UNIVERSITE KASDI MERBAH OUARGLA

Faculté des Sciences Appliquées Département de Génie Electrique



Mémoire MASTER ACADEMIQUE Domaine : Sciences et technologies Filière : Electrotechnique Spécialité : Machines Electrique Présenté par :

Thème:

Kherfi Amor

Mimouni Imad

Les défauts dans les câbles électriques souterrains

Le : 09/07/2019 Devant le jury :

MCB

MCB

MAA

M ^r	Rouibah Tahar
M ^r	Ayad Ahmed Nour El Islam
M ^r	Kadri Ahmed Yacine

Président Encadreur/rapporteur Examinateur

UKM Ouargla UKM Ouargla UKM Ouargla

Année universitaire 2018/2019





REMERCIEMENTS

D'abord, nous remercions <u>ALLAH</u> le tout puissant qui nous éclairé nos chemin et qui nous a donné la force pour accomplir ce travail.

En tout premier lieu, nous remercie vivement mes mères et mes pères qui ont nous donné tous les outils et les conditions de succès. Stimulation et de confiance et de soins et des dépenses, durant les dixhuit années d'études (2001-2019).

Nous tenons à remercier vivement **Mr. AYAD AHMED NOUR EL ISLAM** notre Rapporteur 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 Monsieur Rouibah tahar , Monsieur Kadri Ahmed Yacine d'avoir accepté l'évaluation de la qualité de ce mémoire.

Nous remercions aussi tous mes enseignants de l'université Kasdi Merbah, pour tous les efforts déployés et pour les informations et la formation.

Nous voudrions remercier spécialement **Mr. TAIBI DJAMEL**, pour ses compétences scientifiques, ses conseils, sa disponibilité, et sa qualité humaine.

Nous remercions tous les collègues de la promotion 2014

Sommaire :

Liste des figure Liste des tableaux Liste des abréviations

Introduction générale1 Chapitre I: Généralité sur les câbles électriques souterrains
I.1 .Introduction :
I.2 .Généralité sur les réseaux électriques :
I.3. Architecture des réseaux électriques :
I.4. Constitution du réseau électrique:
I.5 .Lignes de transport :
I.5.1 Les Lignes aériens :
I.5.2 . Les lignes souterraines :
I.6 .Réseaux HTA souterrains:
I.7. Les câbles électriques souterrains :
I.7.1 Câbles THT souterrains :9
I.7.2. Les câble Souterrains HT :
I.7.3 .Les câbles souterraines Moyenne Tension MT :12
I.7.4 : Les câbles Souterraines BT :14
I.8 .Classification des câbles souterrains :
I.9. Méthodes de pose :
I.10 .Les champs électriques et champs magnétique:
I.10.1 .Effets des champs magnétiques:17
I.10.2 . Effets des champs électriques:
I.11 .Phénomènes d'induction électromagnétique dans les câbles souterrains :
I.12 .Impact de la pollution harmonique sur les câbles souterrains :
I.12.1 . Augmentation des pertes Joule :
I.12.3. Influence sur la durée de vie :
I.12.4 .Cas particulier du conducteur de neutre :
I.13 . Les champs magnétiques au-dessus d'un câble souterrain:
I.13.1 .Les effets à court terme :
I.13.2 . Les effets à long terme :
I.13.3.Différance entre le profil de champ d'une ligne aérienne et d'un câble souterrain:22

I.14 .Facteurs affectant, au cours du temps, l'isolation d'un câble souterrain :	23
I.15 .Défauts dans les câbles :	24
I.16 .Conclusion:	
Chapitre II: Modèle électromagnétique des câbles électriques	
II.1.Introduction :	24
II.2 .Calcul du champ électromagnétique :	
II.2.1. Equations de Maxwell :	
II.3. Modèles électromagnétiques :	
II.3.1 Modèle Electrostatique :	
II.3.2 Modèle magnétostatique :	
II.3.2.1 Modèle magnétostatique scalaire.	
II.3.2.2 Modèle magnétostatique vectorielle	
II.3.3.3 Formulation en termes de potentiel vecteur	29
II.4 .Déclaration des conditions aux limites :	
II.5. Les techniques de résolutions des équations aux dérivées partielles :	
II.5.1 .Méthode des Différences Finis (MDF) :	
II.5.2 .Méthode des intégrales de frontières (MIF) :	
II.5.3 .Méthode des Volumes Finis (MVF) :	
II.5.4 .Méthode des Eléments Finis (MEF) :	
II.6. Implémentation du modèle dans le logiciel COMSOL :	
II.6.1 .Dessin et dimension de la géométrie du système :	
II.6.2.Processus de simulation par le logiciel COMSOL :	
II.6.3. Structure du programme :	
II.7. Conclusion :	
Chapitre III: Simulation des défauts dans les câbles électriques souter	rains
III.1.Introduction :	
III.2 .Représentation des câbles de transmission souterrains :	
III.2.1. Forme et taille des câbles électriques :	
III .3.Les Caractéristiques géométriques des lignes électriques :	
III .4.Les géométries et la taille du câble électrique :	43
III .5.Le maillage des câbles électriques souterrains :	
III .6.1.Résultats de simulation du champ magnétique :	

Références	
Conclusion Générale	.60
III.11 .Conclusion :	. 59
III.10.1. la distribution du champ magnétique des lignes électriques :	58
III.10.Présence des harmoniques dans les lignes haute tension souterraine :	. 58
III.9.1.Résultats du champ électrique pour une coupe transversale:	56
III.9.Résultats pour une coupe longitudinale :	. 54
III.8.2. Mesure du champ magnétique prés des lignes électriques souterraines en C-C :	53
III.8.1 .La densité de flux magnétique dans les câbles électriques en court circuit :	52
III.8. Présence d'un défaut de court circuit dans les lignes électriques :	. 51
III.7.1. Mesure du champ électrique:	50
III.7 .Résultats de simulation du champ électrique :	. 49
III.6.4 .Mesure du champ magnétique prés des lignes électriques souterraines :	48
III.6.3 . La distribution du champ magnétique :	47
III.6.2 . La densité de flux magnétique dans les câbles électriques :	46

Liste des figures

Chapitre I : Généralité sur les câbles électriques souterrains

Figure I.1 : Niveaux de tension normalisés04
Figure I.2 : Architecture des réseaux électriques04
Figure I.3 : Les lignes de transport05
Figure I.4 : Réseaux HTA souterrains en Double dérivation07
Figure I.5 : Réseaux HTA souterrains en Coupure d'artère07
Figure I.6 : Constitution d'un câble souterrain isolé au polyéthylène réticule08
Figure I.7 : Coupe en 2D des câbles THT pour réseaux souterrain08
Figure I.8: câbles à conducteur compacts et segmentaires
Figure I.9 : Câble unipolaire11
Figure I.10 : Constitution de Câble Tripolaire11
Figure I.11 : Les câbles Souterraines BT12
Figure I.12 : technique de poste câble BT12
Figure I.13 : Conducteurs de différentes formes13
Figure I.14 : différentes configuration géométriques pour le souterrain triphasé14
Figure I.15 : Les lignes électriques souterraines en pose horizontale16
Figure I.16 : : coupe d'une terre contient une ligne souterrain
Figure I.17 : Différance enter le champ d'une ligne aérienne et d'une câble souterraine21
Figure I.18 : Imperfections dans un câble monophasé
Figure I.19 : Câbles localement endommagés (images EDF)

Chapitre II : Modèle électromagnétique des câbles électriques

Figure II.1 : Interface entre deux milieux différents	26
Figure II.2 : Maillage type différences finies	31
Figure II.3 : Méthode des Volumes Finis	32
Figure II.4 : Discrétisation du domaine d'étude (maillage)	34
Figure II.5 : Câble électrique BT avec le maillage dans le logiciel Comsol	35

Figure II.6 : Présentation du logiciel COMSOL Multiphasiques	
Figure II.7 : Différents blocs du programme	

Chapitre III : Simulation des défauts dans les câbles électriques souterrains

Figure III.1 : La forme et la taille du câble électrique souterrain THT
Figure III.2 : La forme et la taille du câble électrique souterrain HT40
Figure III.3 : géométrie du câble moyenne tension MT40
Figure III.4 : géométrie du câble moyenne tension BT41
Figure III.5 : Caractéristiques géométriques du modèle en 2 Dimensions42
Figure III.6 : géométrie des câbles électriques dans logiciel Comsol43
Figure III.7 : maillage des câbles électriques souterrains
Figure III.8 : La densité du courant électrique dans les câbles électriques45
Figure III.9 : La densité de flux magnétique dans les câbles électriques46
Figure III.10: La distribution du champ magnétique47
Figure III.11: La densité du Flux magnétique et autour des câbles électriques
Figure III.12 : potentiel électrique prés des lignes électriques souterraines
Figure III.13 : Champ électrique prés des lignes électriques souterraines
Figure III.14: : La densité du Flux magnétique en présence d'un court circuit
Figure III. 15: Calcul du champ magnétique pour le cas d'un court circuit dans la phase52
Figure III. 16: Une coupe longitudinale d'un câble THT souterrain
Figure III .17 : Le distribution du champ magnétique dans le câble avec un clou et la terre54
Figure III.18 : calcul du champ magnétique prés du câble55
Figure III.19 : : La distribution du champ électrique pour une coupe transversale
Figure III .20 : calcul du champ électrique en présence d'un clou pour une coupe transversale
Figure III.21 : distribution de champ magnétique avec harmonique d'harmoniques

Liste des tableaux

Chapitre I : Généralité sur les câbles électriques souterrains

Tableau I.1 :	Méthodes de pose des câbles souterrains	15
Tableau I.2 :	champ magnétique d'une ligne souterraine	.19
Tableau. I.3	: Facteurs affectant, au cours du temps, l'isolation d'un câble souterrain	21

Chapitre III : Simulation des défauts dans les câbles électriques souterrains

Tableau III.1 : Caractéristiques géométriques de câble THT	39
Tableau III.2: Caractéristiques géométriques de câble HT	40
Tableau III.3: Caractéristiques géométriques de câble MT	40
Tableau III.4 : Caractéristiques géométriques de câble BT	41
Tableau III.5: caractéristiques des matériaux des câbles souterrains	41
Tableau III.6 : les distances entre les câbles souterrains et la terre	.42
Tableau. III.7 : les caractéristiques des courants de CC du réseau électrique,	51
Tableau III.8: valeurs maximales des taux d'harmoniques acceptables	.58

•

Liste des abréviations

CEM Compatibilité électromagnétiques MDF la méthode des différences finies MEF la méthode des éléments finis MVF la méthode des volumes finis MIF la méthode des intégrales de frontières MCC la méthode des circuits couplés XLPE : Cross-Linked Polyethylene

Introduction Générale

Introduction Générale

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

Une très bonne modélisation des caractéristiques électromagnétiques des lignes électriques dépends de plusieurs paramètres comme : les caractéristiques des câbles électriques (conductivité, forme du fil, section transversale, etc.), les caractéristiques géométriques et structurelles des câbles souterrains, la fréquence des signaux perturbateurs, et de la distance entre les conducteurs ou la profondeur, et de l'environnement immergé (air, sol, eau, etc.).

