

الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية

République Algérienne Démocratique et Populaire

Ministère de L'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique



UNIVERSITÉ DE SÉTIF 1 FERHAT ABBAS

FACULTÉ DE TECHNOLOGIE

THÈSE

Présentée au Département d'Electrotechnique

Pour l'obtention du diplôme de

DOCTORAT

Domaine : Sciences et Technologie

Filière: Electrotechnique

Option: Réseaux Electriques

Par

M. Faouzi HASSAINE

THÈME

**Contribution à l'amélioration des performances des câbles
HT de transmission électrique par élaboration des
nouveaux composites diélectriques**

Soutenue le 09/07/2025 devant le Jury:

M. GHERBI Ahmed	Professeur	Univ. Ferhat Abbas Sétif 1	Président
M. NOURI Hamou	Professeur	Univ. Ferhat Abbas Sétif 1	Directeur de thèse
M. MADANI Lakhdar	M.C.A.	Univ. Ferhat Abbas Sétif 1	Co-Directeur
M. BAYADI Abdelhafid	Professeur	Univ. Ferhat Abbas Sétif 1	Examineur
M. MOULAI Houcine	Professeur	Univ. S.T. Houari Boumediene	Examineur
M. BELKHIRI Salah	Professeur	Univ. Mohamed Boudiaf M'sila	Examineur

DEDICACES

Je tiens à dédier ce travail :

**À celle pour qui mon cœur, depuis ma naissance, n'a pu éprouver
qu'amour et reconnaissance, à celle qui a donné un sens à mon
existence en m'offrant une éducation digne de confiance, à ma chère
mère,**

**À mon père, pour son amour et son affection et pour bien plus que je
ne saurai dire, Merci père. Que Dieu vous protège.**

À mon cher frère et mes très chères sœurs.

**À tous ceux qui n'ont jamais cessé de me soutenir et de
m'encourager.**

REMERCIEMENTS

Tout le remerciement est au dieu de m'avoir aidé, de me donner toute cette patience et tout ce courage pour terminer ce modeste travail.

Je suis très reconnaissant à Monsieur Hamou NOURI, Professeur à l'Université de Ferhat Abbas Sétif 1, qui m'a encadré tout au long de cette thèse. Son aide et ses conseils ont été précieux pour finaliser ce travail. Je lui exprime mes sincères remerciements pour sa patience, sa disponibilité, qui m'a permis de mener à bien ce travail, ainsi que pour m'avoir souvent fait partager sa vaste expérience.

Mes remerciements vont également au Co-directeur de thèse Monsieur Lakhdar MADANI, Maître de conférences à l'Université Ferhat Abbas Sétif 1, pour ses conseils et encouragements. Je tiens à remercier Monsieur Ahmed GHERBI, Professeur à l'université Ferhat Abbas, Sétif 1, pour l'honneur qu'il m'a fait en acceptant de présider ce jury.

J'exprime ma gratitude à Monsieur Abdelhafid BAYADI, Professeur à l'Université Ferhat Abbas, Sétif1, Monsieur Houcine MOULAI, Professeur à l'Université des Sciences et Technologie Houari Boumediene d'Alger et Monsieur Salah BELKHIRI, Professeur à l'Université Mohamed Boudiaf de M'sila qui ont manifesté l'amabilité d'examiner ce travail.

Je tiens à exprimer ma profonde reconnaissance à Monsieur Zain HOULI, chef de service au laboratoire d'ENICAB de Biskra, pour son aide durant la fabrication de mes plaques.

Je tiens à adresser mes remerciements à Monsieur Zahir SAHLI, Enseignant à l'Université Abderrahmane Mira de Béjaia, pour sa contribution au bon déroulement de mes testes au sein de laboratoire de génie électrique au bloc Haute Tension de Béjaia.

Je remercie également Monsieur Abdelkarim BEY, chef de service au laboratoire KPLAST de Sétif, pour m'avoir permis d'effectuer des essais au sein du laboratoire de l'entreprise.

J'adresse mes sincères remerciements à mes proches pour leurs encouragements et pour leur soutien et leur présence à mes côtés. Sans oublier mes collègues dans le domaine de la recherche et durant les années d'étude, je tiens à les remercier vivement. Enfin, je voudrais associer mes remerciements à toutes les personnes qui ont contribué, de près ou de loin, à l'aboutissement de ce travail.

DEDICACES	i
REMERCIEMENTS	ii
SOMMAIRE	iii
LISTE DES FIGURE.....	vi
LISTE DES TABLEAUX.....	x
LISTES DES ACRONYMES ET SYMBOLES	xi
INTRODUCTION GENERALE.....	1
 CHAPITRE I GENERALITES SUR LES CABLES HAUTES TENSIONS 	
I.1. Introduction.....	3
I.2. Etat d’art sur la technologie des câbles HT	3
I.3. La Composition d’un câble haute tension.....	6
I.3.1. Âme conductrice.....	7
I.3.2. Ecran Semi-conducteur intérieur	9
I.3.3. Isolation	11
I.3.3.1. Papier-polypropylène	11
I.3.3.2. Caoutchouc éthylène diène propylène	11
I.3.3.3. Polychlorure de Vinyle	13
I.3.3.4. Le Polyéthylène	15
I.3.3.5. Polyéthylène réticulé chimiquement.....	16
I.3.4. Ecran semi-conducteur externe.....	17
I.3.5. L’écran métallique	18
I.3.6. Gaine de protection.....	19
I.4. Modèle électrique du câble de haute tension	19
I.5. Les propriétés fondamentales des diélectriques.....	21
I.5.1. Résistivité	21
I.5.2. Conductivité électronique.....	21
I.5.3. Phénomène de la polarisation	23
I.5.4. Permittivité diélectrique.....	24
I.5.5. Les pertes diélectriques.....	25
I.5.6. Rigidité diélectrique.....	25
I.6. Défauts dans les câbles de transmission électrique.....	26
I.7. Conclusion	27

