétique est important : <math display="block">\int \vec{H} d\vec{l} = I</math></li> <li>✓ Le champ magnétique, nécessite de faire appel à des matériaux ferromagnétiques tels que le mu métal (alliage de nickel), le fer doux ou l'aluminium pour réduire sa valeur.</li> <li>✓ Les champs magnétiques diminuent avec l'éloignement de la source émettrice</li> <li>✓ Le champ magnétique favorise le courant dans une bobine métallique.</li> <li>✓ Les gens ne peuvent pas sentir la présence d'un champ magnétique.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>✓ Il s'exprime en Volt par mètre (V/m).</li> <li>✓ La valeur du champ électrique est en fonction du voltage de la source électrique considérée ; plus le voltage est élevé, plus l'environnement est fort. <math display="block">\int \vec{E} d\vec{l} = V</math></li> <li>✓ Le champ électrique est facilement arrêté par les matériaux classiques de construction (briques, béton,).</li> <li>✓ Les champs électriques diminuent avec l'éloignement de la source émettrice.</li> <li>✓ Le champ électrique favorise une charge sur les objets métalliques non mis à la terre dans le champ.</li> <li>✓ Les gens peuvent détecter la présence de quelque champ électrique par la sensation établi par les petites poiles du corps humain.</li> </ul>

## 2.4. Les effets des champs électriques et champs magnétiques

### 2.4.1. 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  $\mu$ T et 5.000  $\mu$ T des effets biologiques mineurs ont été rapportés.
- Pour des champs magnétiques à 50 Hz compris entre 5.000  $\mu$ T et 50.000  $\mu$ T on recense des effets sur le système nerveux et la vision.
- Pour des champs magnétiques à 50 Hz compris entre 50.000  $\mu$ T et 500.000  $\mu$ 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  $\mu$ T une fibrillation ventriculaire a été rapportée [26].

### 2.4.2. 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 [26].

## 2.5. 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 2.2 :

**Tableau 2.2** Champ magnétique d'une ligne souterraine [27]

Tension	l'axe	5 m	10 m
400 kV	<b>13,2 <math>\mu</math>T</b>	<b>2,7 <math>\mu</math>T</b>	<b>0,7 <math>\mu</math>T</b>
225 kV	<b>11,5 <math>\mu</math>T</b>	<b>2 <math>\mu</math>T</b>	<b>0,6 <math>\mu</math>T</b>
63/90 kV	<b>8,6 <math>\mu</math>T</b>	<b>1,4 <math>\mu</math>T</b>	<b>0,4 <math>\mu</math>T</b>

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. [29]

### 2.5.1. Différence entre le profil de champ d'une ligne aérienne et d'un câble souterrain

La figure ci-contre illustre la différence de champ magnétique en-dessous d'une ligne aérienne à 150 kV transposée ainsi qu'au-dessus d'un câble souterrain à 150 kV, mesuré respectivement à 1,5 m du sol et au niveau du sol remarquez la figure I.17. Le champ maximal au niveau du sol, juste au-dessus de l'axe du câble souterrain, peut être jusqu'à 2 fois supérieur qu'en-dessous d'une ligne aérienne. Cependant, il décroît très rapidement. Ainsi à 10 mètres de distance de l'axe du câble souterrain, le champ est déjà insignifiant [29]

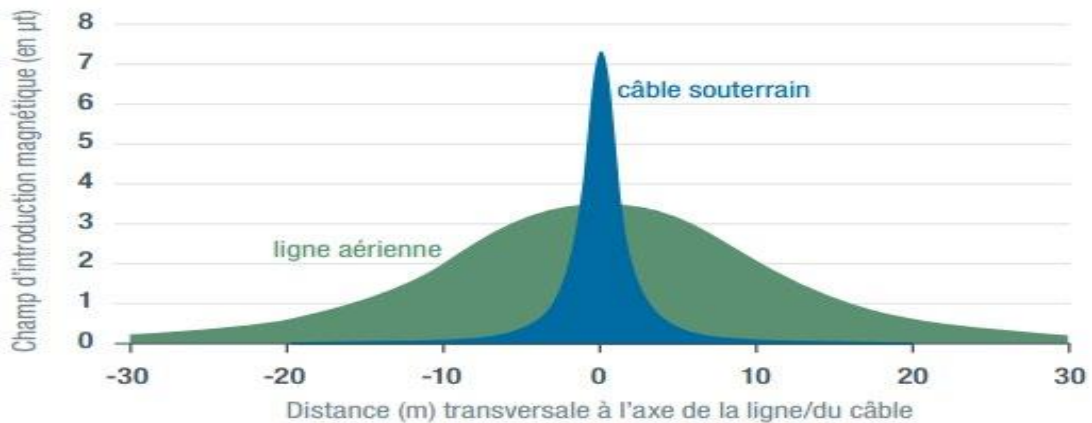


Figure 2.1 Différence entre le champ d'une ligne aérienne et d'un câble souterrain [30]

## 2.6. Equations de Maxwell

Les équations de base utilisées pour calculer le potentiel (champ électrique), sont les équations de Maxwell. Celles-ci sont formées par quatre équations aux dérivées partielles qui lient les phénomènes magnétiques caractérisés par le champ magnétique  $\vec{H}$  et l'induction magnétique  $\vec{B}$  aux phénomènes électriques caractérisés par le champ électrique  $\vec{E}$  et l'induction électrique  $\vec{D}$ . Ces quatre équations sont :

$$\operatorname{div} \vec{D} = \rho \quad (2.2)$$

$$\operatorname{rot} \vec{E} = - \frac{\partial \vec{E}}{\partial t} \quad (2.3)$$

$$\operatorname{rot} \vec{H} = \vec{j} + \frac{\partial \vec{D}}{\partial t} \quad (2.4)$$

$$\operatorname{div} \vec{B} = \vec{0} \quad (2.5)$$

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/m<sup>2</sup>).

$\vec{D}$ : Induction électrique en (C/m<sup>2</sup>).  $\rho$ : Densité de charge volumique en (C/m<sup>3</sup>).

$\frac{\partial \vec{D}}{\partial t}$ : Densité de courant de déplacement en (A/m<sup>2</sup>)

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 :

### 2.6.1. Propriétés magnétiques

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

Relation magnétique

$$\vec{B} = \mu_0 \vec{H} + \vec{B}_r \quad (2.6)$$

Induction du champ magnétique

$$\mathbf{B} = \mu \mathbf{H} \quad (2.7)$$

Où :  $\mu = \mu_0 \mu_r$  Pour un milieu magnétique

$\mu_r$  : Perméabilité relative du milieu considéré ( $\mu_r = 1$  pour un milieu magnétique)

$\mu_0 = 4\pi 10^{-7}$  Perméabilité du vide (H/m) [31].

### 2.6.2. Caractéristiques diélectrique

Induction du champ électrique est donnée par :

Relation diélectrique

$$\vec{D} = \varepsilon \vec{E} \quad (2.8)$$

Où :

$\varepsilon = \varepsilon_0 \varepsilon_r$  avec  $\varepsilon_0$  : Permittivité de l'air et  $\varepsilon_r$  : Permittivité relative du milieu considéré (F/m).

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

$$\vec{j} = \sigma \vec{E} \quad (2.9)$$

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:

$$\vec{j} = \vec{j}_s + \vec{j}_{ind} \quad (2.10)$$

$\vec{j}_s$  : la densité de courant imposée dans l'inducteur et  $\vec{j}_{ind}$  : la densité du courant induit.

$$\vec{j}_{ind} = \sigma [\vec{E} + \vec{v} \wedge \vec{B}] \quad (2.11)$$

Où  $\sigma$  la conductivité électrique en (S/m),  $v$  : le vecteur de 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 [32].

## 2.7. Conditions aux limites

Les équations de Maxwell permettent de déterminer la manière dont les composantes du Champ électromagnétique se conservent (ou non) à l'interface de deux milieux présentant des propriétés diélectriques différentes. Il est alors d'usage de décomposer le champ Électromagnétique en deux composantes particulières : l'une tangente, et l'autre normale à la surface de séparation. Ce procédé a permis de dégager des résultats importants à propos des conditions aux Limites à la surface de séparation des deux milieux. Ces résultats concernent les composantes Tangentielles et normales, à la surface de séparation du champ électromagnétique. [33]

## 2.8. Types des méthodes numériques

Les méthodes de résolution des E D P s 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)

L'objectif d'utilisation des méthodes numériques de discrétisation a 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.

### 2.8.1. Méthode des Différences Finis (MDF)

Cette méthode est basée sur le théorème de Taylor avec un opérateur aux différences. Leur principe c'est de découper au moyen d'une grille carrée dans le cas bidimensionnel et une grille cubique dans le cas tridimensionnel, l'équation à résoudre est écrite pour chaque point ou nœud de maillage, on obtiendra un système d'équations possédant un nombre d'équations égal au nombre de nœuds de la grille. Cette méthode est basée sur la transformation de l'opérateur différentiel en un opérateur aux différences où chaque dérivée est approchée par une différence de valeurs de l'inconnue aux nœuds du domaine de résolution. [34].

### 2.8.2. Méthode des intégrales de frontières (MIF)

La Méthode des intégrales de frontières permet de ramener le maillage à la frontière du domaine. L'avantage du calcul des valeurs de l'inconnue sur les frontières du domaine suffit pour obtenir la solution en tout point du domaine à travers le théorème d'Ostrogradski-Green. Cette méthode est très utilisée pour les structures tridimensionnelles ou lorsque l'air ou les milieux passifs occupent une grande partie du domaine d'étude. L'inconvénient de cette méthode est l'augmentation du temps de calcul, donc le coût de calcul et de conduire à un système algébrique à une matrice pleine (pas de termes nuls). [18]

### 2.8.3. Méthode des Volumes Finis (MVF)

La Méthode des Volumes Finis se déduit de la MDF. Le domaine d'étude ( $\Omega$ ) est divisé en un nombre d'éléments finis à quatre nœuds, dans le cas bidimensionnel axisymétrique, un volume fini entoure chaque nœud principal.

L'équation différentielle est projetée sur une fonction de projection et puis intégrée dans chacun des volumes élémentaires du milieu.

Le calcul de l'intégrale d'un volume élémentaire, la fonction inconnue est représentée à l'aide d'une fonction d'approximation (linéaire, parabolique, puissance, exponentielle, etc.) entre deux nœuds consécutifs, et puis la forme intégrale est discrétisée dans le domaine d'étude.

Cette méthode existe depuis une vingtaine d'années elle est très utilisée en mécanique des fluides, sa solution est plus précise que celle fournie par la MDF. L'équation discrète obtenue exprime le principe de conservation de la fonction sur le volume de contrôle. [18]

### 2.8.4. Méthode des Eléments Finis (MEF)

La méthode des éléments finis est utilisée pour la résolution des équations aux dérivées partielles dans les domaines des sciences de l'ingénieur. Elle consiste à utiliser une approximation simple de l'inconnue pour transformer les équations aux dérivées partielles en un système d'équations algébriques. Toutefois, elle ne s'applique pas directement aux dérivées partielles mais à une formulation intégrale qui est équivalente aux problèmes à résoudre. L'évolution technologique connue en informatique a mis à notre disposition de nombreux logiciels d'éléments finis dédiés à plusieurs secteurs de recherche (COMSOL MULTIPHYSICS, Flux 2D, etc.).

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 (figure 2.3) :

Élément linéique (1D), élément surfacique (2D) et élément volumique (3D).