L'objectif principal du travail est étudier les différents types de lignes électriques souterraines de différentes tensions a l'état sain et transitoire en présence des défauts et des perturbations .le travaille va être faite à travers la méthode des éléments finis (MEF).

Ce mémoire comporte trois chapitres :

Le premier chapitre : donne une vue générale sur la classification, la nature, la composition, la géométrie, des lignes et les câble électriques souterrains. Nous définissons les types des câbles électriques souterrains et leurs caractéristiques et quelques avantages et des inconvénients. Enfin nous citons quelques défauts et des problèmes des câbles électriques souterrains comme : les courts circuits les



harmoniques les défauts de construction et d'isolement et la pollution électromagnétique.

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

Le troisième chapitre : fait l'objet de la représentation des résultats de simulation des différentes géométries des lignes électriques souterraines (THT HT MT BT), l'objectif est d'étudier la présence des défauts comme : le court circuit, conséquences décharge vers la terre en plus un défaut de pincement d'un clou dans un câble souterrain. Le calcul et la représentation des caractéristiques électromagnétiques dans et autour des câbles souterrains a l'état sain ou défectueux et l'échauffement des câbles électriques.

Chapitre I

Généralité sur les câbles électriques souterrains

I.1 .Introduction :

Le réseau électrique est construit et dimensionné pour transporter l'énergie électrique produite par les centres de production jusqu'aux consommateurs. Le réseau électrique met donc en œuvre des milliers de kilomètres de ligne, des milliers de postes de transformation, ainsi que de nombreux organes de coupure et d'automates de réglage, dimensionnés pour assurer le bon fonctionnement de la fourniture d'énergie électrique. Les lignes électriques est l'une des principales formes d'infrastructures énergétiques, et la composante principale des grands réseaux de transport d'électricité. Ces lignes sont aériennes, souterraines ou sousmarines. Au niveau de l'étude de projet 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 [1].

I.2 .Généralité sur les réseaux électriques :

Les réseaux de transport et d'interconnexion assurent l'acheminement de l'énergie depuis ces unités vers les lieux de consommation à travers des lignes électriques (aériennes ou souterraine). Les lignes électriques sont de capacités limitées à cause des limites thermiques des câbles [1].

I.2.1 Structures et topologies d'un réseau électrique :

1. Réseau de transport THT

Le réseau de transport permet de transférer l'énergie électrique des centres électriques vers les consommateurs a travers un réseau de très haute tension THT, il rattache les centrales de grandes puissances (> 300 MW). Ces réseaux sont, pour la plupart, aériens et souterrains dans les villes ou à leur approches. Ils sont étudiés pour un transit donné correspondant à la limite thermique de la ligne [2].

2. Réseau de répartition HT

Le deuxième niveau de tension est le réseau de répartition est dédié a la haute tension, son rôle est de répartir la puissance vers les centres de charges dans un rayon d'environ 100 kilomètres d'un poste de répartition. Le réseau de répartition est donc formé des lignes et des

М	
3	C

postes alimentant le réseau de distribution à partir du réseau de transport. Le réseau de répartition est aérien et même des installations de répartition souterraines.

3. Réseau de distribution

Le réseau de distribution a pour fonction d'alimenter l'ensemble de la clientèle principalement connectée à ce réseau. Les réseaux de distribution ont principalement une structure radiale.

Les niveaux de tensions de réseau de distribution

La nouvelle norme en vigueur UTE C18-510 définit les niveaux de tension alternative, (voir la figure I.1.) comme suit :

- ✓ HTB → pour une tension composée supérieure à 50 kV
- ✓ HTA → pour une tension composée comprise entre 1 kV et 50 kV
- ✓ BTB → pour une tension composée comprise entre 500 V et 1 kV
- ✓ BTA → pour une tension composée comprise entre 50 V et 500 V
- ✓ TBT → pour une tension composée inférieure ou égale à 50 V



Figure I.1 : Niveaux de tension normalisés [2]

I.3. Architecture des réseaux électriques HT :

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 I.2.

4



Figure I.2 Architecture des réseaux électriques [2]

I.4. Constitution du réseau électrique:

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

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

I.5 .Lignes de transport :

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 confronté 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 environ20 fois plus élevé à 400 kV par rapport à une liaison aérienne). En 2006, l'ordre de grandeur du coût d'une liaison aérienne à 400 kV de 1 millions de \notin/km .

Les lignes aériennes sont constituées de conducteurs nus en aluminium (souvent un alliage pour renforcer les propriétés mécaniques), parfois avec une âme en acier [13].

I.5.1 Les Lignes aériens :

Elle est composée de conducteur nus, généralement en alliage d'aluminium, d'isolateurs, de pylônes et d'un câble de garde pour les lignes de haute tension. Son rôle principale est de transporter l'énergie électriques de la source de production jusqu'à la zone de consommation (figure I.1.). Elle possède les caractéristiques suivantes :

- La tension reste constante sur toute la longueur de la ligne et pour toutes les charges comprises entre zéro est la charge nominale.
- Un bon rendement.
- Les pertes joules ne doivent pas surchauffer les conducteurs[3].



a-Pylône silhouette Danube à deux systèmes b- câbles souterrains

Figure I.3 Les lignes de transport [3]

Les avantages des lignes aériennes:

- Sont moins coûteuses que les lignes souterraines du point de vue des frais d'installation et de réparation.
- Elles permettent une surveillance aisée de leur état et un repérage facile des accidents et des défauts.
- Elles peuvent être réparées très rapidement en cas d'accident ou de défaut.
- Elles peuvent être surchargées en intensité de courant sans trop de danger.

Parmi les inconvénients, on distingue:

• L'exposition aux surtensions d'origine atmosphérique.



- Leur installation donne lieu à des oppositions des propriétaires des terrains surplombés.
- Elles soulèvent des problèmes d'esthétique et de respect des sites.
- Elles sont susceptibles d'induire des forces électromotrices perturbatrices ou dangereuses dans les circuits de télécommunication.
- Elles sont susceptibles de produire des perturbations radioélectriques gênant les réceptions de radiodiffusion et de télévision.
- Selon certains, les champs électriques et magnétiques peuvent exercer une influence néfaste sur la santé [2].

I.5.2 . Les lignes souterraines :

Il est composé de différentes parties assemblées de manière concentrique, les principales composants sont : au centre un conducteur permet de transporter l'électricité, ensuite vient une isolation électrique pour empêcher le courant de s'écouler vers la terre, le tout est entouré d'une gaine métallique afin de confiner le champ électrique à l'intérieur du câble et d'une protection extérieure qui assure de bonnes propriétés mécaniques et le protège des agressions extérieures (figure I.3.). [2].

Les avantages :

- Constituent la seule solution possible dans les agglomérations denses .
- Sont soustraites aux surtensions atmosphériques (foudre).
- Ne causent pas d'interférences avec les circuits de télécommunications .
- Ne produisent aucune gêne pour les réceptions de radiodiffusion et télévision .
- Seule solution possible pour traverser de larges fleuves ou des bras de mer lorsque la distance à franchir dépasse 3km [2].

Les inconvénients :

- 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.
- Le repérage des défauts y est délicat et lent .
- Les réparations sont coûteuses et parfois malaisées .



- Leurs armures et gaines doivent être protégées contre les effets de corrosion dus aux courants vagabonds .
- Risquent d'être détériorés en cas de mouvements de terrains .
- Leur isolement est susceptible d'être détérioré par élévation de température des conducteurs en cas de surcharge [2].

I.6 .Réseaux HTA souterrains:

Les zones urbaines ou mixtes à forte densité de charge sont alimentes par des câbles HTA enterres en double dérivation (figure I.4) ou en coupure d'artère (figure I.5). En double dérivation, les postes HTA/BT sont normalement alimentes 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 réalises en câble , en raison de la baisse notoire du surcout lie à cette technique. De plus, une volonté politique croissante de qualité environnementale tend à la réduction de l'impact visuel des ouvrages.



Figure I.4 Réseaux HTA souterrains en Double dérivation



Figure I.5 Réseaux HTA souterrains en Coupure d'artère [2]

A	
8	Q

I.7. Les câbles électriques souterrains :

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

I.7.1 Câbles THT souterrains :

Les câbles souterrains de très haute tension THT sont principalement employés pour le transport et la distribution de l'énergie électrique dans les zones fortement urbanisées (grandes villes(figure I.6.).), parfois pour résoudre des problèmes locaux particuliers, techniques ou d'environnement, pour lesquels la mise en œuvre de lignes aériennes est difficile ou impossible [17].



Figure I.6 : Constitution d'un câble souterrain isolé au polyéthylène réticule. Légende : (1) âme conductrice, (2) couche semi-conductrice interne, (3) isolant au polyéthylène réticule, (4) couche semi-conductrice externe, (5) écran conducteur, (6) protection au PVC [3].