CHAPITRE II

MODELISATION DU COMPORTEMENT D'UN CABLE ELECTRIQUE TRIPHASE

II.1. Introduction	28
II.2. Propriétés du graphite naturel.....	29
II.2.1. Propriétés physico-chimiques du graphite naturel.....	29
II.2.2. Propriétés thermiques du graphite naturel	30
II.2.3. Propriétés électriques du graphite naturel	30
II.2.4. Propriétés mécaniques du graphite naturel.....	31
II.3. Propriétés du l'oxyde de zinc	31
II.3.1. Propriétés physico-chimiques d'oxyde de zinc	31
II.3.2. Propriétés électriques d'oxyde de zinc	32
II.3.3. Propriétés mécaniques d'oxyde de zinc.....	32
II.4. Les lois de mélanges.....	32
II.4.1. Les mélanges diélectriques binaires	33
II.4.1.1. Concept de champ moyen : Théorie de Bruggeman symétrique.....	33
II.4.1.2. Loi de Lichtenecker et Rother.....	34
II.4.1.3. Loi de Looyenga.....	36
II.4.2. Les mélanges diélectriques ternaires.....	38
II.4.2.1. Loi de Wiener.....	39
II.4.2.2. Modèle de Lichtenecker-Rother.....	40
II.4.2.3. Modèle de Looyenga.....	41
II.5. Modélisation du câble électrique triphasé haute tension	43
II.6. Résultats et discussion	46
II.6.1. Distribution du potentiel électrique	48
II.6.2. Distribution du champ électrique	48
II.6.2.1. L'effet des matériaux additifs dans la couche semi-conducteur interne	49
II.6.2.2. L'effet des matériaux additifs dans la couche isolante.....	52
II.6.2.3. L'effet des matériaux additifs dans la couche semi-conducteur externe.....	54
II.6.2.4. L'effet des matériaux additifs dans l'écran commun et la gaine extérieure.....	57
II.7. Conclusion	61

CHAPITRE III

MODELISATION DU CABLE HVDC EN PRESENCE DE DECHARGES PARTIELLES

III.1. Introduction	62
III.2. L'importance de transport d'énergie électriques par HVDC	62
III.3. Effet des décharges partielles sur les câbles de transport d'énergie électrique.....	63
III.4. Description du problème	64
III.4.1. Modèle mathématique du câble HVDC	64
III.4.2. Modélisation du diélectrique en présence d'une cavité.....	65
III.4.3. Conditions aux limites.....	67
III.4.4. Méthode de résolution de l'équation de Poisson.....	67
III.5. Résultats et interprétation.....	69
III.5.1. Domaine de discrétisation	70
III.5.2. Potentiel électrique.....	71
III.5.3. Champ électrique	72
III.5.4. Densité de la charge d'espaces.....	74
III.5.5. Densité de courant électrique	75
III.6. Conclusion.....	76

CHAPITRE IV

ETUDE EXPERIMENTALES DES NOUVEAUX MATERIAUX COMPOSITES

IV.1. Introduction	78
IV.2. Préparation des échantillons.....	78
IV.3. Tests de rigidité diélectrique	80
IV.4. Les techniques de caractérisation chimique.....	83
IV.4.1. Diffractomètre des rayons X.....	83
IV.4.2. Analyse par spectroscopie Infra Rouge	87
IV.4.3. Caractérisation par microscopie électronique à balayage	90
IV.5. Analyse expérimentale de la caractérisation mécanique.....	91
IV.6. Conclusion	95

CONCLUSION GENERALE	96
---------------------------	----

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES	99
-----------------------------------	----

Figure 1.1: Schématique typique d'un câble haute tension souterrain.....	6
Figure 1.2: Câble réel utilisé dans les nouvelles centrales Algériennes	7
Figure 1.3: Influence de la température ambiante sur le courant nominal.....	9
Figure 1.4: Différentes structures de l'âme conductrice	9
Figure 1.5: Modification du champ électrique dans un câble HT (a) sans écran, (b) avec une couche semi conductrice	10
Figure 1.6: Représentation chimique de l'EPDM	12
Figure 1.7: Molécule de polychlorure de vinyle	13
Figure 1.8: Polymérisation du PVC	14
Figure 1.9: Polymérisation (a) Création de radicaux, (b) Déplacement du centre actif.....	15
Figure 1.10: Fraction de polyéthylène	15
Figure 1.11: Schéma électrique équivalent simplifier du câble HT.....	20
Figure 1.12: Evolution du facteur de perte en fonction de la fréquence	21
Figure 1.13: Représentation graphique des différents types de comportement de variation de conductivité avec la température.....	22
Figure 1.14: Variation de la permittivité diélectrique en fonction de la fréquence	23
Figure 1.15: Présentation de différents types de polarisation	23
Figure 1.16: Câbles localement endommagés.....	26
Figure 2.1: Schéma de la structure en graphite	29
Figure 2.2: Permittivité effective d'un mélange diélectrique composite binaire (polyéthylène réticulé chimiquement - graphite naturel)	33
Figure 2.3: Permittivité effective d'un mélange diélectrique composite binaire (polyéthylène réticulé chimiquement - oxyde de zinc)	34
Figure 2.4: Permittivité effective d'un mélange diélectrique composite binaire (polyéthylène réticulé chimiquement - graphite naturel)	35
Figure 2.5: Permittivité effective d'un mélange diélectrique composite binaire (polyéthylène réticulé chimiquement - oxyde de zinc)	35
Figure 2.6: Permittivité effective d'un mélange diélectrique composite binaire (polyéthylène réticulé chimiquement - graphite naturel)	36
Figure 2.7: Permittivité effective d'un mélange diélectrique composite binaire (polyéthylène réticulé chimiquement - oxyde de zinc)	37
Figure 2.8: Permittivité effective d'un mélange diélectrique composite binaire (polyéthylène réticulé chimiquement - graphite naturel)	37

Figure 2.9: Permittivité effective d'un mélange diélectrique composite binaire (polyéthylène réticulé chimiquement - oxyde de zinc)	38
Figure 2.10: Schématisation des cas extrêmes du modèle de Wiener pour un composite ternaire	39
Figure 2.11: Permittivité effective d'un mélange diélectrique composite ternaire (polyéthylène réticulé chimiquement – graphite naturel – oxyde de zinc)	40
Figure 2.12: Permittivité effective d'un mélange diélectrique composite ternaire (polyéthylène réticulé chimiquement – graphite naturel – oxyde de zinc)	41
Figure 2.13: Permittivité effective d'un mélange diélectrique composite ternaire (polyéthylène réticulé chimiquement – graphite naturel – oxyde de zinc)	41
Figure 2.14: Permittivité effective d'un mélange diélectrique composite ternaire (polyéthylène réticulé chimiquement – graphite naturel – oxyde de zinc)	42
Figure 2.15: Câble électrique triphasé haute tension à isolation PRC et armure en fil d'acier ...	43
Figure 2.16: Géométrie du modèle 2D de la section transversale de câble HT	44
Figure 2.17: Modèle géométrique de maillage d'un câble souterrain triphasé à haute tension à isolation PRC et armure en fil d'acier	47
Figure 2.18: Distribution du potentiel électrique dans un modèle de câble souterrain triphasé à haute tension à isolation PRC.....	48
Figure 2.19: Distribution du champ électrique dans un modèle de câble souterrain triphasé à haute tension à isolation PRC	48
Figure 2.20: Effet de germanium dans la couche semi-conducteur interne sur le comportement de champ électrique dans le câble.....	49
Figure 2.21: Effet de graphite dans la couche semi-conducteur interne sur le comportement de champ électrique dans le câble	50
Figure 2.22: Effet de germanium et de graphite dans la couche semi-conductrice interne sur le champ électrique dans le câble	50
Figure 2.23: L'intensité de champ électrique maximale dans la couche semi-conductrice interne en fonction de concentration de matériaux additifs	51
Figure 2.24: L'intensité de champ électrique maximale dans la couche isolante en fonction de de concentration de matériaux additifs	51
Figure 2.25: Effet de graphite dans la couche isolante sur le comportement du champ électrique dans le câble	52
Figure 2.26: Effet d'oxyde de zinc dans la couche isolante sur le comportement du champ électrique dans le câble	53
Figure 2.27: Effet de graphite et d'oxyde de zinc dans la couche isolante sur le comportement de champ électrique dans le câble.....	53