Pour notre cas le domaine d'étude, soit à deux dimensions, on rencontre le plus souvent des éléments linéaires, quadratiques ou cubiques. Pour aboutir à une meilleure exactitude de la solution, on procède à raffiner le maillage. [11]

#### ***2.8.4.1. Les Avantages de la MEF***

- La flexibilité est l'un des plus importants avantages de la M.E.F. Les éléments peuvent avoir plusieurs formes variées et peuvent donc s'adapter facilement à n'importe quelles formes géométriques complexes et aussi tenir compte des propriétés inhomogènes et non linéaires des matériaux ;
- Les matrices formant le système final d'équations sont symétriques ce qui simplifie grandement la résolution de celui-ci ;
- La programmation de la méthode est assez simple surtout lorsqu'il s'agit de tenir compte de l'introduction des conditions aux limites ;
- La M.E.F a fait ses preuves dans beaucoup de domaines en ingénierie. De plus, avec son développement important, il existe de très bons logiciels commerciaux qui sont basés sur cette méthode et qui la rendent très accessible ;

Par conséquent, elle est applicable à beaucoup de problèmes sans que nous connaissions nécessairement la M.E.F en détail. [35]

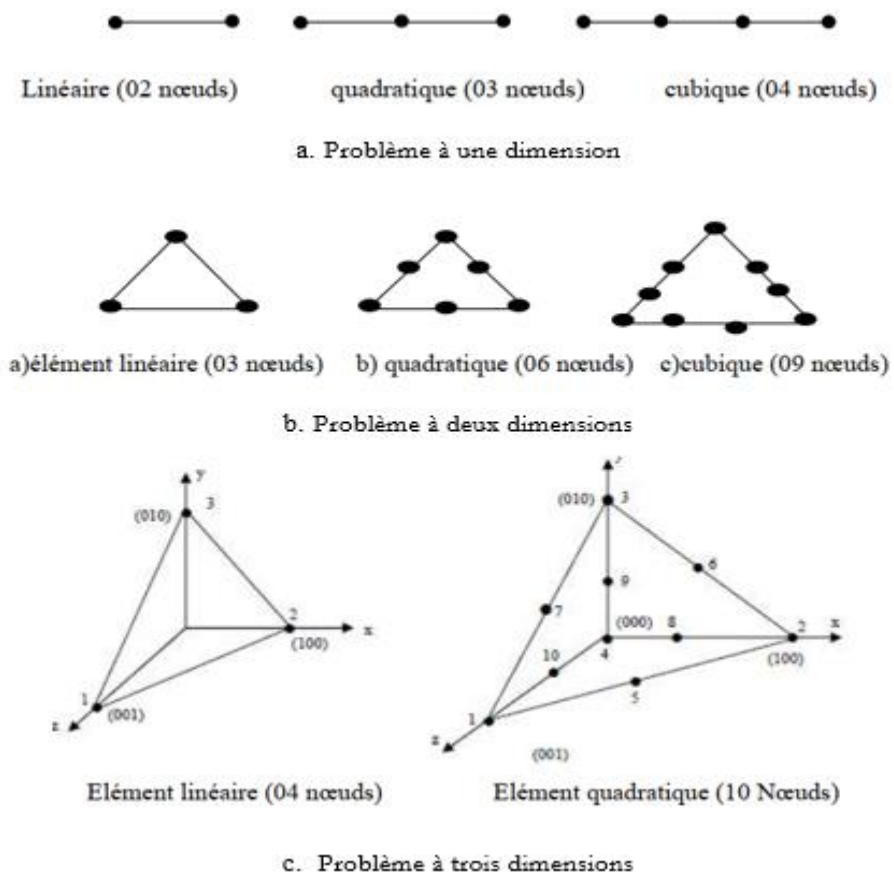


Figure 2.2 Discretisation du domaine d'étude (maillage)

2.8.4.2. Les Inconvénients de la MEF

- La modification d'une partie de la géométrie entraîne un nouveau maillage et, donc, une remise à zéro dans les calculs.
- Un mauvais choix du maillage proposé automatiquement par les logiciels, limite la précision des résultats. L'utilisateur doit donc porter une attention particulière lors de cette étape ;
- Il a été dit que la M.E.F était une méthode flexible car elle s'adapte facilement aux différentes géométries, mais ce n'est pas le cas du maillage car celui-ci doit être entièrement refait si une modification sur une partie de la géométrie du problème considéré intervient ;
- Le traitement d'une problématique par la MEF implique une connaissance parfaite du domaine géométrique et des conditions aux limites. Ce qui complique la mise en œuvre de ce traitement lorsque ce n'est pas le cas ;
- Une fois le potentiel connu en chaque nœud, il faut procéder à un autre calcul numérique pour déterminer le champ électrique en tout point ce qui peut engendrer d'autres erreurs. [35]



## 2.9. Conclusion

L'objectif, de ce chapitre est de donner une vision générale sur le champ électromagnétique dans les câbles et leurs effets ainsi que Les techniques de résolutions des équations aux dérivées partielles. Enfin on a présenté La méthode des éléments finis semble présenter des avantages importants par rapport aux autres méthodes. Elle s'adapte facilement aux différentes géométries et tient compte aussi des propriétés inhomogènes et non linéaires des matériaux. C'est pourquoi cette méthode a été retenue pour réaliser les différentes simulations dans le chapitre suivant, par l'exploitation du logiciel COMSOL MULTYPHYSIC.

# *Chapitre 3*

*Simulation électromagnétique  
Et thermique  
Dans les câbles souterrains*

# Chapitre 03

## SIMULATION ELECTROMAGNETIQUE ET THERMIQUE DANS LES CABLES SOUTERRAINS

---

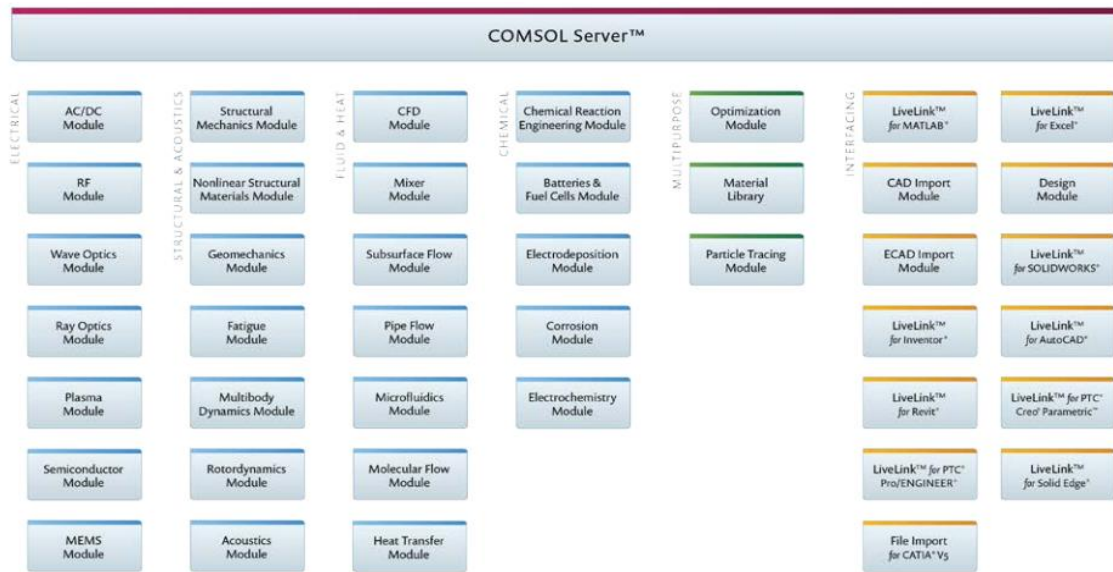
### 3.1. Introduction

Pendant les dernières décennies, beaucoup de chercheurs dans le monde entier ont essayé d'analyser et d'étudié les caractéristiques magnétiques et thermiques des câbles électriques ainsi que les performances des câbles souterrains compte tenu de leur conception, de leur fiabilité, de leur durée de vie, coûts de fabrication et d'installation. Dans ce chapitre nous allons faire des simulations des câbles électriques avec la méthode des éléments finis à l'aide du logiciel COMSOL MULTIPHASIQUES comme méthode numérique pour étudier l'effet électromagnétique et thermique autour et près des câbles électrique souterrain dans des déférents conditions.

### 3.2. Description du logiciel COMSOL MULTIPHASIQUES

Pour la simulation des caractéristiques électromagnétiques des câbles électriques, il existe plusieurs facteurs qui influent sur ce phénomène tels que : la tension et l'intensité du courant électrique la nature des matériaux des câbles électriques, la distance entre les câbles...etc.

Pour la conception de notre étude on a utilisé le logiciel **COMSOL MULTIPHYSICS**. C'est un logiciel conçu par l'entreprise « COMSOL » qui est fondée en 1986. Elle se spécialise dans le domaine de développement de logiciels de support technique et de formation spécialisé et de conseil. Le logiciel est utilisé par plusieurs grandes entreprises à travers le monde. Vous pouvez modéliser et simuler tout système basé sur la physique en utilisant un logiciel de COMSOL®. Il comprend l'interface COMSOL Desktop® utilisateur graphique (GUI) et un ensemble d'interfaces d'utilisateur prédéfinis avec des outils de modélisation associés, appelés interfaces de physique, pour la modélisation des applications courantes. Une suite de produits add-on élargit cette plate-forme de simulation multiphasique pour la modélisation des domaines d'application spécifiques ainsi que l'interface avec des logiciels tiers et de leurs capacités. COMSOL MULTIPHYSICS est nécessaire pour exécuter l'un des produits add-on



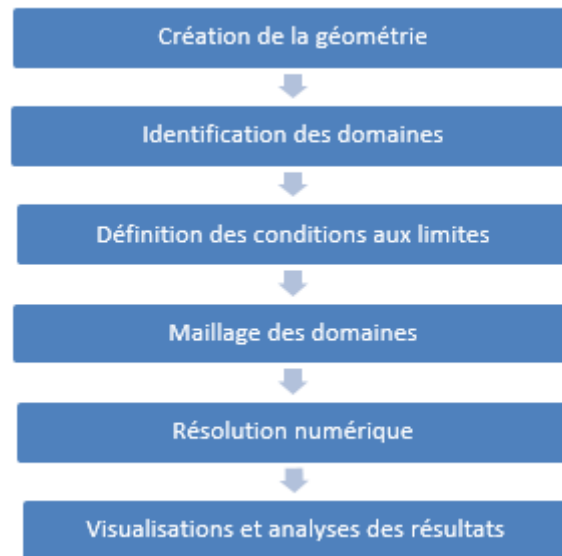
**Figure 3.1** Produits offert par COMSOL

La notion de multi-physique est représentée dans la combinaison de plusieurs phénomènes physiques lors de la description d'un processus. On peut décrire mathématiquement des phénomènes physiques très différents par les mêmes équations générales. Alors que des géométries et des phénomènes complexes nécessitent la modélisation avec des équations complexes et des conditions aux limites, COMSOL MULTIPHYSICS offre un couplage des différentes formulations physiques (multiphasiques) simple. Le résultat de ses systèmes sont des équations qui peuvent être résolues de façon séquentielle ou dans une formulation entièrement couplée.

Multiphasiques étendus : Physique dans différentes géométries peuvent être facilement combinés. Ces variables de couplage peuvent également être utilisés pour lier des physiques ou des géométries différentes comme dans notre cas. Lors de la modélisation et les simulations, ces descriptions sont basées sur les lois de la physique. [36]

### 3.2.1. Procédure de simulation sous COMSOL MULTIPHYSICS

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



**Figure 3.2** Diagramme de différentes étapes de résolution dans COMSOL. [37]

### ***3.2.1.1. Choix du modèle***

Nous allons commencer par le choix du modèle. Lancez donc le module électrostatique (es) dans le navigateur de modèle. Nous allons ici nous limiter à une étude à 2D.