I.7.2. Les câble Souterrains HT :

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

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(figure I.7).





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

Figure I.7 : Coupe en 2D des câbles HT pour réseaux souterrain [3]

B- Les conducteurs segmentaires : également appelés conducteurs "Milliken"(figure I.8), sont composés de plusieurs conducteurs en forme de segment assemblés pour former un noyau cylindrique :

- Le conducteur de grande section est divisé en plusieurs conducteurs en forme de segment. Il y a de 4 à 7 de ces conducteurs, appelés segments ou secteurs. Ils sont isolés les uns des autres au moyen de rubans semi-conducteurs ou isolants. La structure de type Milliken réduit les effets extrêmement défavorables de la peau et de proximité [5].





Conducteurs ronds compactsLes conducteurs segmentairesFigure I.8: câbles à conducteur compacts et segmentaires [5]

М		_
1	0	

- Écran semi-conducteur sur le conducteur :

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

- Isolation XLPE :

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

- Écran semi-conducteur sur isolation :

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

- Écran métallique :

Lorsque la tension atteint des dizaines voire des centaines de kV, un écran métallique est nécessaire. Sa fonction principale est d'annuler le champ électrique en dehors du câble. Il agit comme la deuxième électrode du condensateur formé par le câble. [5]

L'utilisation d'un écran métallique implique:

La nécessité de le connecter à la terre à au moins en un point du parcours .
Drainage du courant capacitif qui passe à travers l'isolation .

• Drainage de la séquence zéro courants de court-circuit, ou une partie d'entre eux. Cette fonction est utilisée pour déterminer la taille de l'écran métallique.

• La circulation des courants induite par les champs magnétiques provenant d'autres câbles à proximité. Ces courants de circulation entraînent une perte d'énergie supplémentaire dans les câbles et doivent être pris en compte lors de l'évaluation de la capacité de transmission d'un système de câbles.

• La nécessité d'isoler électriquement l'écran métallique de la terre sur la plus grande partie de la longueur du câble Installe .

• La nécessité de protéger l'écran métallique contre la corrosion chimique ou électrochimique. La seconde fonction de l'écran métallique est de former une barrière radiale pour empêcher l'humidité de pénétrer dans le câble, en particulier son système isolant.

M		
	11	ρ

Le système d'isolation synthétique ne doit pas être exposé à l'humidité. Lorsque l'humidité et un champ électrique puissant sont présents ensemble, l'isolation se détériore selon la procédure d'appel de l'eau, ce qui peut éventuellement entraîner une défaillance de l'isolation.

- La gaine de protection anticorrosion :

La veste a une double fonction:

• Il isole l'écran métallique depuis la terre (en particulier pour les lignes avec des connexions d'écran spéciales).

• Il protège les composants métalliques de l'écran contre l'humidité et la corrosion.

- Mise à la terre des écrans métalliques :

Lorsqu'un courant alternatif traverse le conducteur d'un câble, une tension proportionnelle au courant d'induction, à la distance entre les phases et à la longueur de la ligne est générée sur l'écran métallique.

L'extrémité non mise à la terre est soumise à une tension induite qui doit être contrôlée.

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

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

I.7.3 .Les câbles souterraines Moyenne Tension MT : [7]

Les câbles électriques souterrains de moyenne tension ont la même forme et la même constitution que les câble THT et HT mais avec un diamètre inferieur a cause du niveau de la puissance transmisse (figure I.9).

1. Constitution :

1. Câble unipolaire



Figure I.9 : Câble unipolaire [7]

- 1. Âme : Conducteur en cuivre.
- 2. Semi-conducteur interne: Écran appliqué sur le conducteur en matériau semiconducteur thermostable.
- 3. Isolation : Polyéthylène réticulé (XLPE), sous tube en atmosphère sèche.
- 4. Semi-conducteur externe: Écran en matériau semi-conducteur thermostable et dénouable appliqué sur l'enveloppe isolante.
- 5. Écran métallique : Écran composé de fils et d'un ruban en cuivre.
- 6. Obturation longitudinale: Ruban hygroscopique recouvrant intégralement l'écran
- 7. Gaine: extérieure Polyoléfine sans halogène.
- **2.** Câble Tripolaire (figure I.10) [7].



Figure I.10 : Constitution d'un câble Tripolaire [7]

4	_
13	q

I.7.4 : Les câbles Souterraines BT :

Les câbles d'alimentation souterrains à basse tension sont construits avec des conducteurs en cuivre et en aluminium rigides, solides ou toronnés et des conducteurs en cuivre flexibles (nus ou étamés). Les XLPE, PVC, LSF/LSOH et les composés élastomères sont les principaux composés isolants et protecteurs pour ces types de câbles (figure I.11). Les fils ou les rubans en acier (ou en aluminium pour les câbles unipolaires) peuvent être appliqués sous la gaine extérieure, ce qui procure une protection mécanique supplémentaire [14].

- Conducteurs de phases: est la partie métallique des câbles qui transporte le courant électrique ces matériaux sont : Ame en aluminium

- Conducteur Neutre : Ame circulaire câblée en aluminium. Gaine de protection en plomb
 Isolation en PR extrudé. Assemblage (bourrage et filins). Ecran en rubans acier. Gaine en PVC
 [7].



Figure I.11 : Les câbles Souterraines BT [30]



Figure I.12 : Technique de poste câble BT [7] La figure I.12 montre la pose d'un câble BT souterrain dans le sol.

P		
	14	ρ

I.8 .Classification 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 sectorale) (figure I.13).



Figure I.13 : Conducteurs de différentes formes [7]

I.9. 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

P		
	15	0

câbles sera soumis lors de l'installation et de la mise en service [5]. Le choix d'un conduit s'effectue en fonction des influences externes du local , voir la figure I.14 et le Tableau I.1.



Figure I.14 différentes configuration géométriques pour le souterrain triphasé. (1) horizontal, (2) vertical, (3) triangulaire [8]

Tableau I.1 Méthodes de pose des câbles souterrains [5]	
---	--

80	Project og 154 mm	
Câbles enfouis directement	Câbles enfouis dans des	Câbles directement enfouis
dans la formation de trèfles	conduits en formation de trèfle	en formation à plat
	PVC desta OD 20100 mere Cancerte alde	
Câbles en l'air à l'intérieur	Câbles enterrés à plat dans des	Des câbles posées à plat
d'une galerie en formation	conduits	dans une galerie
trilobée		



Figure I.15 Les lignes électriques souterraines en pose horizontale [15]

Un conduit doit avoir les caractéristiques suivantes :

- Une résistance mécanique (chocs, écrasements).
- Une étanchéité (à l'eau, aux poussières).
- Non propagateur de la flamme. Voir la figure I.15

I.10 .Les champs électriques et champs magnétique:

I.10.1 .Effets des champs magnétiques:

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

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

• pour des champs magnétiques à 50 Hz compris entre 500 μ T et 5.000 μ T des effets biologiques mineurs ont été rapportés.

• pour des champs magnétiques à 50 Hz compris entre 5.000 μ T et 50.000 μ T on recense des effets sur le système nerveux et la vision.

•pour des champs magnétiques à 50 Hz compris entre 50.000 μ T et 500.000 μ T on constate une stimulation des tissus excitables et des dommages sur la santé sont possibles.



•pour des champs magnétiques à 50 Hz supérieurs à 500.000 μT une firillation ventriculaire a été rapportée [9].

I.10.2 . 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: vibrations chatouillement des de la pilosité, un 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[9].

I.11 .Phénomènes d'induction électromagnétique dans les câbles souterrains :

1. Résistance ohmique - Effets pelliculaires et de proximité

La résistance en courant alternatif d'un conducteur de câble souterrain est plus élevée que la résistance en courant continu par suite des effets pelliculaire et de proximité.

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

Il est difficile de calculer exactement l'accroissement de résistance dû à l'effet pelliculaire dans le cas de conducteurs subdivisés en un grand nombre de brins, comme c'est le cas pour les câbles souterrains. L'effet de proximité ne conduit à une variation appréciable de la résistance effective que pour de très grandes sections [10].

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

Le flux magnétique alternatif dû à la circulation du courant dans les conducteurs produit dans l'écran des câbles des forces électromotrices alternatives longitudinales. Si plusieurs câbles se trouvent côte à côte et que leurs écrans sont électriquement en contact, ces f.e.m. donnent lieu à des courants dans les écrans ce qui crée des pertes supplémentaires.

Il est commode de tenir compte de ces pertes, en les attribuant d'une manière conventionnelle à une augmentation fictive de la résistance des conducteurs.

Des courants de FOUCAULT induits localement et provoquant des pertes peuvent néanmoins se produire pour des câbles tripolaires de très forte section parcourus normalement par des courants intenses. Signalons, pour mémoire, qu'un problème semblable se présente en ce qui concerne les barres blindées de jonction entre alternateur et transformateur [19].

3. Pertes d'énergie des câbles souterrains:

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

- 1. la conductance massique de l'isolant lequel n'est jamais parfait,
- 2. la conductance superficielle, qui dépend de l'état de la surface,
- 3. l'hystérésis diélectrique,
- 4. les effluves et décharges dans les espaces vides. [19].

I.12 .Impact de la pollution harmonique sur les câbles souterrains :

I.12.1 . Augmentation des pertes Joule :

La présence d'harmoniques va, pour une même puissance, augmenter la valeur efficace du courant qui circule dans les câbles électriques. En première approximation, les pertes présentent dans un câble sont les pertes par effet Joule, qui sont proportionnelles au carré de la valeur efficace du courant. On comprend bien alors que les harmoniques de courant vont créer des pertes supplémentaires dans les câbles électriques. Le calcul des pertes Joule dans les câbles peut être défini de la façon suivante :

$$P_{j} = \sum_{n=1}^{\infty} R I^{2} = R_{1} I_{1} + \sum_{n=2}^{\infty} R_{1} I_{n}^{2} = P_{1} + P_{h}$$
(I.1)

19

Le conducteur de neutre des câbles BT va lui aussi être affecté par la présence d'harmoniques de courant sur les réseaux électriques car les composantes homopolaires circulent dans celui-ci. Cette augmentation de pertes, créée par les harmoniques circulant dans les câbles va augmenter la température de fonctionnement du câble[6].