Figure 2.28: L'intensité de champ électrique maximale dans la couche isolante en fonction de concentration des matériaux additifs	54
Figure 2.29: Effet de germanium dans la couche semi-conductrice externe sur le comportement du champ électrique dans le câble	55
Figure 2.30: Effet de graphite dans la couche semi-conductrice externe sur le comportement du champ électrique dans le câble	55
Figure 2.31: Effet de germanium et de graphite dans la couche semi-conductrice externe sur le comportement du champ électrique dans le câble	56
Figure 2.32: L'intensité du champ électrique maximale dans la couche semi-conductrice externe en fonction de concentration de matériaux additifs	56
Figure 2.33: L'intensité du champ électrique maximale dans la couche isolante en fonction de de concentration de matériaux additifs	57
Figure 2.34: Effet de graphite dans la couche écran commun sur le comportement du champ électrique dans le câble	58
Figure 2.35: Effet d'oxyde de zinc dans la couche écran commun sur le comportement du champ électrique dans le câble	58
Figure 2.36: Effet de graphite et d'oxyde de zinc dans la couche écran commun sur le comportement du champ électrique dans le câble	59
Figure 2.37: Effet de graphite dans la couche gaine extérieure sur le comportement du champ électrique dans le câble	59
Figure 2.38: Effet d'oxyde de zinc dans la couche gaine extérieure sur le comportement de champ électrique dans le câble	60
Figure 2.39: Effet de graphite et d'oxyde de zinc dans la couche gaine extérieure sur le comportement du champ électrique dans le câble	60
Figure 3.1: Conception d'un câble isolé en polymère	64
Figure 3.2: Modèle de simulation de la décharge partielle en présence de la cavité	66
Figure 3.3: Organigramme pour résoudre le problème de la charge d'espace dans le câble HVDC	68
Figure 3.4: Lignes de champ pour $\frac{1}{4}$ du domaine de calcul	70
Figure 3.5: Contours équipotentiels pour $\frac{1}{4}$ du domaine de calcul	70
Figure 3.6: Maillage rectangulaire du modèle géométrique du câble	71
Figure 3.7: Variation du potentiel électrique en fonction de la distance radiale	71
Figure 3.8: Répartition du potentiel électrique dans le câble	72
Figure 3.9: Répartition du champ électrique entre les deux électrodes	72
Figure 3.10: Variation du champ électrique: (a) en absence de cavité, (b) en présence de cavité	73

Figure 3.11: Variation de la densité de la charge d'espace entre les deux électrodes sans diélectrique	74
Figure 3.12: Variation de la densité de la charge d'espace dans le câble :(a) en absence de la cavité, (b) en présence de la cavité.....	75
Figure 3.13: Variation de la densité de courant électrique dans l'espace inter-électrode : (a) en absence de la cavité, (b) en présence de la cavité	76
Figure 4.1: Photographie numérique de l'extrudeuse mono-vis Brabender PLE 330	79
Figure 4.2: Photographie numérique de la presse Polystat 300S	79
Figure 4.3: Schéma du dispositif des essais de claquage sous tension alternative	80
Figure 4.4: Récipient contenant l'ensemble des électrodes	81
Figure 4.5: Image du diffractomètre de type Malvern Panalytical	83
Figure 4.6: Spectres de diffraction de rayons X du PRC pur et PRC dopé du l'oxyde de zinc :a) 1 ^{ière} représentation, b) 2 ^{ième} représentation	84
Figure 4.7: Spectres de diffraction de rayons X du PRC pur et PRC dopé du graphite naturel a) 1 ^{ière} représentation, b) 2 ^{ième} représentation	85
Figure 4.8: Spectres de diffraction de rayons X du PRC pur et PRC dopé du l'ensemble l'oxyde de zinc et le graphite naturel : a) 1 ^{ière} représentation, b) 2 ^{ième} représentation.....	86
Figure 4.9: Image Spectromètre Infrarouge FTIR SHIMADZU QUATR-S.....	87
Figure 4.10: Spectres FTIR de PRC pur et PRC dopé du l'oxyde de zinc	88
Figure 4.11: Spectres FTIR de PRC pur et PRC dopé du graphite naturel	88
Figure 4.12: Spectres FTIR de PRC pur et PRC dopé du l'ensemble l'oxyde de zinc et le graphite naturel.....	89
Figure 4.13: Microscope électronique à balayage de type : a) FEI Quanta 250, b) Thermos Scientific TM Quatro	90
Figure 4.14: Image MEB de (a) PRC pur, (b) PRC chargé à 7,5% oxyde de zinc, (c) PRC chargé à 7,5% graphite naturel, (d) PRC chargé à 2,5 % oxyde de zinc et 2,5 % graphite naturel	91
Figure 4.15: Géométrie et dimensions des éprouvettes de traction	92
Figure 4.16: Machine de traction Zwick/Roell Z050.....	92
Figure 4.17: Courbe de traction du PRC pur.....	93
Figure 4.18: Résistance à la traction en fonction de la concentration de la charge additive	93
Figure 4.19: Allongement à la rupture en fonction de la concentration de la charge additive. ...	94

Tableau 1.1: Matériaux conducteurs utilisés pour les câbles de transmission de puissance	7
Tableau 1.2: Résistivité spécifique et son coefficient de température.....	8
Tableau 1.3: Les propriétés des stratifiés de polypropylène et du papier cellulose.....	11
Tableau 1.4: Les propriétés électromécaniques de l'EPDM.....	12
Tableau 1.5: Les propriétés électromécaniques du PVC	14
Tableau 1.6: Les propriétés de l'PEBD	16
Tableau 1.7: Les propriétés de l'PEHD	16
Tableau 1.8: Les propriétés du PRC	17
Tableau 1.9: Epaisseur de la gaine des câbles en fonction de la tension et de la section	19
Tableau 2.1: La conductivité électrique du graphite pour différente température.....	31
Tableau 2.2: Fraction volumique de mélange ternaire.....	39
Tableau 2.3: Spécification technique du câble souterrain haute tension 33 kV	44
Tableau 2.4: Les caractéristiques électriques des matériaux utilisés pour le câble PRC 33 kV ..	45
Tableau 2.5: Les permittivités diélectriques des diffèrent couches du câble en fonction de la concentration des matériaux additifs individuelles	46
Tableau 2.6: Les permittivités diélectriques des diffèrent couches du câble en fonction de la concentration des matériaux aditifs multiples	47
Tableau 3.1: Les caractéristiques du câble utilisé en simulation	69
Tableau 4.1: Le champ électrique moyenne de claquage mesuré en fonction de la concentration des différentes charges	82

AC : Alternatif Current.