### ***3.2.1.2. Géométrie***

La première chose à faire une fois le programme ouvert est de dessiner la géométrie de notre système (câble électriques).

### ***3.2.1.3. Introduction des propriétés des domaines***

Le but ici est de définir les paramètres physiques qui définissent le domaine : la constante diélectrique, la conductivité, etc. Les paramètres sont évidemment liés à notre modèle physique étudié.

Pour résoudre les Équation aux dérivées partielles (EDP), il est nécessaire de définir un certain nombre de conditions aux limites cohérentes.

A chaque frontière de domaine est associé un segment orienté. Il est possible de donner des valeurs de condition aux limites pour chacun de ces segments. Les options seront différentes suivant qu'il s'agisse ou non d'une frontière intérieure au système. [38]

### ***3.2.1.4. Maillage des domaines***

Un maillage est une partition de l'espace ou d'un domaine en cellules élémentaires.

- Le maillage des domaines est automatique,
- Il est possible de le raffiner globalement ou de manière localisée. [39]

### ***3.2.1.5. Résolution du problème***

Lorsque le problème est complètement défini, il ne reste plus qu'à le résoudre. Il est

possible d'accéder à des menus pour modifier la résolution. De même, lors de la résolution d'un problème multi- physique, il est possible de ne résoudre que pour une certaine partie des variables. [39]

#### **3.2.1.6. Analyse des résultats**

Lorsque le programme a convergé vers une solution, il bascule automatiquement vers la fenêtre de post traitement, qui permet d'analyser les résultats. Il est possible de les visualiser sous forme de remplissage de couleur, de lignes de courant, de champ de flèches, etc.... [40]

### **3.2.2. Avantages de conception avec COMSOL MULTIPHYSICS**

Le principal but de la création de COMSOL Multiphasiques est d'avoir un logiciel où les scientifiques et les ingénieurs peuvent formuler, à l'aide de l'interface utilisateur, n'importe quel système d'équations aux dérivées partielles (EDP) sur la base des lois de la physique et surtout de se baser sur les zones les plus communes dans la physique et en génie.

Cette interface est basée sur un interpréteur d'équation qui formule une discrétisation par éléments finis, "à la volée", par le système entièrement couplé.

Des interfaces de modélisation prédéfinies pour les différents domaines de la physique appliquée, y compris des couplages multi physiques.

Grâce à la technologie sous-jacente, les propriétés, les sources, les puits et les conditions aux limites peuvent être des fonctions des variables modélisées et leurs dérivées partielles.

Les équations complètes sont également disponibles dans l'interface utilisateur pour une manipulation. [38]

Il a été retenu pour les raisons suivantes :

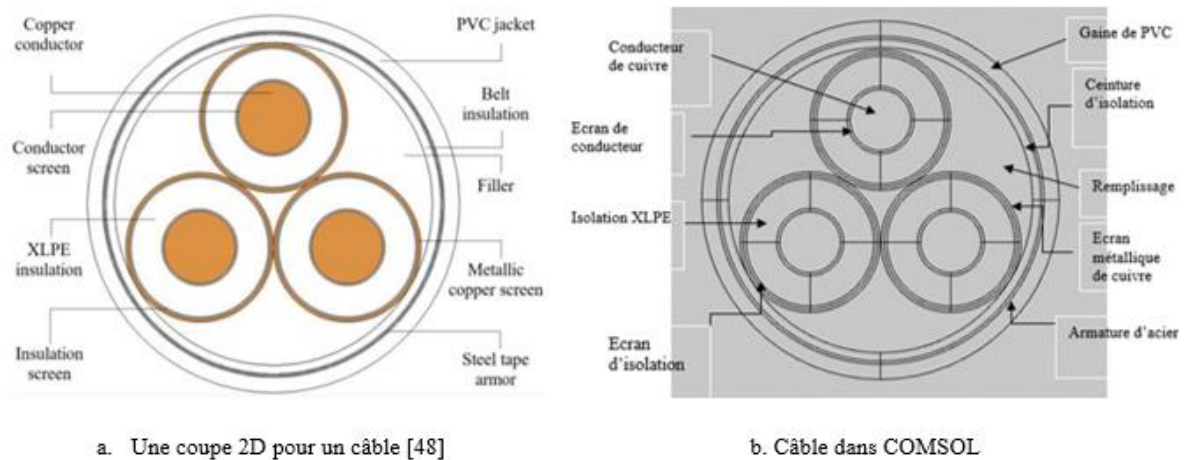
- Il est spécialisé dans la résolution de problèmes électromagnétiques,
- Il permet de prendre en compte la présence de plusieurs diélectriques,
- Il permet de modéliser une surface conductrice de faible épaisseur (couche de pollution),
- Il permet de travailler en régime statique ou quasi-statique (50 Hz),
- Enfin, il permet une modélisation rapide du problème. [41]

### 3.3. Procédure de simulation électromagnétique et thermique d'un câble souterrain

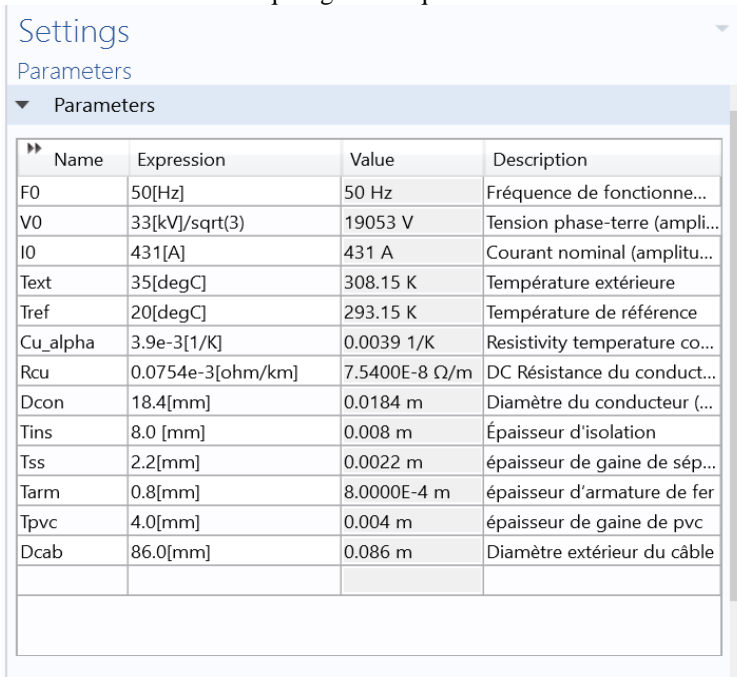
Les câbles électriques souterrains sont caractérisés par des formes géométriques et des dimensions différentes selon la puissance et les tensions véhiculées à travers ces câbles électriques. Une très bonne modélisation des caractéristiques des câbles électriques dépend de plusieurs paramètres comme : les caractéristiques des câbles électriques (conductivité, forme du fil, section transversale, etc),

#### 3.3.1. Dessin et dimension de la géométrie du système

Cette étape consiste à dessiner la forme géométrique et représenter le modèle en deux dimensions dans une interface graphique (le domaine d'étude) du logiciel COMSOL. La simulation est réalisée sur un câble tripolaire blindé de 33KV, de  $240 \text{ mm}^2$  de section. Il est composé de trois conducteurs de cuivres avec un écran métallique. Le câble enterré à une profondeur de 0.8 m comme montré dans la figure 3.3 et Les paramètres de ce câble sont donnés dans le tableau 3.1



**Figure 3.3** La géométrie du câble

**Tableau 3.1** Caractéristiques géométriques de câble.


Name	Expression	Value	Description
F0	50[Hz]	50 Hz	Fréquence de fonctionne...
V0	33[kV]/sqrt(3)	19053 V	Tension phase-terre (ampli...
I0	431[A]	431 A	Courant nominal (amplitu...
Text	35[degC]	308.15 K	Température extérieure
Tref	20[degC]	293.15 K	Température de référence
Cu_alpha	3.9e-3[1/K]	0.0039 1/K	Resistivity temperature co...
Rcu	0.0754e-3[ohm/km]	7.5400E-8 Ω/m	DC Résistance du conduct...
Dcon	18.4[mm]	0.0184 m	Diamètre du conducteur (...)
Tins	8.0 [mm]	0.008 m	Épaisseur d'isolation
Tss	2.2[mm]	0.0022 m	épaisseur de gaine de sép...
Tarm	0.8[mm]	8.0000E-4 m	épaisseur d'armature de fer
Tpvc	4.0[mm]	0.004 m	épaisseur de gaine de pvc
Dcab	86.0[mm]	0.086 m	Diamètre extérieur du câble

### 3.3.2. Les propriétés du matériau de la géométrie étudiée

Le câble utilisé dans notre étude comporte trois conducteurs en cuivre et des systèmes d'isolation. Cependant, les systèmes d'isolation principalement comprennent trois parties ; l'isolation du conducteur, l'isolation de ceinture et le matériau de remplissage dans l'interstice entre les noyaux. L'isolation le conducteur est de polyéthylène réticulé (XLPE) tandis que le remplissage et la ceinture l'isolation est d'éthylène propylène (EPR). Dans les câbles souterrains, les matériaux semi-conducteurs sont largement utilisés pour atténuer le stress électrique à les interfaces entre le conducteur et l'isolation et entre l'isolation et l'écran métallique de cuivre comme illustré à la Figure3.3 est de l'éthylène acétate de vinyle (EVA).

La gaine métallique d'un tel câble consiste en une double armure en ruban d'acier recouvert d'une gaine extérieure en PVC pour protéger contre les risques environnementaux. Les caractéristiques du sol, telles que son type et teneur en humidité, contrôle la distribution de chaleur à l'extérieur de la surface câble.

Les paramètres physiques des matériaux utilisés pour ce calcul sont résumés dans le tableau 3.2.



**Tableau 3.2** les caractéristiques des matériaux utilisés dans le câble

Matériau	Densité ( $\text{kg/m}^3$ )	La capacité thermique ( $\text{J}/(\text{kg}\cdot\text{K})$ )	Permittivité relative	Conductivité thermique ( $\text{W}/(\text{m}\cdot\text{K})$ )
<b>Cuivre</b>	8700	385	1	400
<b>EVA</b>	925	1400	2.25	0.34
<b>XLPE</b>	930	1900	2.3	0.286
<b>EPR</b>	860	2000	2.35	0.286
<b>ACIER</b>	7780	460	1	18
<b>PVC</b>	1760	900	2.9	0.2
<b>TERRE</b>	770	1500	4	0.667

### 3.3.3. Les conditions aux limites [42]

Les conditions aux limites sont d'une importance cruciale avec les équations décrivant le modèle de chauffage électromagnétique. Depuis le champ magnétique peut s'étendre à l'extérieur de câble avec ruban de blindage en cuivre, un domaine relativement vaste de le sol à l'extérieur du câble a été modélisé.

Cependant, la taille de la région du sol a été choisie par étudier une région de plus en plus grande afin de réduire la différence d'erreur pour qu'elle soit inférieure à  $10^{-4}$  entre les deux simulations consécutives lorsque augmentant la taille de la région. Le magnétique potentiel aux limites du sol, qui fixe la composante tangentielle du potentiel magnétique est considéré comme nul comme suit

$$n \times A = 0 \quad (3.1)$$

Où  $n$  est le vecteur composant normal. Dans ce modèle, la température ambiante du sol au niveau du sol est fixé à  $20^\circ\text{C}$  et le flux calorifique la continuité a été envisagée à la séparation surface entre deux matériaux différents comme suit

$$K_1 \frac{\partial T}{\partial n} = K_2 \frac{\partial T}{\partial n} \quad (3.2)$$

Où  $K_1$  et  $K_2$  sont les conductivités thermiques des deux médias adjacents 1 et 2, respectivement. Dans ce modèle, la température ambiante du sol est fixé à  $20^\circ\text{C}$  et le calorifique la continuité du flux a été considérée au surface de séparation entre deux surfaces différentes matériaux.