I.12.2 Augmentation de la température :

L'augmentation des pertes par effet Joule dans les câbles va faire augmenter la température de ceux-ci, et notamment dans les gaines comportant les 3 phases et le neutre. Dans une installation avec des charges non linéaires générant beaucoup d'harmoniques 3, le courant dans le neutre peut atteindre 1,73 fois celui de la phase alors que le neutre possède souvent la même section ou une section inférieure à la phase.

I.12.3. Influence sur la durée de vie :

L'augmentation de la température de fonctionnement des câbles va se traduire par un vieillissement prématuré de l'isolant qui entoure l'âme des conducteurs, et donc une réduction de la durée de vie du câble. La loi de vieillissement principalement utilisée est la loi d'Arrhenius. L'augmentation de température va réduire considérablement la durée de vie théorique du câble (durée de vie réduite de 50% pour un THDi de 24%).

I.12.4 .Cas particulier du conducteur de neutre :

La présence de plus en plus importante sur le réseau électrique de charges non linéaires monophasées avec une forte composante d'harmoniques 3 va entraîner des problèmes au niveau du conducteur de neutre. En régime équilibré, avec des charges linéaires connectées au réseau triphasé, le courant dans le neutre est nul. Mais actuellement, du fait des nombreuses charges non linéaires (ordinateurs, téléviseurs, lampes basses consommations...), le contenu harmonique du courant est riche. La valeur efficace du courant dans le neutre peut atteindre, dans le pire des cas, 1,73 fois la valeur efficace du courant dans la phase. Ces charges non linéaires peuvent alors créer un excès de courant dans le neutre qui pourrait conduire dans le pire des cas à un incendie.

I.13. 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 tableau1.2:

Tension	l'axe	5 m	10 m
400 kV	13,2 μT	2,7µT	0,7 μT
225 kV	11,5 μΤ	2 μΤ	0,6 µT
63/90 kV	8,6 µT	1,4 µT	0,4 µT

Tableau I.2champ magnétique d'une ligne souterraine [19].

Les champs magnétiques varient avec l'intensité du courant transporté et la distance, la température, la nature de la terre. [10]

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. [11]



Figure I.16 coupe d'une terre contient une ligne souterrain [11]

Ы		
	21	ρ

Une personne se trouvant juste au-dessus de l'axe d'un câble souterrain est exposée à un champ magnétique typique d'environ 7 μ T au niveau des pieds (mais cinq fois plus faible à hauteur du buste, figure I.16). À une distance de 3 m de l'axe du câble, le champ ne dépasse plus le micro tesla (quelle que soit la hauteur de mesure) et il devient tout à fait négligeable à 10 m [11].

I.13.1 .Les effets à court terme :

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

I.13.2 . Les effets à long terme :

Des études épidémiologiques mettent en évidence depuis longtemps déjà un lien statistique faible, mais néanmoins significatif, entre une exposition prolongée à des champs magnétiques de basse fréquence générés par le réseau a haute tension et un risque accru de leucémie chez l'enfant et même d'autres maladies pour les techniciens et les agents de la maintenance. Il est question ici d'une exposition résidentielle a des champs magnétiques dont l'intensité moyenne est supérieure a $0,3 - 0,4 \mu$ T sur une période prolongée.

I.13.3.Différance 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 [11].





Figure I.17 :Différance enter le champ d'une ligne aérienne et d'un câble souterrain [11]

I.14 .Facteurs affectant, au cours du temps, l'isolation d'un câble souterrain :

L'isolation d'un câble souterrain n'est jamais parfaite. Non seulement, on y trouve des défauts qui dérivent directement de la production du câble mais en outre, l'isolation vieillit inéluctablement.

Lorsqu'un câble est en service, son isolation est le siège de contraintes thermiques, électriques, mécaniques et enfin de contraintes liées à l'environnement. Au cours du temps, ces diverses charges (Tableau. I.3) engendrent des modifications irréversibles de l'isolant. On parle généralement d'un vieillissement intrinsèque du câble concerne, au cours duquel l'isolation se dégrade de façon homogène [18].

Thermique	Electrique	Environnement	Mécanique
Température maximale	Tension (AC, DC)	Gaz (air, O ₂)	Flexion
Température ambiante	Courant	Humidité	Traction
Gradient thermique	Fréquence	Eau	Compression
Cycle thermique	Impulsion	Corrosion	Torsion
			Vibration

Tableau. I.3 : Facteurs affectant, au cours du temps, l'isolation d'un câble souterrain.

Par ailleurs, le vieillissement prématuré des câbles peut provenir de contaminants (particules étrangères), de défauts, de protubérances ou de vides qui apparaissent dans l'isolant lors de la production, du transport ou de l'installation du câble. Initialement, ces imperfections constituent des défauts ponctuels ou localisés de l'isolant. Par contre au cours du temps, elles peuvent s'aggraver et se propager progressivement au sein de l'isolation lorsque le câble est en service. Elles peuvent même impliquer la destruction complète de l'isolant [13].



- 1. Arborescence électrique
- 2. Vide à l'interface
- 3. Vide dans l'isolant
- 4. Contaminant
- 5. Protubérance dans le semi-conducteur
- 6. Décharge à partir d'un contaminant
- 7. Décharge à partir d'un vide
- 8. Décharge à partir de l'isolant
- 9. Décharge à partir du conducteur
- 10. Humidité

Figure I.18 Imperfections dans un câble monophasé. [8]

La figure 1.18 illustre un ensemble d'imperfections susceptibles de se manifester dans un câble monophasé.

I.15 .Défauts dans les câbles :

La fonction première d'un câble électrique est d'acheminer un courant. Lors- qu'un câble n'assure plus cette fonction fondamentale, on dit qu'il est en défaut franc (court circuit, circuit ouvert). Mais il peut également être affecté d'un défaut qui n'interrompt pas l'acheminement des courants qui y transitent.

Le défaut non-franc : l'état initial, et donc les caractéristiques physiques d'origine du câble sont altérées. Ces altérations peuvent affecter la géométrie ou les propriétés électriques et/ou mécaniques des composants et matériaux.

Les défauts non-francs ne constituent pas, en général, une menace immédiate, mais ils peuvent indiquer un vieillissement avancé ou une zone de contrainte intense et donc être annonciateurs d'un défaut plus grave (défaut franc).


Ce vieillissement peut être accéléré par un environnement agressif, et l'occurrence de dégradations dues à des sollicitations locales. En effet, plusieurs contraintes sont susceptibles de s'appliquer localement aux câbles :

— Exposition à des points chauds, par exemple dus au passage du câble proche d'une canalisation chaude.

— Taux d'humidité importants, voire immersion.

— Irradiation due à l'exposition à des rayonnements ionisants.

 Contraintes mécaniques telles que des rayons de courbure très petits, des pincements du câble, ou des vibrations.





Figure I.19 Câbles localement endommagés (images EDF) [13].

— Agressions chimiques résultant d'une contamination par des réactifs (eau borée, fluides réfrigérants) [13].

Ces contraintes sont autant de causes de défauts inhérentes aux environnements dans lesquels les câbles opèrent. Lorsqu'elles sont prolongées, elles peuvent engendrer une modification de la géométrie d'un câble (espacement entre les conducteurs, déchirure de l'écran, abrasion de l'isolant) ou des propriétés des matériaux (permittivité, conductivité, etc). Notons que des défauts de montage ou de fabrication peuvent s'ajouter aux phénomènes évoqués plus haut. La figure I.19 montre des câbles endommagés au-dessus d'une tuyère dans une centrale électrique [13].



I.16 .Conclusion:

L'objectif, de ce chapitre est de donner une vision générale 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 deux types de transport de l'énergie électrique : les lignes aériennes et les câbles souterrains. Enfin nous avons cité quelques défauts et des problèmes des câbles électriques souterrains comme : les courts circuits les harmoniques les défauts de construction et d'isolement.

Chapitre II Modèle électromagnétique des câbles électriques

II.1.Introduction :

Pour la simulation de n'importe qu'un dispositif magnétique nous aurons besoin des caractéristiques électriques, magnétiques et géométriques des différents milieux, les calcules et la représentation du champ électromagnétique produit aux bornes d'un câble vont devenir très simple en utilisant les équations de Maxwell. L'élaboration des modèles mathématiques destinés pour la simulation des caractéristiques électromagnétiques des câbles électriques [20].

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 des afin de visualiser et calculer la distribution des paramètres magnétiques autour et a proximité des lignes électriques l'état statique sans ou avec la présence des défauts dans les phases.

II.2 .Calcul du champ électromagnétique :

L'étude magnétique de n'importe quel dispositif électrique nécessite la connaissance des champs électromagnétiques \vec{B} et du \vec{H} dans chaque parties est très nécessaire pour accès au calcul donc des valeurs du flux, l'effet inductif ou capacitif etc., elles sont en fonction du champ et de l'induction magnétique. Le calcul du champ magnétique est basée essentiellement sur l'exploitation des lois de l'électromagnétisme et la résolution des équations différentielles aux dérivées partielles de Maxwell qui constituent le modèle de départ. [21]

II.2.1. Equations de Maxwell :

James Maxwell (1831-1878), physicien écossais de talent exceptionnel, d'avoir unifié en 1865 ces deux théories de l'électricité et du magnétisme distinctes en une seule et unique dite « Électromagnétisme », cette théorie unifiée les quatre équations de Maxwell. La plupart des phénomènes électromagnétiques sont régis par les équations aux dérivées partielles de Maxwell qui doivent être adaptées au milieu à plusieurs domaines du dispositif à étudier [21]. Tout dispositif électromagnétique En tout point de l'espace obéit aux équations suivantes:



$div \vec{D} = \rho$	Loi de Maxwell-Gauss	(II-1)
$rot \vec{E} = -\frac{\partial \vec{B}}{\partial t}$	Loi de Maxwell-Faraday	(II-2)
$rot \vec{H} = \vec{J} + \frac{\partial \vec{D}}{\partial t}$	Loi de Maxwell-Ampère	(II-3)
$div \vec{B} \; = \; 0$	Loi de conservation du flux magnétique	(II-4)

Avec :

 \vec{E} : Champ électrique en (v/m)

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

 \vec{H} : Champ magnétique en (A/m).