BT : Base Tension.

CCNS : Laboratoire croissance et caractérisation de nouveaux semi-conducteurs.

CD : Cross direction.

DC : Direct Current.

DRX : Diffraction par Rayons X.

EMA : Effective Medium Approximation.

FEM : Finite Element Method.

FTIR : Spectroscopie Infrarouge à Transformée de Fourier.

GaAS : Gallium Arsenide.

HDPE : High Density polyethylene.

HT : Haute Tension.

HVAC : High voltage Alternatif Current.

HVDC : High voltage Direct Current.

JCPDS : Jointe Commette Powder Diffraction System.

LDPE : Low Density polyethylene.

MD : Machine direction (Direction du sens d'extrusion).

MEB : Microscope Électronique à Balayage.

PE : Polyéthylène.

PEBD : Polyéthylène Base Densité.

PEHD : Polyéthylène Haute Densité.

PPL : Papier Polypropylène.

PRC : Polyéthylène Réticulé Chimiquement.

PVC : Polychlorure de Vinyle.

SC : Semi conductrice.

TEP : Transformation de l'Echelle de Porosité.

ab : Séquence d'empilement ab (Plan basal)

A : Matrice de raideur.

Al : Aluminium.

A % : Allongement à la rupture.

B : Second membre du système.

c : Axe cristallographique perpendiculaire au plan basal.

C : Capacité du câble.

C_a : Capacité équivalente de la partie saine de l'isolant.

- C_b : Capacité du diélectrique sans décharge partielle en série avec la cavité.
 C_g : Capacité de la cavité.
 C : Graphite Naturel.
 CO : Monoxyde de carbone.
 CO_2 : Dioxyde de carbone.
 C_p : Capacité thermique molaire.
 Cu : Cuivre.
 C_0 : Capacité du condensateur vide.
 d : Diamètre de la cavité.
 d' : Espacement inter-planaire générant la diffraction.
 D : Déplacement électrique.
 e : Epaisseur de la cavité.
 E : Champ électrique.
 E_a : Énergie d'activation.
 E_a' : Énergie d'activation pour le premier mécanisme de conduction.
 E_a'' : Énergie d'activation pour le premier mécanisme de conduction.
 E_c : Rigidité électrique.
 E_g : Énergie de la bande interdite.
 E_L : Énergie de liaison d'excitons.
 E_{peek} : Valeur maximale du champ électrique.
 E_{rr} : Erreur relative entre deux itérations successives estimée de champ électrique.
 f_c : Fréquence de relaxation pour laquelle la dissipation de l'énergie est maximale.
 Ge : Germanium.
 I_c : Courant capacitif.
 I_R : Courant résistive.
 J : Densité de courant.
 k : Nombre d'itérations.
 K : Constante de Boltzmann.
 l : Longueur.
 m : Facteur de correction géométrique qui dépend de la forme de la cavité et du champ local.
 m_e : Moment électrique par rapport à l'origine.
 m_0 : Masse effective de l'électron lié.
 n : Degré de polymérisation.
 n_i : Nombre entier.

N : Concentration volumique des atomes.

p : Pression effective du gaz dans la cavité.

p : Moment électrique.

p_a : Pression atmosphérique de référence.

P : Moment dipolaire par unité de volume.

P_1 : Porosité de l'inclusion 1.

P_2 : Porosité de l'inclusion 2.

q : Fraction volumique du matériau.

$q_{i,n}$: Fraction volumique des inclusions de du $i^{\text{ème}}$ constituant.

q_p : Charge ponctuelle.

q_0 : Charge élémentaire.

Q : Charge totale du Câble en absence de charges dans les diélectriques et les semi-conducteurs.

R_i : Résistance radiale de l'isolant.

R_s : Résistance longitudinale du semi-conducteur externe.

RT : Résistance à la traction.

R_1 : Rayon de l'âme conductrice.

R_{20} : Résistivité électrique spécifique.

Si : Silicium.

SO_2 : Dioxyde de soufre.

$tg\delta$: Facteur de pertes diélectriques.

T : Température.

T_f : Température de fusion.

U : Potentiel électrique.

U_{av} : Valeur moyenne de la distribution de potentiel.

V_g : Tension aux bornes de la cavité.

Z : Nombre de charges élémentaires par oscillateur.

Z^* : L'impédance complexe.

Z' : Partie réelle de l'impédance complexe.

Z'' : Partie imaginaire de l'impédance complexe.

Zn : Zinc.

ZnO : Oxyde de Zinc.

α : Facteur de polarisation.

δ : Angle de perte.

δ_r : Densité relative de l'air.

ε_{eff} : Permittivité effective du mélange.

$\varepsilon_{i,n}$: La constante diélectrique du $i^{\text{ème}}$ constituant.

ε_r : Permittivité relative du matériau.

$\varepsilon_r(\omega)$: Permittivité relative complexe en champ alternatif.

$\varepsilon_r'(\omega)$: Partie réelle de la permittivité (permittivité de stockage).

$\varepsilon_r''(\omega)$: Partie imaginaire de la permittivité (permittivité de perte).

ε_1 : Permittivité effective de la matrice.

ε_2 : Permittivité effective de l'inclusion.

μ : Mobilité des ions positifs ou négatifs.

ω : Pulsation du champ électrique.

ω_0 : Fréquence propre de résonance de l'oscillateur.

ρ : Densité de charge libre.

ρ_t : Résistivité transversale.

ρ_v : Résistance volumique.

σ : Conductivité du matériau à la température T.

σ_0 : Conductivité pré-exponentielle.

σ_1 : Conductivité pré-exponentielle associée au premier mécanisme de conduction.

σ_2 : Conductivité pré-exponentielle associée au deuxième mécanisme de conduction.

θ : Angle de diffraction.

$\emptyset$: Coefficient d'amortissement.

λ : Longueur d'onde des rayons X.

τ : Temps de relaxation.

INTRODUCTION

GENERALE

Les lignes à haute tension constituent l'une des principales infrastructures énergétiques et représentent le composant essentiel des grands réseaux de transport d'électricité. Ces lignes peuvent être aériennes, souterraines ou sous-marines. Pour transporter de grandes quantités d'électricité, il est préférable d'augmenter la tension du courant afin de réduire les pertes électriques et le coût global du transport. Par ailleurs, pour diminuer la résistance, deux facteurs sont à prendre en compte : la résistivité des matériaux utilisés pour la fabrication des câbles de transport, ainsi que la section de ces câbles.