Généralement, on rencontre deux types de conditions aux limites

- **Condition de type Dirichlet :**

La fonction inconnue doit être spécifiée sur les limites :

$$\vec{A} = 0 \quad (\text{Condition de Dirichlet homogène})$$

$$\vec{A} \neq 0 \quad (\text{Condition de Dirichlet non homogène})$$

- **Condition de type Newman :**

Elle exprime la variation de la fonction inconnue à une surface :

$$\left(\frac{\vec{\partial A}}{\partial t}\right) = 0 \quad (\text{Condition de Newman homogène})$$

$$\left(\frac{\vec{\partial A}}{\partial t}\right) \neq 0 \quad (\text{Condition de Newman non homogène})$$

$\vec{n}$  : est la normale (exprime la nullité ou la constance de la dérivée normale à la frontière. [43])

### 3.3.4. Le maillage des câbles électriques souterrains

Pour augmenter la précision du calcul, un raffinement de maillage non uniforme processus est une base pour une analyse plus approfondie alors que le maillage de taille minimale près des frontières et donc des gradients plus élevés de manière significative influencer la précision du calcul. En outre, le maillage de taille minimale est soumis à une étude paramétrique afin de réduire l'erreur différence entre deux séries consécutives de simulation. Cependant, cette différence était inférieure à  $10^{-4}\%$  sans aucun effet considérable impact sur le champ calculé ou la distributions thermique en masse de matières. [44]

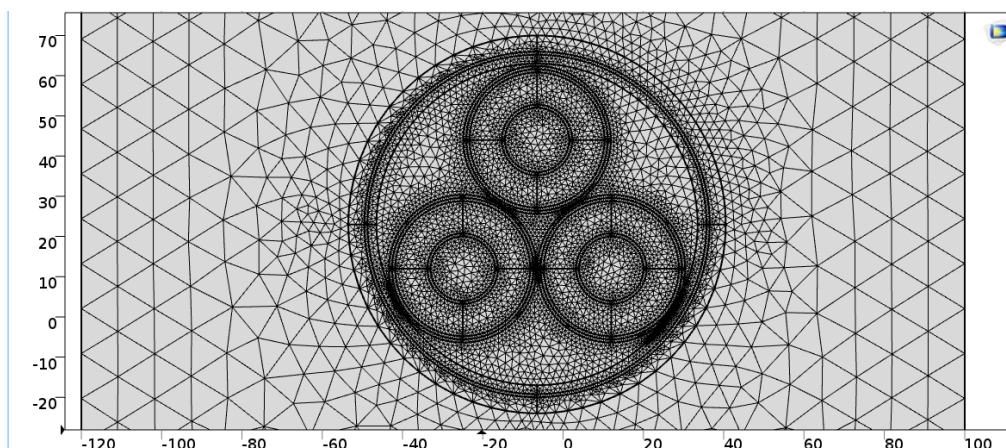


Figure 3.4 Maillage de câble.

### 3.3.5. Résolution par la méthode des éléments finis

En général, les mécanismes de transfert de chaleur comprennent conduction, convection et rayonnement. Quand les câbles sont directement enterrés, le transfert de chaleur principalement dépend du mécanisme de conduction dû aux caractéristiques thermiques du sol et profondeur d'enfouissement, alors que la convection due à l'air et au soleil l'effet de rayonnement peut être ignoré. [1]

#### a- Modèle thermique :

Par conséquent, l'équation de transfert de la chaleur dépendante du temps a la forme suivante :

$$Q(T, Q) = \rho C_p \frac{\partial T}{\partial t} - \nabla \times (K \nabla T) \quad (3.3)$$

$Q$  : source de chaleur ( $W/m$ ).  $T$  : température de conducteur (K).

$A$  : vecteur de potentiel magnétique.  $\rho$  : Densité de masse ( $Kg/m^3$ )

$C_p$  : Capacité thermique ( $J/Kg.m$ ).  $K$  : conductivité thermique ( $W/m.K$ ).

La source de chaleur  $Q$  intègre généralement tout échauffement résistif et pertes magnétiques par le théorème de Poynting Cela peut être calculé à partir de la définition de vecteur de potentiel magnétique et l'application de la loi de Maxwell Ampère en tenant compte de la dépendance à la température de l'électricité conductivité comme suit :

$$\sigma = (\rho_0(1 + \alpha(T - T_0)))^{-1} \quad (3.4)$$

$$J = j\omega\sigma A + \omega^2 \varepsilon A + J_e \quad (3.5)$$

$$J_e = (j\omega\sigma - \omega^2 \varepsilon)A + \nabla \times (\mu^{-1} \nabla \times A) \quad (3.6)$$

$$Q = \frac{1}{2} R_e(J \cdot (-j\omega A)^*) + \frac{1}{2} R_e(j\omega B \cdot H^*) \quad (3.7)$$

$\sigma$  : Conductivité électrique ( $S/m$ ).  $\rho_0$  : résistivité de référence ( $\Omega.m$ )

$\alpha$  : Coefficient de température de résistance ( $K^{-1}$ ).

$T_0$  : température de référence ( $293^\circ k$ ).

$J$  : densité de courant total ( $A/m^2$ ).

$J_e$  : Densité de courant due à une source externe ( $A/m^2$ ).

$\omega$  : La fréquence angulaire ( $rad/s$ ).  $\varepsilon$  : Permittivité ( $F/m$ ).

$\mu$  : Perméabilité ( $H/m$ ).  $R_e$  : Opérateur réel de grandeur complexe.

De plus, pour une fréquence fixe et relative déphasage de  $120^\circ$  entre les phases, le résultat de la répartition des courants triphasés dépend la conductivité et la perméabilité de chaque couche de matérielle d'un câble souterrain par la peau et effets de proximité.

### b- Modèle électromagnétique :

L'analyse électromagnétique présentée dans ce mémoire est basée sur les hypothèses suivantes [45,46]

- 1) Les câbles sont droits et infiniment longs, de sorte que le problème devient bidimensionnel.
- 2) Les courants de phase sont sinusoïdaux et équilibrés.
- 3) Tous les matériaux ont des propriétés électriques constantes, sauf que la conductivité électrique  $\sigma$  dépend de la température comme suit :

$$\sigma = \frac{1}{\rho_{20}(1+\alpha_{20}(T-20))} \quad (3.8)$$

Où T est la température du matériau,  $\rho_{20}$  et  $\alpha_{20}$  sont respectivement la résistivité électrique et le coefficient de température du matériau à  $20^\circ\text{C}$ .

- 4) Les conductivités électriques du sol sont ignorées.

Sous les hypothèses ci-dessus, la diffusion des courants de Foucault dans le plan bidimensionnel (x-y) peut être décrite par les équations suivantes [52].

$$\frac{\partial}{\partial x} \left( \frac{1}{\mu} \frac{\partial A}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left( \frac{1}{\mu} \frac{\partial A}{\partial y} \right) = -J + j\omega\sigma A \quad (3.9)$$

$$\nabla \times H = J \quad (3.10)$$

$$B = \nabla \times A \quad (3.11)$$

$$J = \sigma E + j\omega D + \sigma v \times B + J_e \quad (3.12)$$

$$E = -j\omega A \quad (3.13)$$

$$-j\omega\sigma A + J_s = J \quad (3.14)$$

Ou A et  $J_s$  sont la composante orientée z du potentiel vectoriel complexe et de la densité de courant de la source d'excitation respectivement.  $\mu$  Et  $\omega$  sont la perméabilité et la fréquence angulaire respectivement.

### 3.4. Résultats et discussion

De plus, pour une fréquence fixe et déphasage relative de  $120^\circ$  entre les phases, le résultat de la répartition des courants triphasés dépend la conductivité et la perméabilité de chaque couche de matérielle d'un câble souterrain par la peau et effets de proximité.

Pour référence cas de simulation, la perméabilité relative de l'armure en ruban d'acier est constante et égale 500

### 3.4.1. Champ magnétique et pertes résistives

Les équations de Maxwell dans le domaine fréquentiel contrôlé la diffusion du champ électromagnétique à l'intérieur de câble et le sol environnant à cause d'application du courant sur le conducteur. Avec l'amplitude spécifiée de chaque courant porté et des angles de phase de  $0^\circ$  pour le haut,  $120^\circ$  pour la droite et  $-120^\circ$  pour les conducteurs gauches dans le cas de fréquence angulaire (50 Hz), la densité total du courant est basée sur le courant de la source et le courants de Foucault induits.

La figure 3.5 montre la distribution de la densité du courant à l'intérieur des parties métalliques du câble. La distribution de la densité de courant non linéaire est observée dans les conducteurs adjacents en raison d'effets de peau et de proximité de l'écoulement courants d'âme qui induisent des courants de Foucault dans tous les parties métalliques du câble. Cependant, la densité de courant non uniforme à l'intérieur des conducteurs et leurs écrans métalliques de cuivre peuvent être attribués au courant de phénomène de déplacement qui diverge les courants à l'intérieur des adjacents des conducteurs. On remarque que les valeurs maximales de la densité du courant de Foucault au niveau des conducteurs suivis de la plus proche limites de la gaine de cuivre au ruban d'acier blindage avec déphasage de  $120^\circ$  de chacun.[47]

Ce déphasage constant a pour effet de transfert de puissance constante sur chaque courant cycle.

La figure 3.6 montre la distribution des pertes résistives dues aux distributions de courant par flèche proportionnelle à l'intensité du champ magnétique à l'intérieur du câble et le sol environnant. Il est clair que les pertes résistives suivent la même tendance de distribution du courant comme observé précédemment (la figure3.8). Cependant, sa valeur dépend de distribution du courant et la résistance spécifique des pièces métalliques et sa variation avec la température. Il convient de mentionner que les pertes dans l'écran de cuivre (gaine) de chaque noyau dépendent également de l'arrangement de liaison. [1]

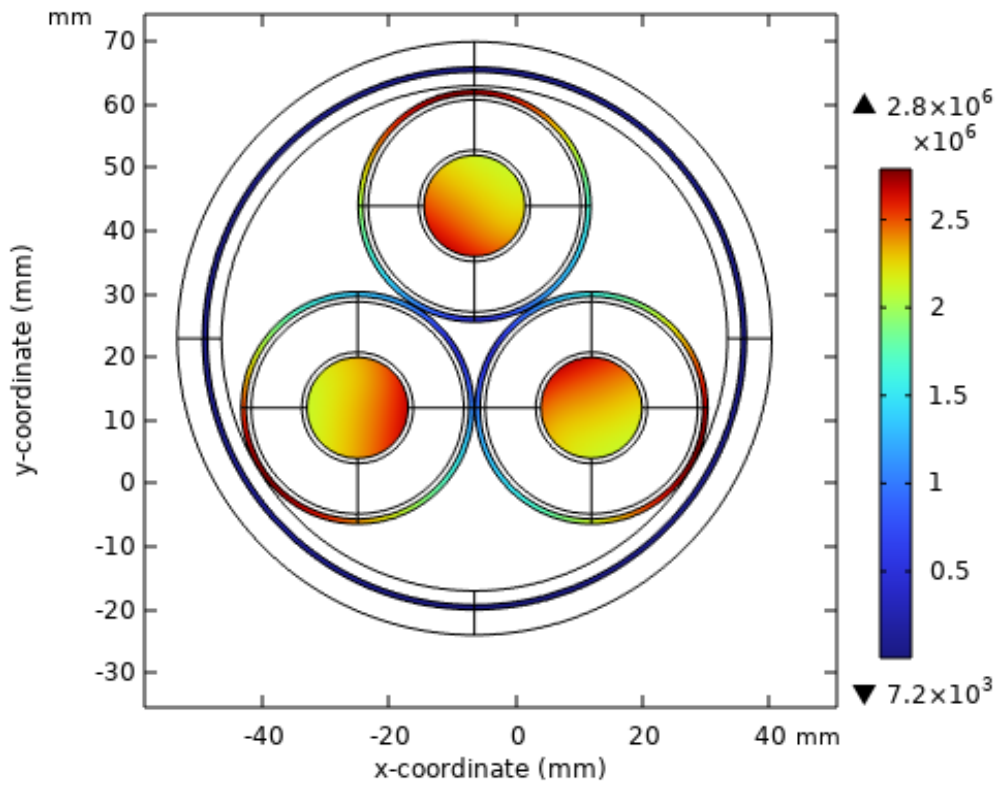


Figure 3.5 Norme de densité actuelle (A/m<sup>2</sup>)