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

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

- ρ : Densité de charge volumique en (C/m³).
- $\frac{\partial \vec{D}}{\partial t}$: Densité de courant de déplacement en (A/m²).

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

- Propriétés magnétiques.

Caractérisation diélectrique.

a-Propriétés magnétiques

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

$\vec{B} = \mu_0 \vec{H} + \vec{B}r$	Relation magnétique	(II-5)
$B = \mu H$	Induction du champ magnétique	(II-6)
Où		
$\mu = \mu_0 \mu_r$	Pour un milieu magnétique	(II-7)

 $\mu_r = 1$ pour un milieu amagnétique. μ_r perméabilité relative du milieu considéré $\mu_0 = 4\pi 10^{-7}$ perméabilité du vide (H/m) [26].



b-Caractéristiques diélectrique

Induction du champ électrique est donnée par :

$$\vec{D} = \varepsilon \vec{E}$$
 Relation diélectrique (II-8)

Où :

 $\varepsilon = \varepsilon_0 \varepsilon_r$ Avec ε_0 : Permittivité de l'air et ε_r : Permittivité relative du milieu considéré en (F/m).

Pour un milieu conducteur, la densité de courant est donnée par la loi d'Ohm généralisée : $\vec{J} = \sigma \vec{E}$ (Loi d'ohm) (II-9)

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

$$\vec{J} = \vec{J}_{\rm s} + \vec{J}_{ind} \tag{II-10}$$

Js : la densité de courant imposée dans l'inducteur et Jind la densité du courant induit.

$$\vec{J}_{ind} = \sigma \left[\vec{E} + \vec{v} \wedge \vec{B}\right]$$
(II-11)
Où σ la conductivité électrique en (S/m), v le vecteur vitesse en (m/s).

Le terme $\sigma \vec{E}$ exprime le courant résultant du champ électrique \vec{E} et le terme $\sigma(\vec{v}\Lambda\vec{B})$ exprime le courant résultant du mouvement [21].

c- Relations de continuité entre deux milieux différents

Si le système est composé de deux milieux différents, Les champs électriques et magnétiques des différents milieux sont liés à l'interface par des relations de continuité afin de relier deux milieux de propriétés électromagnétiques différentes. Soient deux milieux M1 et M2. On appelle $(\vec{E}_1, \vec{B}_1, \vec{H}_1, \vec{D}_1)$:les différents champs de M1 et $(\vec{E}_2, \vec{B}_2, \vec{H}_2, \vec{D}_2)$:*et* de M2. Soit \vec{n}_{12} la normale unitaire à la frontière entre M1 et M2 dirigée de M1 vers M2 (Figure II.1).





Figure. II-1 Interface entre deux milieux différents

Dans le cas général, un dispositif électrotechnique comporte des milieux différents (fer, air, aluminium, cuivre, ...etc.). Avant d'aborder la résolution du problème, il est nécessaire de connaître le comportement des champs électromagnétiques à travers l'interface entre deux milieux différents. En effet, la composante normale de l'induction B est continue au passage entre deux milieux différents [21,24].

d- Conditions de passage

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

La continuité de La composante normale de l'induction magnétique

$$\vec{n}.(\vec{B}2 - \vec{B}1) = 0$$
 (II-12)

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

$$\vec{n} \wedge (\vec{H}2 - \vec{H}1) = \vec{J}_s \tag{II-13}$$

La continuité de la composante tangentielle du champ électrique.

$$(\vec{E}2 - \vec{E}1) \wedge \vec{n} = 0 \tag{II-14}$$

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

$$\vec{n}.\left(\vec{D}2 - \vec{D}1\right) = \rho_s \tag{II-15}$$

27

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

D'après les équations précédentes, on constate qu'il y a une continuité des composantes respectivement normale de l'induction magnétique \vec{B} et tangentielle du champ électrique \vec{E} et une discontinuité des composantes respectivement tangentielle du champ magnétique \vec{H} et, normale de l'induction électrique \vec{D} par la présence du courant et des charges surfaciques, à la traversée de la surface de séparation des deux milieux 1 et 2. Le système d'équations contient beaucoup d'inconnues et se prête donc mal à une résolution numérique [21,27].

II.3. Modèles électromagnétiques :

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

- Modèle électrostatique.
- Modèle électrocinétique.
- Modèle magnétostatique.
- Modèle magnétodynamique [27].

II.3.1 Modèle Electrostatique :

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

$$\frac{\partial \vec{B}}{\partial t} = \vec{0} \tag{II-16}$$

Les équations de ce modèle se simplifient comme suit :

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

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

$$E = -\overline{\text{grad}} V \tag{II-18}$$

Le modèle se résume alors à l'équation suivante :

$$div(\varepsilon \, grad \, V) + \rho = 0 \tag{II-19}$$

II.3.2 Modèle magnétostatique :

М	
28	

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

II.3.2.1 Modèle magnétostatique scalaire.

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

Rot H =0 Courants nuls

Div B=0 Conservation du champ

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

H : Dérive d'un potentiel scalaire magnétique \emptyset , d'où la nomination du modèle magnétostatique scalaire, tel que : *H* =-grad (\emptyset)

Le modèle se ramène alors à l'équation :

$$Div (\mu grad(\phi)) = Div Br$$
 (II-20)

II.3.2.2 Modèle magnétostatique vectorielle.

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

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

II.3.3.3 Formulation en termes de potentiel vecteur

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

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

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

$$div(A) = 0 \tag{II-23}$$



la formule du modèle magnétostatique vectoriel:

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

-Le calcul du champ magnétique des lignes électriques

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

$$div (J + jwD) = 0$$
 et $div \left(J + \frac{\partial D}{\partial t}\right) = 0$ lors de l'utilisation du champ électrique:
 $div \left(J + \frac{\varepsilon \partial E}{\partial t}\right) = 0$ (II-25)

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

$$\operatorname{rot} H = J' = J + jwD = \sigma E + jw\varepsilon E = (\sigma + jw\varepsilon)E \tag{II-26}$$

$$div(\operatorname{rot} H) = div J' = div(J + jwD) = 0$$
 (II-27)

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

$$\operatorname{rot} H = \operatorname{rot} (\mu^{-1}B) = J' = (\sigma + jw\varepsilon)E \tag{II-28}$$

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

$$rot E = -jw(rot A) = rot (-jwA)$$
(II-29)

La combinaison des équations précédentes donne :

$$\operatorname{rot}(\mu^{-1}\operatorname{rot} A) = (\sigma + jw\varepsilon)(-jwA) \tag{II-30}$$

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

$$-w^{2}\varepsilon A + jw\sigma A + \operatorname{rot}(\mu^{-1}\operatorname{rot} A) = 0$$
(II-31)



-Le calcul du champ électrique des lignes électriques

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

$$\begin{cases} E = -\text{grad } V \\ div D = \rho \\ div I = -iw\rho \end{cases}$$
(II-32)

La loi de Faraday s'évalue à zéro:

$$\operatorname{rot}(E) = -jwB = 0 \tag{II-33}$$

Inclure le courant de déplacement dans la définition du courant, cela vous donne *div* J' = 0 et $J' = \sigma E + j\omega D$ pour la loi de conservation actuelle et la définition actuelle, respectivement. Nous obtiendrons l'équation différentielle partielle 2D suivante pour la variable V:

$$-div\left((\sigma + jw\varepsilon)\nabla V\right) = 0\tag{II-34}$$

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

 $V_{\rm a} = V_0 \qquad V_{\rm b} = V_0 e^{-j\frac{2\pi}{3}} \qquad V_{\rm c} = V_0 e^{+j\frac{2\pi}{3}},$

II.4 .Déclaration des conditions aux limites :

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

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

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

М	
31	Q

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

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

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

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

II.5.1 .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 [27].

Considérons le domaine suivant:



Figure II.2 Maillage type différences finies [27]

```
32
```

L'application d'un développement limité en séries de Taylor de la fonction à déterminer en chacun des nœuds du maillage, l'approximation des dérivées aux points (i, j)

La méthode des différences finies est très attrayante à cause de sa simplicité pour des problèmes de géométrie régulière, par contre très difficile pour les problèmes à géométrie complexe et des conditions aux limites quelconques.

II.5.2 .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 structure tridimensionnelle ou lorsque l'air ou les milieux passifs occupent une grande partie du domaine d'étude. L'inconvénient de cette méthode est 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).

II.5.3 .Méthode des Volumes Finis (MVF) :

La Méthode des Volumes Finis se déduit de la MDF. Le domaine d'étude (Ω) 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.



Figure II.3 Méthode des Volumes Finis

II.5.4 .Méthode des Eléments Finis (MEF) :

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

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

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

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

Il existe différents types d'éléments :

• élément linéique (1D).



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

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

-Problème à une dimension (élément droit) :



a)élément linéaire (03 nœuds) b) quadratique (06 nœuds) c)cubique (09 nœuds)

Problème à trois dimensions



Elément linéaire (04 nœuds)

Elément quadratique (10 Nœuds)

Figure .II.4 Discrétisation du domaine d'étude (maillage)

Ы		
	35	_p

a- Fonction d'approximation

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

b- Formulation Intégrale

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

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

La formulation intégrale peut être développée de deux manières:

- Variationnelle.
- Résidus pondérés.

b-1 Formulation Variationnelle

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

$$\mathfrak{H}(A) = \int_{\Omega} L d\Omega \tag{II-55}$$

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

II.6. Implémentation du modèle dans le logiciel COMSOL :

Pour la simulation des caractéristiques électromagnétiques des lignes électriques, il existe plusieurs facteur 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.