L'utilisation de câbles électriques souterrains dans les réseaux de distribution et de transmission connaît une croissance significative ces dernières années. Par rapport aux lignes de transmission aériennes, les câbles électriques sont plus souvent utilisés dans les réseaux de distribution urbains en raison de leur facilité de construction et de l'absence d'interférence avec l'aspect de la ville pendant l'installation [1], de leur impact visuel, d'une forte opposition sociale, de la difficulté de procéder à l'expropriation des terrains concernés dans les limites de temps et de coûts imposées par le projet [2], ainsi que du fait qu'ils sont très exposés à divers facteurs externes et climatiques, notamment les orages qui causent généralement des dégâts importants chaque année [3].

Les câbles souterrains peuvent être composés d'un ou de plusieurs conducteurs placés dans une gaine de protection. La gaine de protection est une enveloppe imperméable qui recouvre l'isolation. Les matériaux polymères sont souvent utilisés aujourd'hui comme principal matériau d'isolation dans les câbles haute tension souterrains [4, 5]. Cette tendance s'explique par la grande fiabilité, aux faibles pertes diélectriques et au faible impact sur l'environnement qui peuvent être obtenus avec le PRC [6]. Au cours de fonctionnement, le câble peut avoir des fragilités dans l'isolation : impuretés ou vides dans l'isolation ou protubérances à l'interface avec les écrans semi-conducteurs. Ces défauts peuvent déclencher le vieillissement, comme le phénomène des décharges partielles, ou accélérer la dégradation de l'isolation du câble [7], en termes de la dégradation de la rigidité diélectrique de l'isolation, et augmenter la probabilité d'une rupture inattendue et d'une fin du cycle de vie des câbles électriques [8].

Ces dernières années, les matériaux composites ont fait l'objet d'une grande amélioration des caractéristiques Physique – chimique – électrique, en particulier avec l'introduction des matériaux additifs [9].

Aujourd'hui, un grand nombre de secteurs industriels utilisent des matériaux composites. L'étude de leur comportement devient de plus en plus cruciale. Par rapport aux matériaux traditionnels, ils présentent plus d'avantages, tels qu'une rigidité spécifique élevée, une grande résistance à la fatigue et à la corrosion [10]. La combinaison contrôlée des composants donne

naissance à de nouveaux matériaux dont les propriétés diffèrent de celles des composants individuels [11, 12].

L'objectif de notre étude est de contribuer de façon significative à l'amélioration des performances des câbles haute tension de transmission électrique, en recherchant des matériaux isolants destinés à la conception d'une nouvelle génération de câbles de transport électrique, caractérisés par de faibles pertes diélectriques et une longue durée de vie.

Ce manuscrit s'articule en quatre chapitres. Le premier chapitre est consacré à une étude sur l'évaluation des câbles haute tension souterrains de transport d'énergie électrique, ainsi qu'à la présentation de leur structure. Il aborde également le modèle électrique du câble haute tension, les propriétés fondamentales des matériaux diélectriques, ainsi que les défauts pouvant survenir dans les câbles de transmission électrique.

Le deuxième chapitre porte sur la simulation numérique par le logiciel COMSOL Multiphysics, en utilisant l'approche des éléments finis pour étudier les différentes propriétés du graphite naturel et de l'oxyde de zinc, que nous utilisons comme des matériaux additifs dans la partie isolante du câble. Une partie de ce chapitre, est également dédiée à l'étude des lois de mélanges binaires et ternaires, couramment utilisées pour modéliser le comportement de la permittivité en fonction de la concentration de porosité dans les matériaux composites.

Le troisième chapitre traite de la modélisation du câble HVDC en présence des décharges partielles, après avoir rappelé l'importance du transport d'énergie électrique par HVDC et l'effet de la densité de la charge d'espace sur les propriétés des câbles de transport d'énergie électrique.

Le quatrième chapitre présente l'étude expérimentale des propriétés physico-chimique et électriques des nouveaux matériaux composites élaborés. Il consiste à étudier le phénomène de claquage électrique, les propriétés chimiques à l'aide des systèmes DRX, FTIR et MEB, ainsi que les propriétés mécaniques, telles que la traction et l'allongement.

La thèse se termine par une conclusion générale qui présente une synthèse du travail effectué, résumant les principaux résultats obtenus ainsi que les perspectives envisagées.

CHAPITRE I

GENERALITES SUR LES CABLES HAUTES TENSIONS

I.1 Introduction

La structure et les matériaux utilisés dans la conception des câbles HT évoluent afin de garantir des meilleures caractéristiques techniques, énergétiques, environnementales, sociétales et économiques.

La recherche d'un matériau conducteur avec la plus faible résistivité électrique est essentielle mais elle reste souvent limitée par les coûts de la matière première et des considérations mécaniques. Divers types d'isolants électriques font l'objet de recherche et de développement. Donc, ces matériaux doivent avoir une réponse parfaite au stress électrique afin d'éviter tout court-circuit au niveau du câble.

Ce chapitre, est une présentation générale des câbles utilisés dans le transport de l'énergie en haute tension. En pratique, il y a plusieurs modèles : les câbles pourvus d'une isolation au papier imprégné et ceux utilisant des isolants synthétiques.

Nous étudions en détail, les propriétés chimiques, physiques, électriques, et mécaniques des isolations utilisées dans le câble HT. Ce chapitre aborde aussi, le modèle électrique du câble haute tension, les propriétés fondamentales des matériaux diélectriques, ainsi que les défauts qui peuvent survenir dans les câbles de transmission électrique.

I.2 Etat d'art sur la technologie des câbles HT

La technologie du transport en haute tension est apparue pour la première fois en 1820 et était à l'origine exclusivement réservée aux transmissions télégraphiques. Les premiers conducteurs utilisés étaient des fils isolés avec de la soie naturelle. À partir de 1840, ces fils ont été remplacés par un nouveau matériau isolant à base de gomme extraite de certains arbres tropicaux.

Les premières liaisons souterraines de transmission d'énergie électrique étaient des systèmes rudimentaires et peu performants, ne permettant pas de dépasser quelques dizaines de volts. En 1879, l'invention de la presse à plomb par l'ingénieur suisse Borel a permis de mouler une gaine de plomb directement sur les conducteurs isolés avec des fibres de jute, ce qui a partiellement résolu les problèmes liés à l'absorption d'humidité en rendant le câble étanche. Peu après, en imprégnant l'isolant en jute d'un mélange d'huile et de résine, il est devenu possible de fabriquer des câbles monopolaires concentriques capables de supporter des tensions allant jusqu'à 3 kV [13]. En 1890, Ferranti a mis en place pour la première fois un câble à isolation en papier imprégné d'huile, conçu pour une tension de 10 kV, reliant la centrale électrique de Deptford à Londres. L'isolant était constitué de bandes de papier saturées d'une huile très visqueuse à base de colophane (résine de pin), enroulées de manière hélicoïdale autour de l'âme métallique. Cependant, ce procédé de fabrication entraînait la formation de vacuoles gazeuses dans le matériau

isolant. Ces vacuoles étaient responsables de l'apparition de décharges partielles, provoquant une détérioration progressive et un dysfonctionnement du câble. La tension maximale autorisée pour ce type de câble était limitée à moins de 60 kV en courant alternatif (AC).