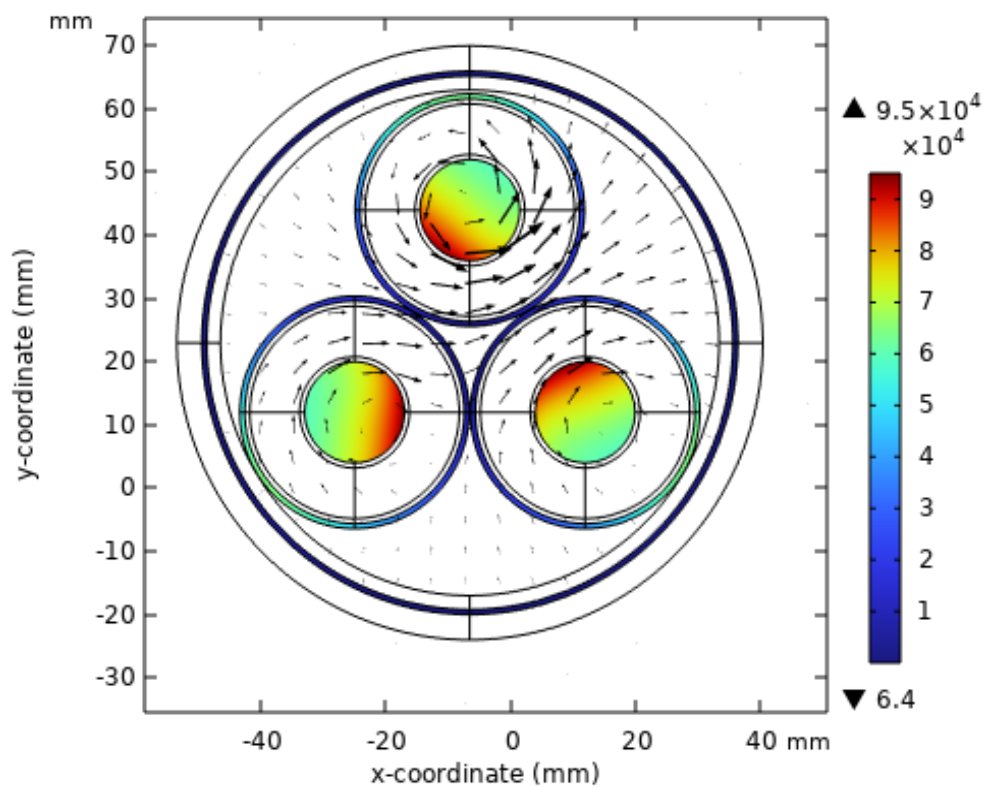
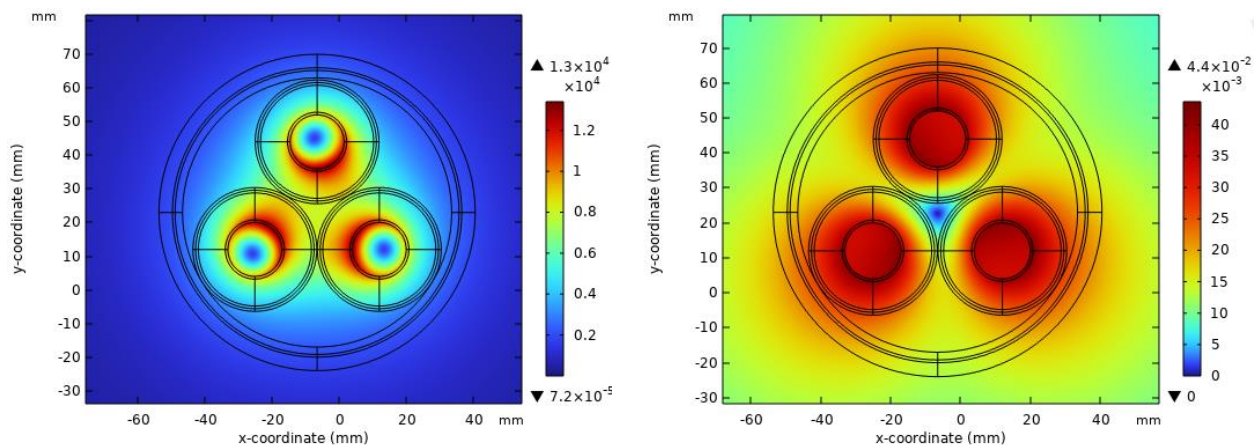
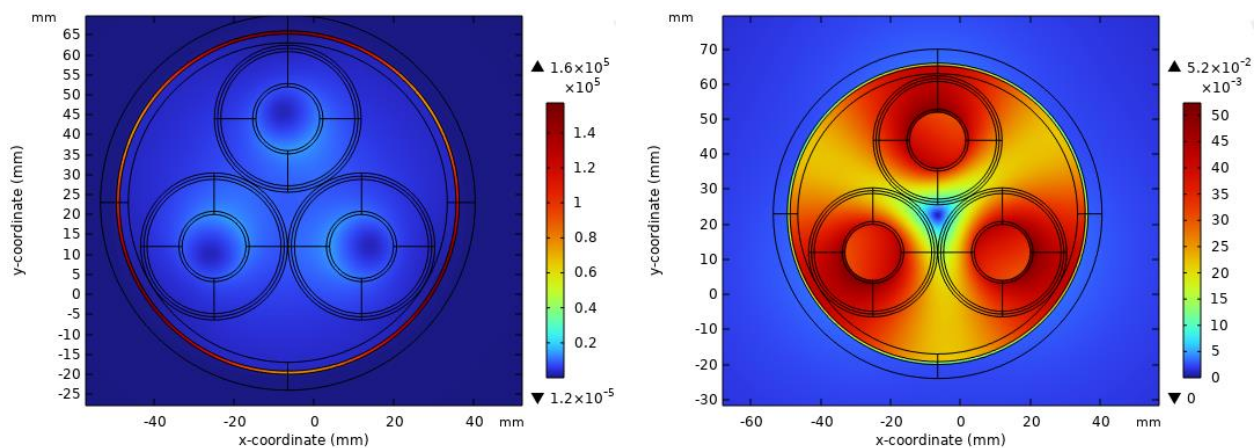


Figure 3.6 les pertes résistives (W/m<sup>3</sup>) avec flèche proportionnelle de la l'intensité du champ magnétique (A/m).

### 3.4.2. La distribution du champ magnétique et électrique



#### a. $\epsilon_r$ de ruban acier = 1



#### b. $\epsilon_r$ de ruban acier = 500

a. Champ magnétique

b. Champ électrique

**Figure 3.7** Distribution du champ magnétique et électrique

Après avoir utilisé le modèle donné en figure 3.3, les résultats de simulation du champ électrique et magnétique sont résumés en figure 3.7. Deux cas ont été considérés ; dans le premier cas, la perméabilité relative est égale 1 (figure 3.7.a) et dans le second, la perméabilité relative est égale 500 (figure 3.7.b). Selon le résultat obtenu, on observe :

- Dans le cas  $\epsilon_r=500$ , est observée la valeur maximale de la densité de flux est égale 0.15T dans l'armature de ruban acier les plus proches des gaines de cuivre individuelles en raison de sa perméabilité relative imposée élevée.
- La densité de flux à la surface du conducteur atteint une valeur de 0,013 T où sa valeur est de 1,6  $\mu$ T à la surface du sol.
- Dans le cas  $\epsilon_r=1$ , la valeur maximale de la densité de flux à la surface du sol atteint jusqu'à 13  $\mu$ T et 0.017T à la surface du conducteur
- Contrairement au champ magnétique, le champ électrique est complètement

arrêté par le blindage des câbles ainsi que par la terre ; aucun champ électrique n'est donc décelable même juste au-dessus de la ligne.

### 3.4.3. Champ magnétique et électrique près les câbles souterrains

Des mesures de champ magnétique et électrique ont été effectuées sur un câble tripolaire blindé de 33KV. Les résultats des calculs sont représentés sur la Fig. 3.8 et la Fig. 3.9, respectivement.

Les résultats de la figure (3.8) montrent l'allure du champ magnétique en fonction des distances, Le champ magnétique augmente et atteint un maximum près le câble souterrain électrique. Lorsqu'on s'éloigne des câbles électriques le champ magnétique démunie. Contrairement au champ magnétique, le champ électrique (figure 3.9) est très faible près le câble souterrain en raison le blindage des câbles ainsi que par la terre