Dans le but d'expliquer le phénomène d'interaction magnétique entre les lignes de champ et le sol et la présence des défauts électriques sur les caractéristiques électromagnétiques du



milieu, nous allons faire une simulation numérique avec la méthode des éléments finis [22,23].

Cette étude nécessite l'utilisation deux logiciels suivants :

- COMSOL Multiphasiques 5.3.
- MATLAB 7.12.0.

II.6.1 .Dessin et dimension de la géométrie du système :

Cette étape consiste à représenter le modèle en deux dimensions dans une interface graphique (le domaine d'étude) du logiciel COMSOL pour le premier exemple on va dessiner la forme géométrique d'un câble électrique base tension en 2D qui contient :



Figure II.5 Câble électrique BT avec le maillage dans le logiciel Comsol.

II.6.2. Processus de simulation par le logiciel COMSOL :

Le logiciel COMSOL Multiphasiques, fondé sur la méthode des éléments finis permis d'effectuer le calcul du champ magnétique dans les deux domaines électrostatique et magnétostatique. La possibilité de savoir la valeur du champ magnétique à n'importe quel point du domaine, permettra une étude de manière exacte dans cette géométrie, et une bonne distribution du champ de n'importe qu'un système complexe avec la résolution des méthodes numériques qui peuvent apporter des solutions acceptables et simplifiées.

COMSOL Multiphasiques contient les différentes étapes du processus de simulation « définition de la géométrie, les propriétés matériaux, le maillage, choisir le domaine



physique d'étude, résolution et l'exportation des résultats » sont intégrées dans une interface graphique, représentée dans la figure II.6.

🙂 🗋 🍃 🔜 民 🕨 ち さ 暗 行 時 前	R 🕅 R .	·			BT.m	nph - COMSOL Mu	Itiphysics		
File Home Definitions Geometry	Materials F	hysics Mesh	Study Res	ults Developer					
A Application Builder Application Model	Geometry	rt ink + Add Material Materials	Champs magnétiques • Physics	Add Physics Build Mesh Mesh 1 • Mesh	Comp	ute Study Add 2 • Study Study	Densité de flux magnétique, norme Resu	Add Plot (mf) • Group •	Windows • De Layour
Model Builder	Settings	Properties			* #	Graphics			* #
						ΘΘ⊕	Ja 🛪 🗐 🗌 👩	A	
	Parameter	S			1 -			8	
Global Definitions	▼ Param	eters			Î	Surface: Der	freq(1)=50 Hz nsité de flux magné	itique, norme (*	r)
Materials	* Name	Evpression	Value	Description		mm 6012			
4 (9) Component 1 (comp 1)	Dcon	0.60[mm]	6 9E-4 m	Description	4	0012			_ 1
Definitions	Tins	1.44[mm]	0.00144 m			6010		_/ [−]	0.06
Boundary System 1 (sys 1)	Dins	5(mm]	0.005 m			6008 -		<u> </u>	0.08
View 1	Tsec	(Dins/2-Dcon/2	3.575E-4 m		1	6006			0.05
A Geometry 1	Tpbs	2.9[mm]	0.0029 m				(\bigcirc)		0.05
A Materials	Dpha	89.2[mm]	0.0892 m			6004 -			0.04
Air (mats)	Dfic	2.5[mm]	0.0025 m		4	6002			0.04
 Auminum [solid,buik] (mut4) Soil (mat5) 	Tfih	0.5[mm]	5E-4 m		1	0002	A		0.03
PVC - Polyvinyl chloride (math)	Dfib	9.2[mm]	0.0092 m			6000	/(O) /(O)		0.05
Matériau 7 (mat7)	Tarm	6.5[mm]	0.0065 m		4	5998		/ / -	0.02
Champs magnétiques (mf)	Narm	floor(pi*(Dcab/	92		1	EDOG			0.02
A Mesh 1	Dcab	219.0[mm]	0.219 m			5990		/ _	0.01
▷ 🖘 Study 2	mfil	0.5[mm]	5E-4 m		1 i -	5994 -		-	0.01
🔺 連 Results	marm	0.25[mm]	2.5E-4 m			5992		. –	
Data Sets	Acon	500[mm^2]	5E-4 m ²			5552	0 5	10	_
ens Derived Values	Ncon	Acon/(pi*(Dcon	1337.2			-3	0 3	10 mm	
Tables	Apbs	pi*(Dins+Tpbs)	7.1974E-5 m ²		d.	Messages Proc	ress Log Evalua	ation 2D	
Densite de flux magnetique, norme (mf)	<			>		incosuges	,		1
Finant	1 1 E	= 🔪 📂 🗖 👘	*			6			
Reports					1	COMSOL Multiphys	sics 5.3.0.260		
	Name:				4	Opened file: H:\coc	om\BT.mph	Activer M	lindows
								Actively	vindows
	Expression:							Accedez au	k parametres
					~			activer Wind	lows.
				831 MB I 100	18 MB				

Construction physiquedéclaration des paramètresGéométrie a étudiéFigure II.6 : Présentation du logiciel COMSOL Multiphasiques

II.6.3. Structure du programme :

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

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



Figure II.7 Différents blocs du programme

Ч_		
	38	ρ

A) Bloc d'entrée (Préprocesseur)

Dans ce bloc, on trouve les différentes données concernant la description de la géométrie des câbles électriques et des lignes de transmission THT ,HT MT, BT ainsi que la discrétisation, les différentes propriétés physiques, le calcul des coefficients des équations algébriques et les conditions aux limites.

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

A-1 Base de données

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

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

A-2 Maillage

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

Les erreurs numériques inhérentes à la méthode des éléments finis sont le plus souvent dues au maillage [22].

A-3 Affectation

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

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

B) Bloc de résolution (Processeur)

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

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

C) Bloc de sortie (Poste processeur)

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

Présenter les résultats de façon intelligible et synthétique :

- sous forme numérique.

-sous forme graphique [23].

II.7. Conclusion :

Dans ce chapitre, on a donné les différentes équations aux dérivées partielles (EDP), nous avons cité les méthodes de résolution des équations EDP pour notre cas nous allons utiliser la méthode des éléments finis en 2D par l'exploitation du logiciel COMSOL pour la résolution. Bien sure après avoir spécifié certaines données telles que le domaine, les conditions aux limites, et le maillage de la géométrie. Après simulation les résultats peuvent être exportés même vers l'éditeur MATLAB. La modélisation numérique des lignes de champ autour des particules dans un dispositif de séparation électromagnétique nécessite impérativement l'utilisation d'un outil numérique de calcul comme le logiciel (COMSOL Multiphysics) qui donnera les gradeurs du champ magnétique dans chaque point du domaine d'étude.

Chapitre III Simulation des défauts dans les câbles électriques souterrains

III.1.Introduction :

Pendant les dernières décennies, beaucoup de chercheurs dans le monde entier ont essayé d'analyser et d'étudié les caractéristiques magnétiques lignes électriques des câbles électriques souterrains ainsi que les interactions produites avec la matière organique qui indiquent les effets nocifs, et leurs risques sanitaires potentiels qui peuvent résulter de l'exposition humaine au champ électromagnétique.

Dans ce chapitre nous allons faire des simulations des lignes électriques souterraines avec la méthode des éléments finis afin de monter la distribution des lignes de champ électromagnétiques autour et prés des lignes de transmission souterraines, ainsi qu'une évaluation de la pollution électromagnétique des câbles électriques dans deux sain et en présence des défauts.

III.2 .Représentation des câbles de transmission souterrains :

Les câbles électriques sont caractérisés par des formes géométriques et des dimensions différentes selon la puissance et les tensions véhiculées à travers ces câbles électriques. Les figures suivantes et les tableaux représentent les dimensions et la géométrie de chaque type.

III.2.1. Forme et taille des câbles électriques :



1. Câbles électriques souterrain THT :

Figure III.1 : La forme et la taille du câble électrique souterrain THT

Paramètre et la taille de câble	Valeur
Section de conducteur	630 mm ²
Diamètre du conducteur	30.3 mm
Diamètre d'isolation	98.5 mm
Diamètre d'écran	105.7 mm
Diamètre extérieur	117 mm
Courant nominal	740A

2. Câbles électriques souterrain HT :



Figure III.2 : La forme et la taille du câble électrique souterrain HT

Tableau III.2	Les caractéristiques	de Câble HT [29]
	200 00000000000000000000000000000000000	

Paramètre et la taille de câble	Valeur
Section de conducteur	300mm ²
Diamètre du conducteur	19.7414mm
Diamètre d'isolation	56 mm
Diamètre d'écran	61.2 mm
Diamètre extérieur	76.1 mm
Courant nominal	433 A

3. Câbles électriques souterrain MT :



Figure III.3 géométrie du câble moyenne tension MT

Tableau III.3	Les caractéristiques d	le Câble MT [30]
---------------	------------------------	------------------

Paramètre et la taille de câble	Valeur
Tension nominal	12 kv
Diamètre de Protection PVC	32 mm
Diamètre d'écran	24.9 mm
Diamètre d'isolant	20.9 mm
Diamètre de conducteur	12.3 mm
Courant nominal	312A

4. Câbles électriques souterrain BT :



Figure III.4 géométrie du câble moyenne tension BT

 Tableau III.4
 Les caractéristiques de Câble BT [31]

Paramètre et la taille de câble	Valeur
---------------------------------	--------

```
41
```

Courant nominal	119A
Diamètre de Protection PVC	12.38mm
Diamètre d'écran	10.58 mm
Diamètre d'isolant	4.3378 mm
Diamètre de conducteur	3.3378 mm
Diamètre de brin	1 mm

Le tableau III.5 représente les caractéristiques électriques des matériaux utilisés dans les câbles électriques souterrains

Matériaux	Conductivité	Perméabilité	Permittivité
		relative	relative
Air	10 ⁻¹⁴	1	1
Sol	1	1	28
Polyéthylène	10 ⁻¹⁸	1	2.25
Polypropylène	10 ⁻¹⁸	1	2.36
Semi conductrice	2	1	2.25
Polyéthylène (XLPE)	10 ⁻¹⁸	1	2.5
Acier allié à haute résistance	$4.032 \ 10^6$	1	1
Cuivre	5.096 10 ⁷	1	1
Plomb	$4.55 10^6$	1	1
Aluminium	3.774 10 ⁷	1	1

Tableau III.5 caractéristiques des matériaux des câbles souterrains

III .3.Les Caractéristiques géométriques des lignes électriques :

Tableau III.6 les distances entre les câbles souterrains et la terre [28, 29, 30,31]

Câble	Distance (mm)	
Tension	H (mm)	D (mm)
THT	1600	234
HT	1000	152.8786
MT	700	64
BT	600	



Figure III.5: Caractéristiques géométriques du modèle en 2 Dimensions

Les lignes électriques souterraines sont caractérisées par des distances entre chaque phase selon les normes internationales. Le tableau (III.6) montre les formes géométriques de ligne électrique.