Par la suite, afin de résoudre le problème des vacuoles et d'augmenter les tensions supportées, les fabricants ont opté pour une huile à faible viscosité appliquée sous forte pression. L'originalité de cette structure, conçue en 1917 par Emmanuelli (Société Pirelli), repose sur une isolation en papier placée autour d'une enveloppe conductrice creuse à brins multiples. L'intérieur de l'âme était rempli d'une huile maintenue sous pression comprise entre 2 et 4 bars, ce qui permettait de refroidir le câble et de préserver une bonne isolation électrique. Ces câbles sous pression d'huile sont très utilisés dans le transport énergétique à haute tension jusqu'à 150 kV.

En 1927, un nouveau type de câble a été posé sur le réseau 63 kV de la région parisienne. Il s'agit d'un câble triphasé à champ radial de type tri-plomb. Dans ce câble, les trois conducteurs sont chacun entourés d'une couche d'isolant en papier imprégné, d'un écran en rubans de papier métallisés, puis d'une gaine en plomb. Ces trois éléments sont ensuite entourés d'un ruban textile métallisé et contenus dans une gaine en plomb [13].

En 1930, les sociétés câblières françaises ont commencé à produire des câbles à huile fluide pour des tensions de 63 kV, dans le but de perfectionner cette technologie. Les objectifs principaux attendus étaient l'allègement du câble, la réduction de son coût et la diminution des pertes sur les câbles 63kV. Les sections des conducteurs ont été augmentées à 780 mm pour une capacité de 100 MVA, puis à 1000 mm pour 140 MVA.

En 1933, les ingénieurs anglais Eric Fawcette et Reginald Gibson ont obtenu du polyéthylène basse densité (LDPE) par polymérisation radicalaire. Le premier câble construit avec un polymère synthétique a été mis au point en 1938. Bien que prometteur, la température de fusion du LDPE, mesurée à 80 °C, limitait la capacité des câbles à 63 kV. Une décennie plus tard, la découverte du polyéthylène haute densité (HDPE) et sa température de fusion de 105 °C ont permis d'exploiter les câbles à des tensions plus élevées [14].

En 1936, la Société Inter-Paris, chargée de la réalisation d'un réseau à haute tension autour de Paris, a mis en service la première liaison 225 kV par câble souterrain à huile fluide.

Après 1950, une nouvelle génération de câbles tripolaires à pression externe de gaz neutre a été développée. Les trois conducteurs isolés au papier imprégné étaient placés sous une gaine de plomb fretté. Un espace aménagé entre la gaine et l'isolant permettait au gaz azote, sous une pression de 15 bars, de se diffuser. Cette technologie n'a été utilisée qu'entre 1954 et 1964.

En 1955, est apparu le câble à pression externe de gaz, constitué de trois conducteurs tirés dans un tube en acier et rempli d'azote sous pression (15 bars). Les conducteurs étaient isolés au papier

imprégné sans gaine de plomb. Ils pouvaient se déformer sous la pression du gaz. Ils étaient séparés par une membrane en PVC. Le câble à pression externe d'huile consistait à placer les trois conducteurs, isolés au papier imprégné et dépourvus de gaine d'étanchéité, dans un tube en acier rempli d'huile sous pression (15 bars). Autour de chaque phase, une feuille métallique constituait une surface équipotentielle, des rubans de protection assuraient le retour des courants de défaut et des fils de glissement en cuivre ou en bronze facilitaient le tirage des câbles dans le tube. Les tubes étaient raccordés par soudure et protégés par un revêtement en goudron mélangé à des matières fibreuses. Des pompes reliées à des réservoirs disposés à une extrémité de la liaison assuraient la mise sous pression de l'ensemble [13].

Dans les années 60, une nouvelle solution a été trouvée grâce à la réticulation du polyéthylène (PE), ce qui a amélioré à la fois les propriétés thermomécaniques (température de fusion comprise entre 90 et 140 °C) [14]. La résistance thermique et la stabilité à long terme de la matière ont également été améliorées. Les additifs de réticulation, tels que le peroxyde de dicumyle, ne doivent pas dégrader les performances électriques du matériau réticulé [11]. Dans un premier temps, les câbles à base de polyéthylène réticulé chimiquement (PRC) ont été fabriqués sur des lignes de vulcanisation en continu, en utilisant de la vapeur pour chauffer et mettre sous pression les étapes de production, et de l'eau sous pression pour le refroidissement. Plus tard, il a été constaté que la présence de vapeur d'eau pendant le processus de réticulation introduisait un niveau élevé d'humidité dans l'isolation du câble, ce qui entraînait la formation de micro-vides ou d'arbres d'eau, provoquant une défaillance prématurée de l'isolant. Par conséquent, la vapeur a été retirée du processus de production. Un nouveau procédé de fabrication a été développé, impliquant un chauffage électrique et une mise sous pression avec de l'azote sec dans une chaîne de vulcanisation continue. À ce moment, l'eau était encore utilisée pour le refroidissement, mais elle a ensuite été éliminée de tous les stades du processus et généralement abandonnée comme procédé de refroidissement.

Depuis les années 1990, un câble en polyéthylène basse densité a été exploité avec succès au Canada. Il supporte une tension de 500 kV en courant continu [14].

Les câbles à courant continu haute tension (HVDC) ont connu des avancées significatives. En 2002, des chercheurs au Japon ont développé un système de câble HVDC de 500 kV, capable de transmettre 3000 MW dans une configuration bipolaire unique [15]. En 2010, le projet Trans Bay Cable a mis en œuvre avec succès une transmission HVDC de 200 kV, démontrant ainsi la faisabilité pratique de cette technologie [16]. Par la suite, plusieurs projets ont été menés avec succès en utilisant des câbles HVDC de 320 kV et 1000 MW. En 2014, ABB a présenté le premier système de câble HVDC de 525 kV, capable de transmettre jusqu'à 2600 MW, marquant une

avancée majeure dans le domaine de la transmission électrique à très haute tension [15].

Les câbles à isolation de PRC sont largement utilisés. Ils présentent de nombreux avantages :

- ✓ Légèreté ;
- ✓ Connexion, raccords du réseau plus simples à installer ;
- ✓ Entretien et réparations simples ;
- ✓ Pas de risque d'inflammation ;
- ✓ Faibles coûts de production et de maintenance.