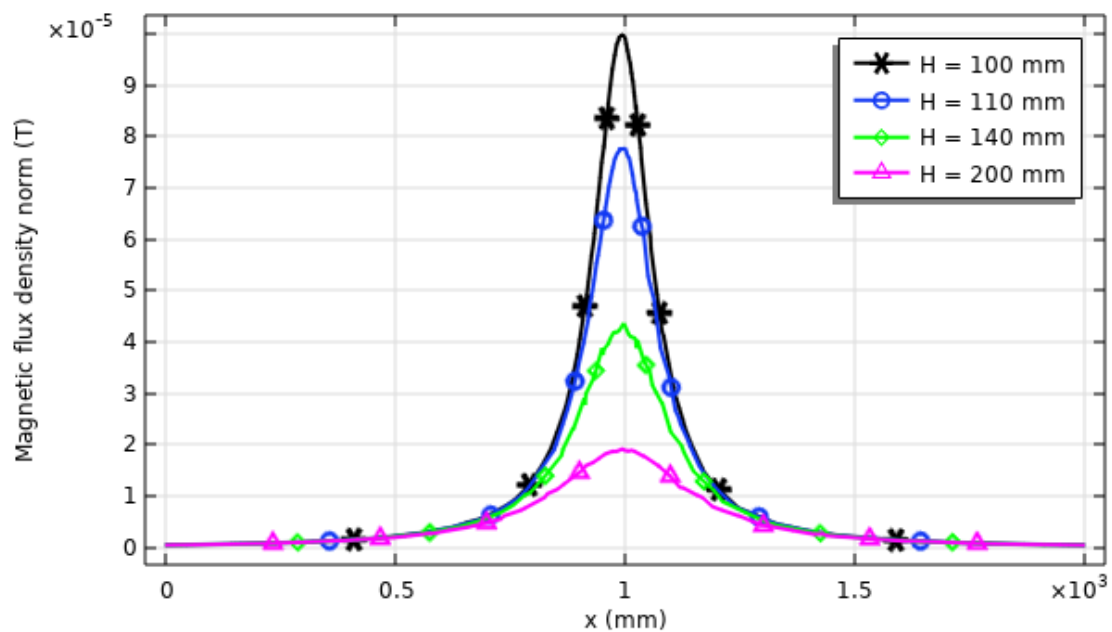


Figure 3.8 champ magnétique



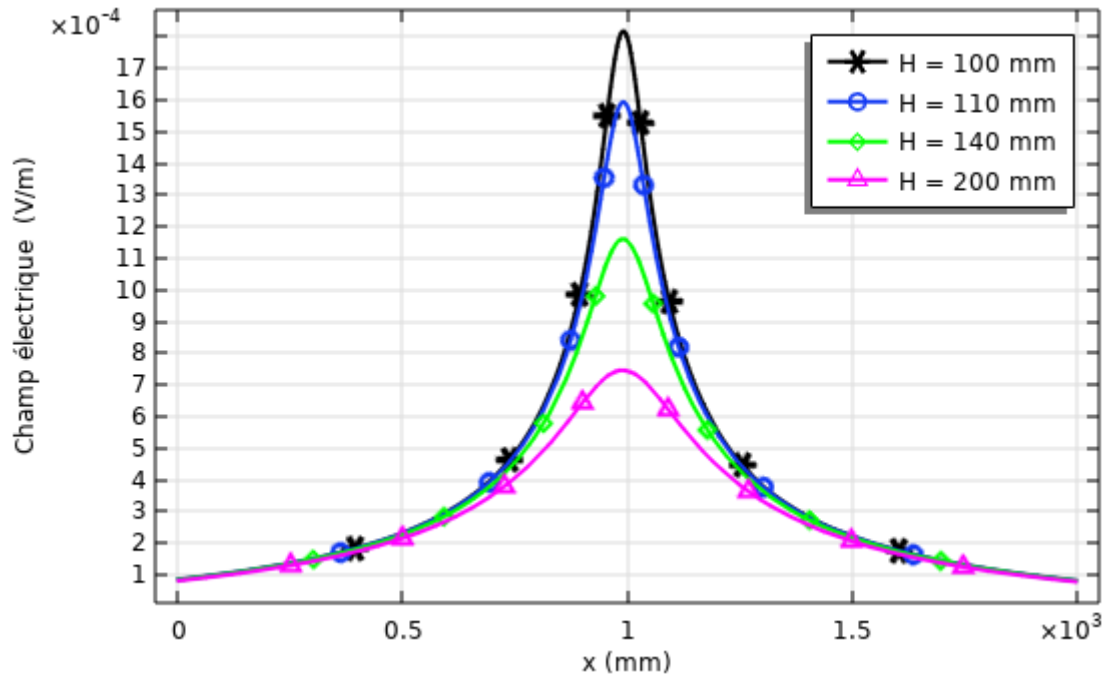
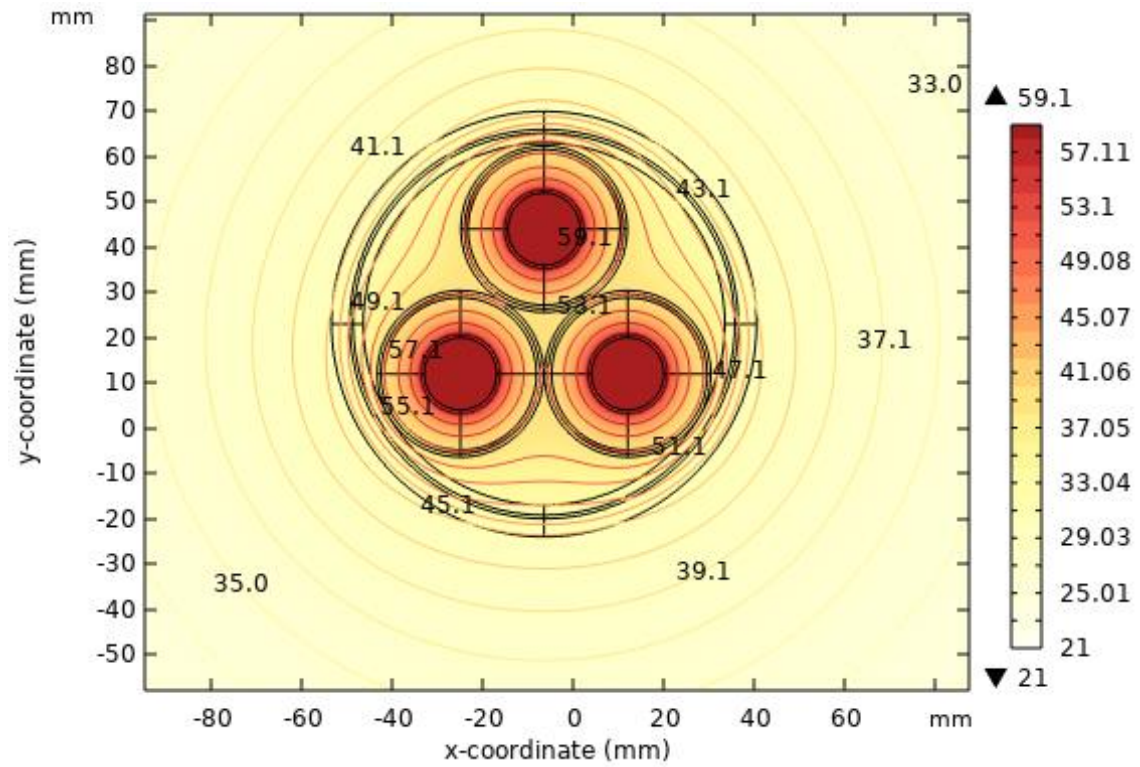
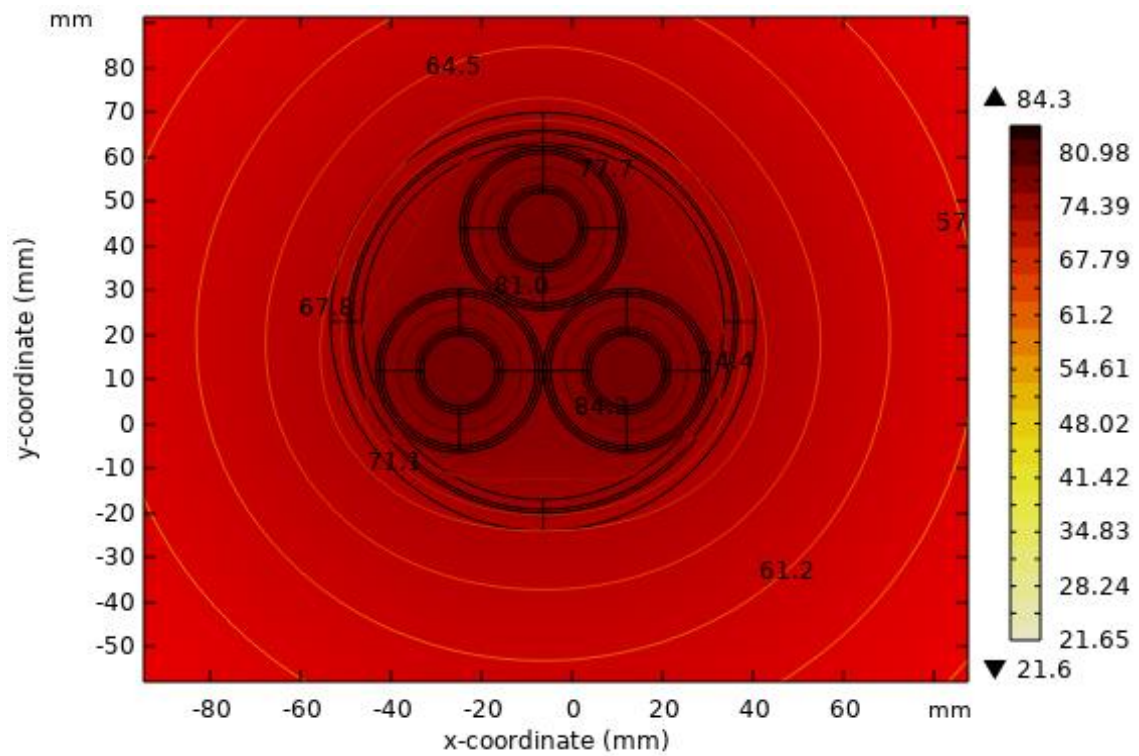


Figure 3.9 Champ électrique

#### 3.4.4. Évolution transitoire de la température

Le comportement thermique des câbles souterrains a beaucoup reçu des attentions de nombreux fabricants et chercheurs afin d'améliorer la conception des câbles et les guides d'installation électrique pour une sécurité de calcul du courant admissible du conducteur et fiable fonctionnement de Matériel l'isolation constructive. Cependant, ce comportement est robuste fonction du courant de charge, de la profondeur d'enfouissement, du sol caractéristiques thermiques, peau et proximité effets, pertes de gaine et d'armure, internes et résistances thermiques externes et courant distribution à l'intérieur des parties de câbles. Selon la méthode standard CEI pour la classification thermique des câbles (CEI 60287 1994), plusieurs approximations et simplifications de cette fonction peut conduire à une sous-estimation de plus de 5% dans le maximum température continue du conducteur calculé. [48]

La figure3.10 montre la répartition de la température à l'intérieur du câble et du sol environnant à deux moments différents ( $t= 20$  et  $3000$  h) et la valeur efficace de courant appliqué sur les conducteurs est supposé être 431 A et une température ambiante de  $20^{\circ}\text{C}$  au-dessus de la surface du sol.

a.  $t=20h$ .b.  $t=3000h$ 

**Figure 3.10** La répartition de la température à l'intérieur du câble et du sol environnant à deux moments différents

L'évolution transitoire de température maximale à l'intérieur de différentes parties du câble (Cu, XLPE, PVC) pour une longue durée telle que 3000 h est illustrée par le figure 3.11. Ça peut être vu que la température évaluée montre les performances de sécurité du câble dans des conditions thermiques car sa température est loin de la valeur maximale autorisée qui est de 90°C. La différence de température entre le conducteur et de PVC est d'environ 12,3°C. Le pourcentage de montée en température est de 7,2 % lorsque le temps passe de 200 h à 3000 h.