Ces figures représentées les caractéristiques géométriques des lignes électriques où, D c'est la distance entre les câbles et H c'est la profondeur des câbles dans le sol.

III .4.Les géométries et la taille du câble électrique :

Dessin et dimension de la géométrie du système

Cette étape consiste à dessiner la forme géométrique et représenter le modèle dans une interface graphique (le domaine d'étude voir la figure III.6) du logiciel COMSOL pour les quatres modèles des câbles souterrains THT, HT, MT, BT en 2D :





Très haut tension THT

Haut tension HT





Figure III.6 Géométrie des câbles électriques dans logiciel Comsol

III .5.Le maillage des câbles électriques souterrains :

Le maillage des câbles électriques souterrains est fait par la méthode des éléments finis. Le maillage est une discrétisation qui contient un nombre de nœuds, de triangles et d'éléments qui dépendent du système à étudier (la taille la géométrie la nature complexe ou pas) le maillage est représenté dans la figure III.



Très haut tension THT

Haut tension HT



Figure III.7 Maillage des câbles électriques souterrains

III .6 Résultats de simulation du champ magnétique :

Concernant cette partie nous avons utilisé le module magnétostatique pour la modélisation des phénomènes magnétiques et le calcul du champ magnétique produit à proximité des lignes de transmission.









Figure III.8 L a densité du courant électrique dans les câbles électriques

La figure III.8 montre la concentration de la densité du courant électrique dans les conducteurs en cuivre ou en aluminium des câbles électriques des quatre types de câble (THT HT MT BT).







ΗT



Figure III.9 La densité de flux magnétique dans les câbles électriques

Les figures (III.9) montrent la distribution de la densité de flux magnétique à l'intérieur de chaque câble électrique. D'après ces résultats on peut constater que la densité de flux magnétique est intense l'intérieure et autour des conducteurs à cause de la grande intensité du courant circulant dans les câbles.

II.6.3 . La distribution du champ magnétique :



47







Figure III.10 : La distribution du champ magnétique

D'après ces résultats on peut constater que la distribution du champ est très importante à cause de la grande intensité du courant circulant dans les trois câbles de chaque niveau de tension . les lignes du champ magnétique sort du sol vers l'air. Il existe toujours des interactions électromagnétiques entre les lignes électriques comme les deux effets inductif et capacitif cela est représenté par les lignes du champ ente les phases.

III.6.4 .Mesure du champ magnétique prés des lignes électriques souterraines :

Les résultats de simulation montrent la distribution horizontale et verticale (selon les deux axes x et y) de la densité de flux magnétique à plusieurs niveaux au dessus des lignes électriques souterraines, voir la figure (III.11). Les mesures selon l'axe x sont fêtes par rapport au dessus des câbles comme point de référence zéro.





Figure III.11: La densité du flux magnétique prés et autour des câbles électriques

Les résultats de la figure (III.11) montrent l'allure du champ magnétique en fonction des distances, Le champ magnétique augmente et atteint un maximum prés des trois câbles électriques, prés et aux dessus de la ligne. Lorsqu'on s'éloigne des câbles électriques le champ magnétique démunie et sera moins important dans les deux directions.

III.7 .Résultats de simulation du champ électrique :

La représentation du champ électrique produit à proximité des lignes de transmission nécessite l'utilisation du module électrostatique pour la modélisation et la simulation du champ électrique. Les résultats de simulation montrent l'intensité du champ électrique à l'intérieur des câbles électriques souterrain.



49



ΗТ



Figure III.12 : potentiel électrique prés des lignes électriques souterraines

Les figures III.12 précédentes montrent la distribution de champs électrique dans les câbles électrique souterrains (THT HT MT BT), Le champ électrique à l'intérieur du conducteur est maximale indique par la couleur rouge, mais il ne dépasse pas l'écran semi-conducteur qui joue le rôle d'isolation ou d'un blindage électrique et n'atteint plus la surface extérieure des câbles THT HT MT BT.

III.7.1. Mesure du champ électrique:

La Figure III.13 présente le champ électrique produit à proximité de lignes électriques souterraines. Les résultats de simulation montrent la distribution du champ électrique à plusieurs niveaux au dessus de lignes électriques souterraines.





HT



MT BT Figure III.13 : Champ électrique prés des lignes électriques souterraines

Les figures III.13 illustrent que le champ électrique est très négligeable et proche du zéro, car il ne dépasse pas l'isolation de l'écran semi-conducteur pour les câbles THT HT MT BT.

III.8. Présence d'un défaut de court circuit dans les lignes électriques souterrain :

-Courant de court circuit : la circulation d'un courant de court circuit dans une phase électrique donne naissance à un champ magnétique important .Le tableau (III.7) résume les valeurs des courants de court circuit pour chaque type de ligne électrique.

Tableau III.7 : les caractéristiques des courants de CC du réseau électrique, [28, 29, 30,31]

Les	lignes	THT	HT	MT	BT
électriques	5				
Icc (KA)		90.8	42.9	28.366	3
Vcc (KV)		450	145	12	0.450



III.8.1 .La densité de flux magnétique dans les câbles électriques en court circuit :

Figure III.14: La densité du flux magnétique en présence d'un court circuit

La figure (III.14) illustre la distribution du champ magnétique en cas de court circuit dans la phase intérieur. Les résultats de simulation montrent que la distribution du champ magnétique est très importante dans la phase affectée par le courant de défaut par rapport aux autres phases qui se trouvent en état sain.

III.8.2. Mesure du champ magnétique prés des lignes électriques souterraines en C-C :



Figure III. 15 : Calcul du champ magnétique pour le cas d'un court circuit dans la phase

La figure III.15 illustre la mesure du champ magnétique prés des lignes électriques souterraines en court circuit. La présence d'un défaut de court circuit dans les quatre types de lignes électriques génère un champ magnétique de différentes valeurs à cause de la puissance transmise et le courant de court circuit pour chaque type de ligne électrique.

Note 1 : Les mesures au niveau des courbes sont des mesures effectuées au-dessus du câble, précisément au point de 39 millimètres et transportées par 50 millimètres pour s'arrêter au point 400 millimètres au-dessus du câble


III.9 Présence d'un clou proche d'un câble électrique de haute tension

La figure III.16 montre une coupe longitudinale d'un câble HT souterrain de plusieurs couches.



Figure III .16 : Une coupe longitudinale d'un câble HT souterrain

 $D{=}\;19.5441\,mm$. $E{=}\;21.9441\;mm$. $F{=}\;57.9441\;mm$. $G{=}\;60.3441\;mm$. $H{=}\;65.4411\;mm$. $L{=}\;76.1\;mm$

Une simulation d'une perforation d'un câble à travers un clou ferreux, nous supposons quatre positions pour le clou de pincement à des différentes distances :

-Dans la première position : nous mettons la pièce métallique (clou) prés du câble.

-Dans la deuxième position : la pièce métallique pénètre l'isolation extérieure (la gaine) ainsi que l'écran de plomb de câble.

-Dans la troisième position : la pièce métallique pénètre l'isolation extérieure ainsi que l'écran de plomb de câble et le premier semi-conducteur et s'arrête au milieu de l'isolateur spécial (XLPE).

-Dans la quatrième position: la pièce métallique pénétré le câble et atteint le conducteur de cuivre.

III.9. Résultats pour une coupe longitudinale :

Nous observons et évaluons la distribution et la variation de champ magnétique et électrique dans le câble et la terre. Lorsque le clou s'approche du câble électrique souterrain la distribution du champ magnétique change et prend plusieurs formes.

Pour le premier et le deuxième cas le champ magnétique est moins important, le troisième cas le clou casse l'écran métallique et produira une fuite importante du champ magnétique. Le



dernier cas est caractérisé par un arc électrique important et une décharge électrique vers la terre et puis un défaut dans le réseau électrique.



Figure III .17 : Le distribution du champ magnétique dans le câble avec un clou et la terre.



Troisième position

quatrième position

Figure III.18 calcul du champ magnétique prés du câble

La variation de champ magnétique prés du câble pour les quatre cas montre que ce dernier est très intense pour le dernier cas en présence du défaut .

III.9.1.Résultats du champ électrique pour une coupe transversale:

La figure III.19 Représente la distribution du champ électrique pour les quatre positions. Le camp est très négligeable pour les trois premières positions a cause su blindage par le semi conducteur. Le dernier cas est caractérisé par une forte distribution du champ électrique autour du câble grâce au contacte direct du clou avec le conducteur et le sol.

56



Premier position

Deuxième position



Troisième position

Quatrième position





Premier position

deuxième position

57







Figure III.20 calcul du champ électrique en présence d'un clou pour une coupe transversale.

Les courbes de la figure III.20 donne la mesure du champ électrique, il est absent dans les première et deuxième positions, mais lorsque la pièce a pénétré dans le semi conducteur et le câble a touché le conducteur sa valeur a augmenté au niveau du sol et surtout dans la zone de pénétration.