Cependant, la formation de défauts et de non-homogénéités dans l'isolation des câbles est inévitable lors de leur production et installation. Pendant leur fonctionnement, ils sont exposés à des effets électriques, thermiques, chimiques et environnementaux, ce qui entraîne leur vieillissement et dégradation, menant finalement à leur défaillance [17]. Au cours de la dernière décennie, l'utilisation de matériaux composites a été largement étudiée pour l'isolation électrique des câbles, dans le but d'améliorer les propriétés électriques, thermiques, mécaniques, ainsi que la durabilité des isolants.

I.3 Composition d'un câble haute tension

Les câbles isolés destinés aux lignes souterraines sont constitués de plusieurs couches, dont la structure typique d'un câble haute tension (HT) souterrain est schématisée à la figure (1.1).

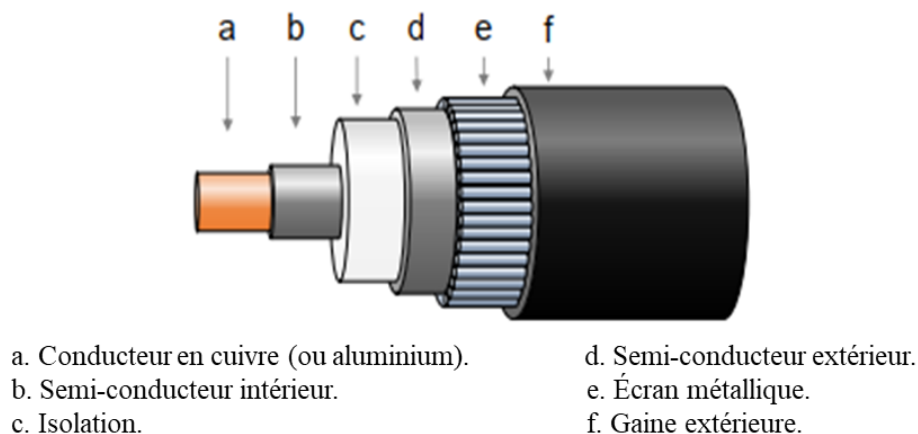


Figure 1.1: Schématisation typique d'un câble haute tension souterrain [18].

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

Les images de la figure (1.2), sont des cas réels utilisés au niveau de la centrale d'Arzew (Algérie) :



Figure 1.2: Câble réel utilisé dans les nouvelles centrales Algériennes.

I.3.1 Âme conductrice

L'âme conductrice est la partie principale du câble. Son objectif est de transmettre le courant nécessaire avec une faible perte d'énergie [19]. Les deux matériaux largement utilisés sont le cuivre et l'aluminium. Les âmes de forte section (à partir de 1600 mm^2 en aluminium et 1200 mm^2 en cuivre) sont segmentées afin de limiter les pertes par courants de Foucault, liées à l'effet de peau. Des études sur le dimensionnement et les propriétés électriques du matériau sont réalisées afin de minimiser les pertes énergétiques. Le tableau (1.1) montre les propriétés électriques des métaux couramment utilisés dans les câbles.

Tableau 1.1: Matériaux conducteurs utilisés pour les câbles de transmission de puissance [20].

Matériau	Avantage	Inconvénient
Aluminium	Peu coûteux.	Conductivité électrique et thermique est d'environ 60 % que celle du cuivre.
Cuivre	Haute conductivité électrique et thermique.	Coûteux.
Argent	Légèrement supérieur à celui du cuivre dans la conductivité thermique et électrique.	Extrêmement coûteux.
Sodium	Extrêmement peu coûteux.	Les questions de sécurité sur la manipulation et l'entretien. Conductivités électrique et thermique sont mauvaises.

En prenant considération du prix, le cuivre et l'aluminium sont les meilleurs choix pour les conducteurs, mais il y a eu une certaine expérience pratique avec le sodium [20].

La résistivité spécifique et le coefficient de température du cuivre et de l'aluminium sont donnés dans le tableau (1.2).

Tableau 1.2: Résistivité spécifique et son coefficient de température [21].

	Cuivre	Aluminium
R_{20} : Résistivité électrique spécifique à 20 °C [Ωm]	$1,786 \cdot 10^{-8}$	$2,874 \cdot 10^{-8}$
α : Coefficient thermique de la résistivité électrique spécifique à 20 °C [K^{-1}]	0,00392	0,0042

Le principal défaut des câbles dans le transport d'énergie haute tension est la perte par effet Joule. Il est possible de diminuer les pertes énergétiques en utilisant un métal avec une très faible résistivité. L'une des résistivités les plus faibles est celle du cuivre, mais l'industrie du câble tend à utiliser l'aluminium, car son coût massique est trois fois moindre, et sa faible densité réduit le poids total du câble.

L'augmentation du diamètre du conducteur permet d'augmenter la puissance transportée pour un même potentiel mais elle induit des problèmes techniques avec une augmentation du poids du câble.

La perte de puissance maximale est fixée par la stabilité thermique du polymère isolant. La température externe du câble dépend de la température ambiante, des échanges par convection et de la résistance thermique de l'isolation.

L'effet de la température sur le courant nominal est illustré à la figure (1.3). La perte totale du câble est fonction de la résistance du conducteur à un degré inférieur à la température maximale admissible [22].

La température maximale du conducteur est déterminée par la température maximale à laquelle le système d'isolation peut résister pendant de longues périodes de temps sans subir de dommages. Cette température maximale à son tour peut être affectée par la capacité de dissipation de la chaleur et la température ambiante du milieu dans lequel le câble sera installé. Pour un fonctionnement sûr, la somme de la température ambiante et l'élévation de température dans le système d'isolation ne doit pas dépasser la température totale admissible du conducteur.

Différents types de conception du conducteur peuvent être adoptés (Figure 1.4). Des conducteurs creux, généralement utilisés, sont remplis de l'huile de faible viscosité afin de permettre la circulation

de l'huile pour refroidir le conducteur. Les conducteurs segmentés réduisent considérablement l'intensité des gros conducteurs pour le courant alternatif en raison de l'effet de peau [21].

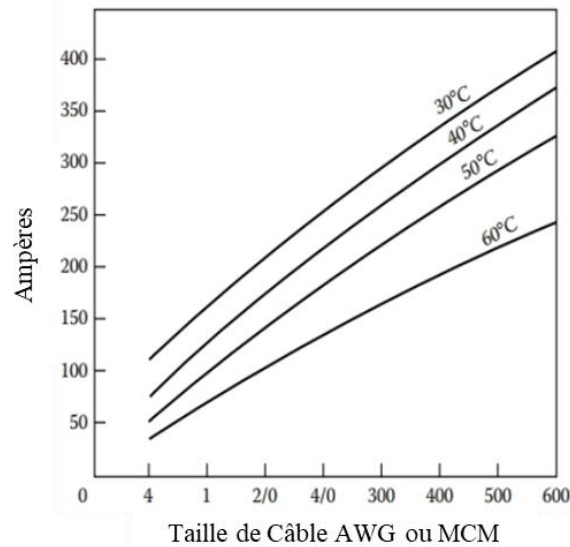


Figure 1.3: Influence de la température ambiante sur le courant nominal [22].