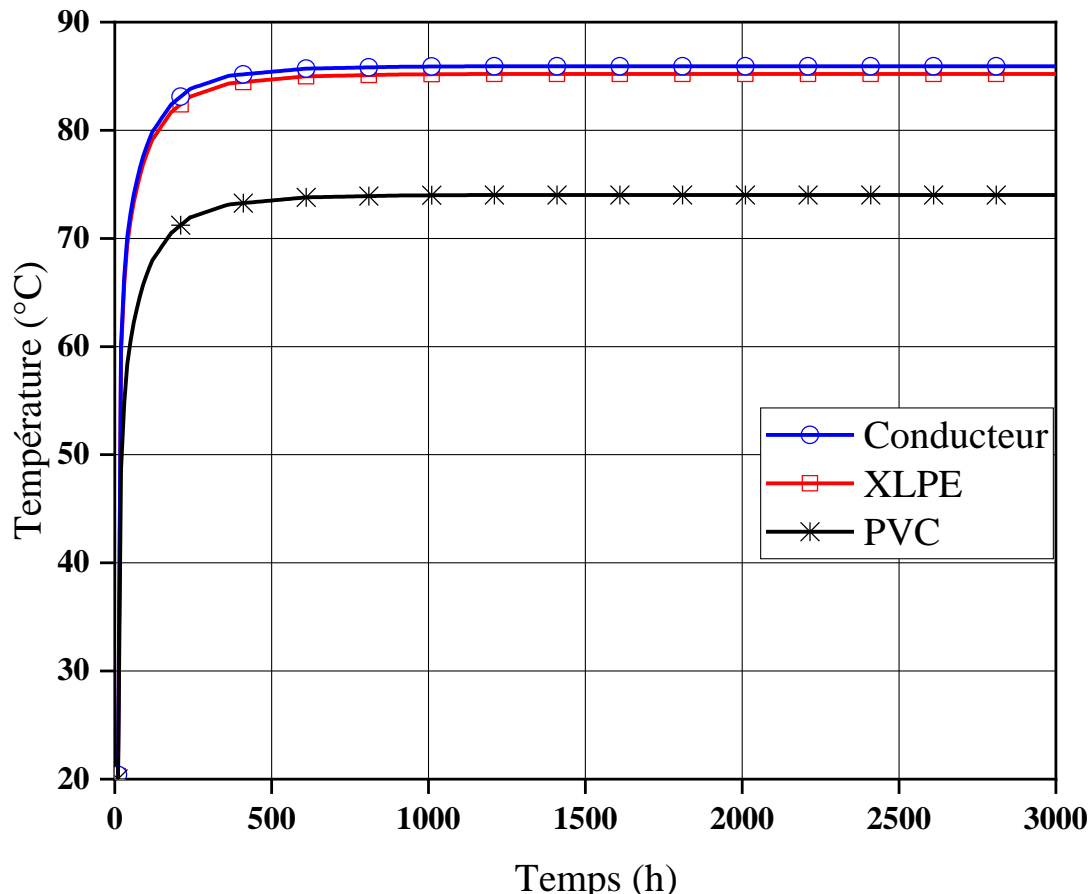


Figure 3.11 Température transitoires à différentes parties du câble

### 3.4.5. Distribution de la température dans le câble pour différents temps

La figure 3.12 montre les variations de la température du câble souterrain pour différents temps. Dans la structure multicouche du câble souterrain, la répartition de la température est uniforme. Le conducteur en cuivre et l'armure métallique la température à ces endroits est la plus élevée et presque constante. La constance de la répartition de la température est due à la très bonne conductivité thermique du matériau à partir de laquelle le conducteur sont fabriqués. La couche d'isolation est la plus

épaisse, avec sa température diminue le plus. La température du câble souterrain peut descendre jusqu'à environ 16°C de l'intérieur vers l'extérieur pour toutes valeur du temps. Il s'agit d'une remarque précieuse qui peut inspirer les ingénieurs impliqués dans l'analyse, la conception et le test des câbles d'alimentation, car il est possible de déterminer la température du conducteur.

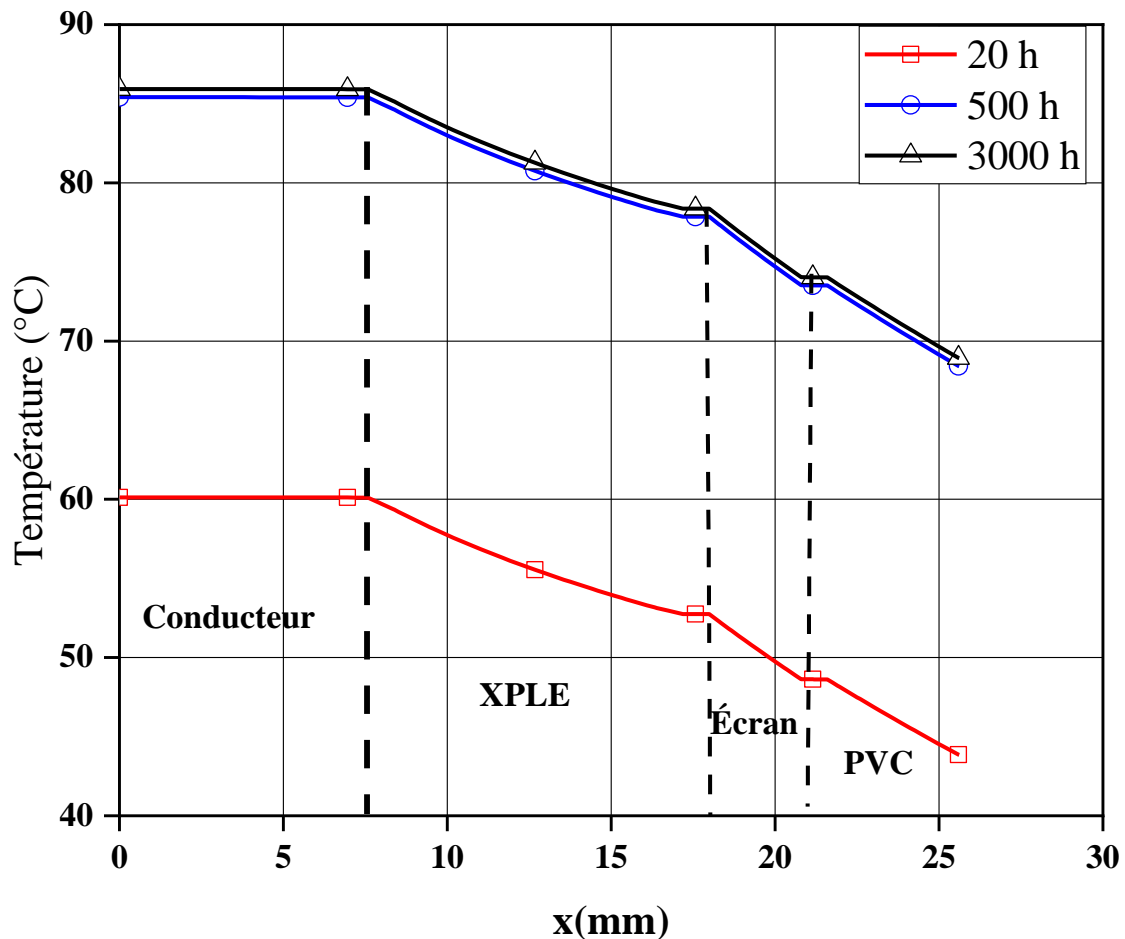


Figure 3.12 distribution de la température dans le câble pour différents temps

### 3.4.6. Effet de courant sur la distribution de la température

Les calculs de la température du conducteur en cuivre et de différents composants du câble en fonction de la valeur efficace du courant ont également été effectués.

Les résultats de la figure 3.13 montrent que de la température du câble augmente avec l'accroissement de la valeur efficace du courant. La relation entre eux est presque linéaire. On peut le voir que pour le cas de calcul analysé, l'augmentation environ 50 A dans la charge de courant entraîne une augmentation de 6°C de la température des composantes du câble.

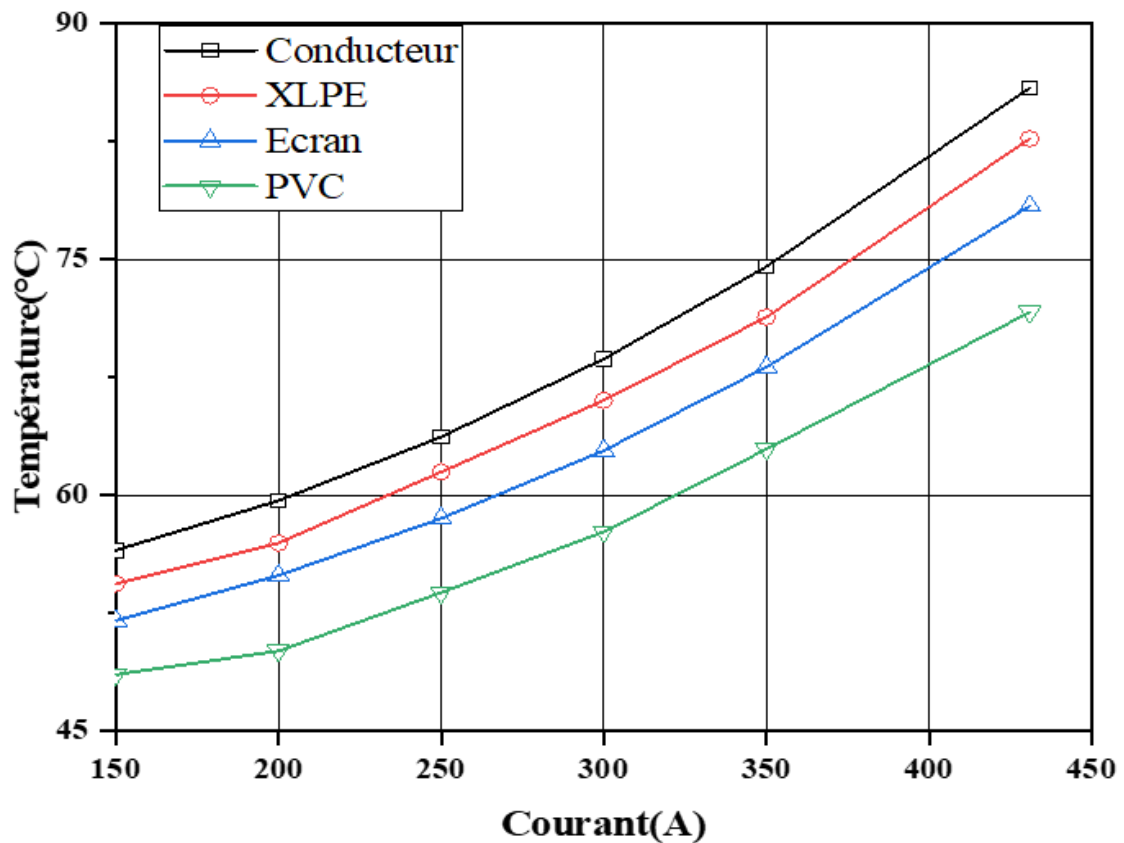


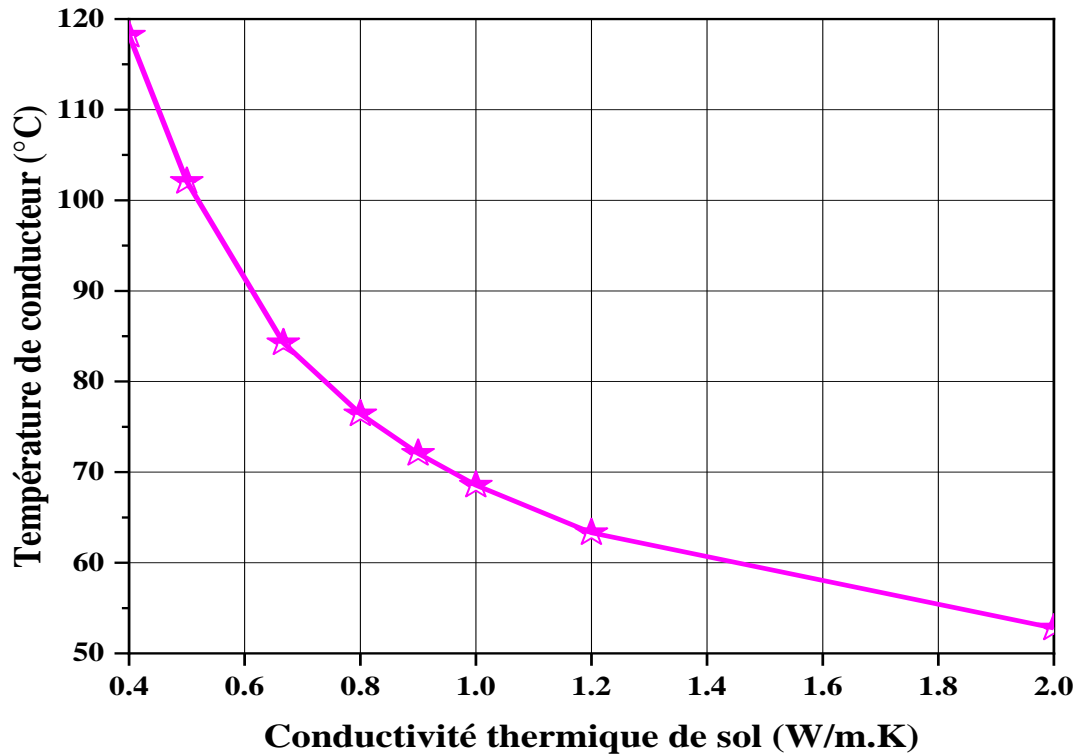
Figure 3.13 effet de courant sur la distribution de la température

### 3.4.7. Effet de la conductivité thermique du sol sur la distribution de la température dans le système de câbles électriques souterrains

La variation de la conductivité thermique du sol modifie l'intensité du transfert de chaleur de l'alimentation câbles. Plus la conductivité est grande, plus le sol est rapide reçoit la chaleur, et abaisse ainsi la température du conducteur du câble.