III.10.Présence des harmoniques dans une ligne haute tension souterraine :

Les courants harmoniques sont des courants électriques de fréquences multiples de la fréquence fondamentale de 50 Hz qui pollue les réseaux électriques. Le tableau III.5 : montre les valeurs maximales des taux d'harmoniques acceptables dans une ligne souterraines de haute tension.

Rang h	НТ
3	2%
5	2%
7	2%
9	1%

Tableau III.8 : valeurs maximales des taux d'harmoniques

III.10.1. la distribution du champ magnétique des lignes électriques :

Les résultats de simulation pour les quatre types d'harmonique sont représentés dans la figure III .21. La variation de la densité de flux magnétique dépend de l'intensité des courants

H		
	58	

harmoniques et la fréquence de chacune. La production des champs magnétiques à plusieurs fréquences entre les câbles génère une mutuelle et des couplages inductif et capacitif. Tout cela entrainera un échauffement et puis la perte d'isolement entre les différentes parties du câble.









HT

Figure III.21 distribution de champ magnétique en présence d'harmoniques

III.11.Conclusion:

Dans ce chapitre nous avons simulé numériquement à l'aide du logiciel de COMSOL Multiphysics la distribution du champ électromagnétique des lignes de transmissions

H		
	59	ſ

électriques souterraines THT HT MT BT pour une fréquence de 50 hertz et simulé les déférant défauts dans les câbles souterrain. Les résultats obtenus à l'aide de la méthode des éléments finis montrent les intensités du champ électromagnétique à n'importe quel endroit près des lignes de transmission.

La présence des défauts comme : le court circuit, les harmoniques en plus un défaut de pincement d'un clou dans un câble souterrain modifié les caractéristiques électromagnétiques dans et autour des câbles souterrains. Ces défauts résultent des conséquences néfastes sur l'état de santé du câble et des problèmes de décharge interne, un échauffement excessif, cela causera une dégradation des matériaux et un vieillissement prématuré.

Dans le futur nous voulons faire des études concernant la présence des défauts de plusieurs natures en fonction du temps, même de faire des simulations et des essaies expérimentaux concernant la détection des défauts dans les câbles électriques par le principe de la décharge partielle.

60

Conclusion Générale

Conclusion Générale

Les effets de la pollution électromagnétiques à basse fréquence constituent un axe de recherche fondamental très important. Pour cette raison il existe des normes internationales pour les distances entre les agglomérations urbaines régionales et le réseau électrique, car il y a une pollution électromagnétique sur l'environnement, la santé des êtres humains, interférences électromagnétiques.

L'objectif principal de ce mémoire est de montrer la distribution du champ électromagnétique au voisinage des lignes électriques souterraines de différentes géométries et tensions dans l'état sain et transitoire.

De ce fait, une simulation numérique avec le logiciel COMSOL Multiphysics a élément finie nous a offert la possibilité d'évaluer les paramètres physiques et magnétiques (l'intensité du champ magnétique et électrique des lignes électriques a des différentes distances selon x et y).

La simulation des lignes électriques a montré l'influence de l'intensité du courant de ligne sur la géométrie et la profondeur de chaque type (THT,HT,MT ,BT) sur la distribution et l'intensité de champ des lignes électriques.

D'après les résultats de simulation on constate que la présence des défauts comme : le court circuit, les harmoniques en plus un défaut de pincement d'un clou dans un câble souterrain modifié les caractéristiques électromagnétiques (l'amplitude ou la distribution) dans et autour des câbles souterrains. Ces défauts résultent des conséquences néfastes sur l'état de santé du câble et des problèmes de décharge interne, un échauffement excessif, cela causera une dégradation des matériaux et un vieillissement prématuré.

Perspectives :

Dans le futur nous voulons faire des études concernant la présence des défauts de plusieurs natures en fonction du temps, même de faire des simulations et des essaies expérimentaux concernant la détection des défauts dans les câbles électriques par le principe de la décharge partielle.

Référence :

[1] Pierre Lebas «diagnostic des câbles souterrains.» thèse Faculté des Sciences Appliquées Université de Liége 2008

[2] Haddad Lyazid et Hami Khodir «Calcul des paramètres et caractéristiques des lignes électriques triphasées. » thèse Université Abderrahmane mira – BEJAÏA 2015

[3] MEZIANT Rachida et SAHLI Siham « Calcul du champ électromagnétique généré par les réseaux électriques en vue de la compatibilité électromagnétique.» thèse UNIVERSITE ABDERRAHMANE MIRA – BEJAIA 2017

[4] DRAPER Gerald «high voltage power lines.» British Medical Journal, 4 June 2005,

[5] Nexans France «Les câbles Souterraines HT. » cahier technique 2004

[6] Wilfried Frelin «Impact de la pollution harmonique sur les matériels de réseau.» thèse Energie électrique. Université Paris Sud - Paris XI, 2009

[7] Mohamed Zellagui «câbles souterraines MT et BT.» thèse université batna2 2018

[8] Pierre Lebas « diagnostic des câbles souterrains par détection de décharges partielles» thèse Faculté des Sciences Appliquées Université de Liège 2008

[9] Ferdinand de Lichtervelde « Les champs électromagnétiques dans les réseaux de distribution» article gestionnaire du réseau de transport belge.bruxele

[10] Philippe FOLLENFANT « la maitrise de l'urbanisme autour des lignes de transport d'électricité» Conseil Général de l'Industrie de l'Énergie et des Technologies Août 2010

[11] Elia Group company « Les champs électromagnétiques et le réseau à haute tension»Elia, département Communication - Février 2015

[12] guide pratique «Réseaux et branchements basse tension souterrains en lotissement»

8 Décembre 2005

[13] Nassif Berrabah «Problèmes inverses pour le diagnostic de câbles électriques à partir de mesures de réflectométrie » Université Rennes 1, 2017

[14] product trang catalogue « câble basse tension » companies HELINC CABLES S.A

[15] Ayad A.N.E.I., Krika W., Boudjella H., Benhamida F., Horch A. (2019). « Simulation of the electromagnetic field in the vicinity of the overhead power transmission line», European Journal of Electrical Engineering, Vol. 21, No. 1, pp. 49-53. https://doi.org/10.18280/ejee.210108

[16] Smahi W, Slimani A. Simulation « d'une agression rayonnée d'un câble électrique . mémoire de master» . Department of Electrical Engineering, Kasdi Merbah University Algeria 2018.

[17] Zellagui Mouhemed « Etude des protections des Réseaux électrique MT (30 et 10 KV) ».Université mentouri constentine 2010

[18] Bouguerioune Noredine «Etude d'une décharge électrique a l'intérieure d'une vacuole dans un cable de haut tension » thése mémoire de magister électrotechnique Université mouloud mammri de tizi-ouzou 2005

[19] Scribd «Parametres Lignes Electriques » cahier technique

[20] William A.Thue « Electrical Power Cable Engineering » MARCEL DEKKER, INC.

NEW YORK • BASEL U.S.A 2003

[21] 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.

[22] Tamer Bécherrawy « Électromagnétisme : équations de Maxwell propagation et émission » UNIMARC | BibTeX | RIS2012

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

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

[25] Theory for the Magnetic Fields, Submarine Cable 4 - Inductive Effects & capacitive AC/DC Module 2018 COMSOL 4.3pdf www.comsol.com.

[26] 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

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

[28] TFkable «câbles haute et très haute tension.».cahier technique TFkable membre europa cable 2016

[29] alfanar «high voltge power cables.» cahier technique alfanar KSA 2013

[30] LEONI Studer AG «Câbles d'énergie et Accessoires» cahier techniqueDécembre 2008

[31] Imacab «catalogue câbles.» cahier technique service marketing Imacab 2019

الخلاصة : في هذا العمل قمنا بمحاكاة المجال الكهرومغناطيسي حول ومحيط خطوط الكهرباء تحت الأرض المختلفة دون وجود وبوجود أخطاء عابرة مثل الدوائر القصيرة ووجود التوافقيات. لقد أظهرنا أن وجود عيوب مثل: ماس كهربائي، التوافقيات بالإضافة إلى عيب قرصة من مسمار في كابل تحت الأرض تعديل الخصائص الكهرومغناطيسية (السعة أو التوزيع) في وحول الكابلات تحت الأرض. هذه العيوب تؤدي إلى آثار صحية ضارة من مشاكل التصريف الكابل والداخلية، وارتفاع درجة الحرارة، والتي سوف تسبب تدهور المواد والشيخوخة المبكرة

الكلمة الرئيسية : طريقة العناصر النهائية ، COMSOL ، كابل ، عيب ، خط تحت الأرض

Abstract: In this work we have simulated the electromagnetic field around and in the vicinity of the different underground power lines without and in the presence of transient faults such as short circuits and the presence of harmonics. We have shown that the presence of defects such as: short circuit, harmonics in addition to a pinch defect of a nail in an underground cable modified electromagnetic characteristics (amplitude or distribution) in and around underground cables. These defects result in adverse health effects of the cable and internal discharge problems, overheating, which will cause material degradation and premature aging. **Keyword: finite element method, COMSOL, Cable, defect, underground line.**

Résumé : Dans ce travail nous avons simulé le champ électromagnétique autour et au voisinage des différentes lignes électriques souterraines sans et en présence des défauts transitoires comme les court circuits la présence des harmoniques. Nous avons montré que la présence des défauts comme : le court circuit, les harmoniques en plus un défaut de pincement d'un clou dans un câble souterrain modifié les caractéristiques électromagnétiques (l'amplitude ou la distribution) dans et autour des câbles souterrains. Ces défauts résultent des conséquences néfastes sur l'état de santé du câble et des problèmes de décharge interne, un échauffement excessif, cela causera une dégradation des matériaux et un vieillissement prématuré.

Mot clé : méthode des éléments finis, COMSOL, Câble, défaut , ligne souterraine.