La Figure 3.14 présente la variation de la température à centre du câble avec augmentation de la conductivité thermique du sol de  $0,4 \text{ W}/(\text{m}\cdot\text{K})$  à  $2 \text{ W}/(\text{m}\cdot\text{K})$ . D'après ces résultats nous remarquons que la température de conducteur diminue de manière non-linéaire avec l'accroissement des conductivités thermique du sol.

Cette figure montre l'effet de la conductivité thermique du sol sur la température à centre du câble. On peut voir que pour le cas de calcul analysé, l'augmentation de deux fois de la conductivité thermique du sol se traduit par une diminution de  $65 \text{ }^\circ\text{C}$  de la température de l'âme du câble.



**Figure 3.14** la variation de la température du câble avec augmentation de la conductivité thermique du sol

### 3.5. Conclusion

L'objectif fondamental de ce chapitre était l'étude de l'analyse électromagnétique et thermique du système de câbles électriques souterrains. Sur la base de la méthode des éléments finis, a été établi un modèle précis de câbles souterrain de 33 kV avec Logiciel COMSOL MULTIPHYSIQUE. Cette modèle a permis de déterminer la distribution de champ électromagnétique et de température dans le système de câbles électriques. Les résultats obtenus peuvent être résumés comme suit :

- ✚ Le champ magnétique augmente et atteint un maximum près le câble souterrain électriques. Lorsqu'on s'éloigne des câbles électriques le champ magnétique démunie.
- ✚ Contrairement au champ magnétique, le champ électrique est complètement arrêté par le blindage des câbles ainsi que par la terre ; aucun champ électrique n'est donc décelable même juste au-dessus de la ligne.
- ✚ La température de conducteur diminue de manière non-linéaire avec l'accroissement des conductivités thermique du sol.
- ✚ L'augmentation la valeur du courant engendre l'accroissement de la température des câbles.

# *Conclusion générale*

## *Conclusion générale*

---

Dans ce mémoire, L'étude a été présentée de l'analyse électromagnétique et thermique du système de câbles électriques souterrains de haute tension de 33 kV. L'étude a été menée à l'aide du logiciel COMSOL MULTIPHYSIQUE basé sur la méthode des éléments finis (MEF).

Dans la première partie de ce travail nous avons présenté un état d'art sur les classifications, la composition, la géométrie des câbles électriques souterrains et méthodes numériques est utilisée pour analyser l'influence électromagnétique et thermique sur le système de câbles électriques souterrains.

La deuxième partie concerne l'étude de la simulation est utilisée pour l'objectif de l'analyse électromagnétique et thermique dans et autour de câble souterrain dans des différentes conditions en 2D en utilisant le COMSOL MULTIPHYSICS.

Les résultats obtenus peuvent être résumés comme suit :

- Le champ magnétique augmente et atteint un maximum près le câble souterrain électriques. Lorsqu'on s'éloigne des câbles électriques le champ magnétique démunie ;
- Contrairement au champ magnétique, le champ électrique est complètement arrêté par le blindage des câbles ainsi que par la terre ; aucun champ électrique n'est donc décelable même juste au-dessus de la ligne ;
- La température de conducteur diminue de manière non-linéaire avec l'accroissement des conductivités thermique du sol ;
- L'augmentation la valeur du courant engendre l'accroissement de la température des câbles.



## Bibliographie

- [1] Moore G. F “Electric cables handbook,” Blackwell Science, 3rd ed. 1997.
- [2] Huang Zet al “Thermal modelling and analysis for offshore submarine high-voltage direct current cable crossings,” IET Gener. Transm. Distrib., Vol. 9, Iss. 16, pp. 2717–2723. 2015.
- [3] Pierre Lebas “diagnostic des câbles souterrains par détection de décharges partielles,” Thèse Doctorat université de Liège. 2008.
- [4] Haddad Lyazid et Hami Khodir “Calcul des paramètres et caractéristiques des lignes Électriques triphasées,” Mémoire fin d'étude université Bejaïa. 2015.
- [5] 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.
- [6] 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 Bejaïa. 2017
- [7] Kherfi Amor et Mimouni Imad “les défauts dans les câbles électriques souterraines,” Mémoire master académique, Université Kasdi Merbah ,Ouargla 2019
- [8] ZhihanXu “Fault Location and Incipient Fault Detection in Distribution Cables,” The University of Western Ontario Graduate Program in Electrical and Computer Engineering A thesis submitted in partial of the requirements for the degree in Doctor of Philosoph.
- [9] <https://www.dfliq.net/blog/underground-electrical-transmission-cables-basics>.
- [10] [www.electricalfundablog.combles](http://www.electricalfundablog.combles).
- [11] KARIMA HEROUINI et OMAR BENALIA “Thermal effects in underground power cable,” Mémoire fin d'étude Université Kasdi Merbah ,Ouargla 2021.
- [12] <https://www.elia.be/-/media/project/elia/elia-site/infra-and-projects/glossary/brochure>.
- [13] <https://www.electricaleasy.com/2017/03/types-of-underground-cables.html>
- [14] <https://webstarsnets.com/fr/97-types-of-underground-cables.html>
- [15] A. CHOUAIRI et al “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,” 22 ème Congrès Français de Mécanique Lyon, Août 2015
- [16] Zellagui Mouhemed “ Etude des protections des Réseaux électrique MT (30 et 10 KV) ,” Mémoire fin d'étude Université mentouri constantine 2010
- [17] Nexans France “Les câbles Souterraines HT,” Cahier technique 2004
- [18] Merabet Haroune et Beriala Bilal “Simulation électromagnétiques des câbles électriques souterrains,” Mémoire master académique, Université Kasdi Merbah, Ouargla 2019.
- [19] Mohamed Zellagui “câbles souterraines MT et BT,” Mémoire fin d'étude Université Batna, 2018.
- [20] Product Trang Catalogue “câble basse tension,” companies Helinc Cables S.A
- [21] LEONI Studer AG “Câbles d'énergie et Accessoires,” cahier technique 2008
- [22] J.P. Perez, R. Charles and R. Flecking, “ Electromagnétisme, Fondements et Applications,” 3ème édition, Paris, 1997.
- [23] J.C. Maxwell, “ A Dynamical Theory of the Electromagnetic Field,” Philosophical Transactions of the Royal Society of London, 1865.
- [24] la Fédération des Gestionnaire de Réseaux Electricité et Gaz en Belgique, “Les Champs Electromagnétiques dans les Réseaux de Distribution,” Brochure D'information, Synergide.
- [25] Cahier de charge de la Société Algérienne de Gestion du Réseau de Transport de l'Electricité (GRTE), “Câbles, matériels de ligne,” Décembre, 2010.
- [26] Ferdinand de Lichtervelde “Les champs électromagnétiques dans les réseaux de distribution,” Article gestionnaire du réseau de transport belge.bruxele
- [27] Scribd “Paramètres Lignes Electriques,” cahier technique
- [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] Elia Group company “ Les champs électromagnétiques et le réseau à haute tension,” Elia, département Communication - Février 2015
- [30] B. M'hamdi, “Amélioration des performances des chaînes d'isolateurs de haute tension,” Thèse de Doctorat en Sciences, Dept. Génie électrique, Ecole Nationale Polytechnique (ENP), Decembre 2016.

- [31] 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
- [32] 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.
- [33] C. Volât, “Modélisation physique et numérique par la méthode des éléments finis de frontière de la distribution du potentiel et du champ électrique le long d’un isolateur standard de poste 735 kV recouvert de glace,” Thèse de Doctorat en Ingénierie, Dépt. Génie électrique, Université du Québec à Chicoutimi, Juin 2002.
- [34] H. 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 de Tizi-Ouzou, 2013.
- [35] M.O. Meftah, M. Rahal, “Performances d’Isolateurs HT pollués sous tension alternative 50 Hz et distributions du champ et du potentiel électriques utilisant COMSOL,” Mémoire d’Ingénieur d’Etat en Electrotechnique, dépt. D’électrotechnique, Ecole nationale polytechnique (ENP), juin 2011.
- [36] Mariem ben hamouda , “étude, conception et modélisation de la diffusion de la chaleur dans les tissus biologiques,” mémoire présenté à l’université du québec à trois-rivières.2015
- [37] Laidaoui Rym, “modélisation et simulation d’un processus à changement de phase Liquide – Solide,” Mémoire de magister, université BaDji Mokhtar –Annaba, 2016/2017.
- [38] M. Ben Hamouda, “Etude, conception et modélisation de la diffusion de la chaleur dans les tissus biologiques,” Mémoire présenté à l’université du québec Comme exigence partielle de la maîtrise en ma thématiques et informatique appliquées, Mars 2015
- [39] H.S. Amina, “Contribution à l’étude du modèle développé d’un isolateur Pollué,” Mémoire de Magister en électrotechnique, Dépt. Génie électrique, Université d’Oran, Janvier 2013
- [40] A. Kara, “Contribution à l’étude d’un modèle dynamique de contournement d’un isolateur pollué,” Mémoire Magister en électrotechnique Dépt D’Electrotechnique, Université de setif, Décembre 2013.
- [41] H. Benguesmia, N. M’ziou, A. Boubakeur, “Simulation of the potential and electric field distribution on high voltage insulator using the finite element method,” *diagnostyka*, vol. 19, no. 2, 2018
- [42] M. Eladawya et I.A. Metwally, “Electromagnetic Heating Effects in Power Distribution Cables under Different Operating Conditions,” *The Journal of Engineering Research (TJER)*, Vol. 15, No. 2 (2018) 163-174
- [43] houssem, “Modélisation d’une machine asynchrone par logiciel COMSOL - Multiphysics,” Mémoire de magister université mohamed khaidar- Biskra.
- [44] Huang Z et all, “Thermal modelling and analysis for offshore submarine high-voltage direct current cable crossings,” *IET Gener. Transm. Distrib*, 9(16): 2717-2723.
- [45] J. S. del Pino Lopez, P. C. Romero, “Influence of different types of magnetic shields on the thermal behavior and ampacity of underground power cables,” *IEEE Trans. Power Del*, Vol. 26, pp. 2659-2667, October 2011.
- [46] C. C. Hwang, Y H Jiang, “Extensions to the finite element method for thermal analysis of underground cable systems,” *Electric Power Systems Research*, pp. 159-164, February 2003.
- [47] Metwally IA (2010) , “Electrostatic and magnetic field analyses of 66-kV cross-linked polyethylene submarine power cable equipped with optical fiber sensors,” *Electric Power Components and Systems* 38(4): 465–476.
- [48] Sedaghat A, de León F (2014), “Thermal analysis of power cables in free air: Evaluation and improvement of the IEC standard ampacity calculations,” *IEEE Trans. Power Deliv*, 29(5): 2306-2314.