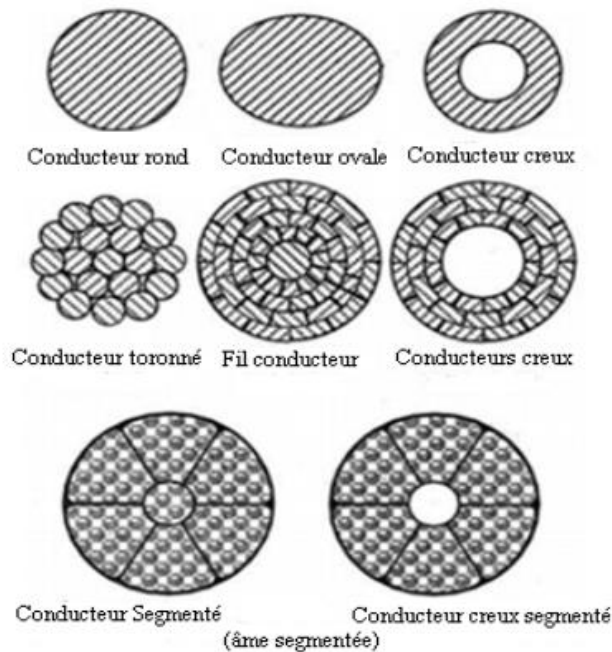


Figure 1.4: Différentes structures de l'âme conductrice [21].

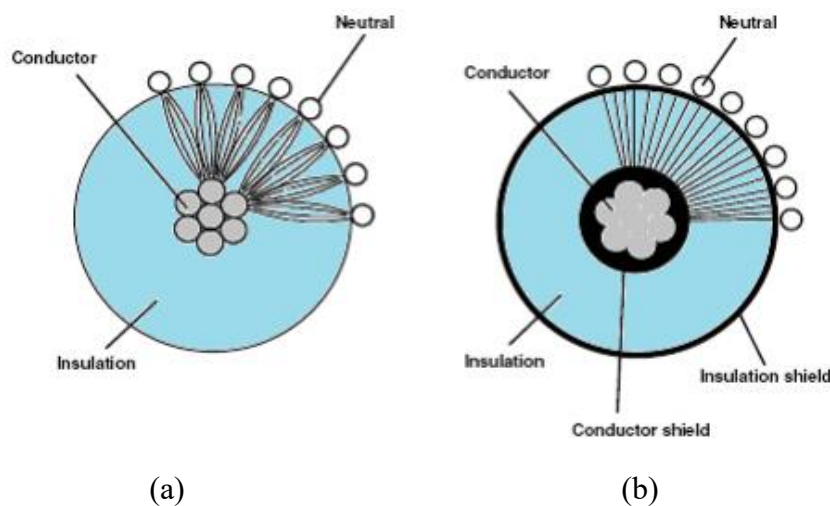
I.3.2 Ecran Semi-conducteur intérieur

Une couche semi conductrice est placée entre le métal de l'âme et le polymère isolant. Son but est de créer une surface en forme de cylindre lisse sur le dessus du conducteur. Son rôle est d'uniformiser le champ électrique pour éviter les effets de pointe (Figure 1.5). L'utilisation du

semi-conducteur est une solution pour éliminer les espèces chargées entre le conducteur et l'isolant.

Le Semi-conducteur interne entre le conducteur et l'isolation agit comme une interface dont les caractéristiques électriques sont plus proches de celles du conducteur que de l'isolation, tandis que ses caractéristiques chimiques sont plus proches de celles de l'isolation que du conducteur. Par conséquent, la surface irrégulière du conducteur est remplacée par une surface conductrice parfaitement rond et lisse qui adhère parfaitement à l'isolation.

Les semi-conducteurs sont généralement constitués du même composé de base que celui utilisé pour l'isolation, remplis de particules de noir de carbone qui garantissent une résistivité comprise entre 100 et 1000 Ωm [23].



**Figure 1.5: Modification du champ électrique dans un câble HT :
(a) sans écran, (b) avec une couche semi conductrice [14].**

Les écrans semi-conducteurs contiennent des particules de noir de carbone obtenues par combustion incomplète et contrôlée d'hydrocarbures ou d'acétylène. Le noir est dispersé dans une matrice polymère (généralement à base de copolymère d'acétate de vinyle ou d'acrylate d'éthyle ou de butyle qui sont des composés polaires).

La concentration du noir de carbone doit être suffisamment élevée (typiquement 20 - 30 %) pour assurer une conductivité adéquate. La dispersion doit être optimisée afin d'obtenir une interface lisse entre le conducteur et l'isolant du câble pour éviter le renforcement du champ électrique. D'une manière générale, plus la composition est pure et les grains fins, plus la performance du semi-conducteur est meilleure [24].

I.3.3 Isolation

Pour assurer le bon fonctionnement et une parfaite sécurité des appareils et des installations électriques, tous les conducteurs sont isolés : gaine pour les câbles, vernis pour les bobinages. Lorsque la qualité de ces isollements se dégrade, des courants de fuite peuvent circuler d'un conducteur à l'autre selon l'importance des défauts d'isolement, le pire défaut étant le court-circuit qui provoque des dégâts plus graves.

Pour l'isolation des câbles haute tension, les matériaux utilisés sont :

I.3.3.1 Papier-polypropylène

Récemment, les câbles à isolation mixte au papier-polypropylène (PPL) ont été introduits. Le système d'isolation est constitué de papier à haute densité imprégné d'un mélange visqueux, dont les couches de papier sont séparées par des films de polypropylène introduits [24].

Le câble PPL a démontré la capacité à fonctionner pour une tension de 600 kV et une température de 85 °C (Tableau 1.3).

Tableau 1.3: Les propriétés des stratifiés de polypropylène et du papier cellulose [25].

Matériaux Propriétés	Lamine A	Lamine B	Papier de cellulose
Épaisseur (μm)	128	120	110
Densité (g/cm ³)	0,95	0,95	0,82
Teneur en polymère (% par wt)	47	56	0
Résistance à la traction (kg/1,5 cm largeur)			
MD	13,9	12,9	14,4
CD	8,2	6,3	6,4
Élongation (%)			
MD	1,7	1,3	1,6
CD	1,9	1,8	3,0
Module d'élasticité (kb/cm ² ×10 ³)			
MD	66	69	98
CD	39	35	34
Coefficient de frottement statique (à état sec)	0,51	0,52	0,45
Perméabilité à l'air	∞	∞	1000

I.3.3.2 Caoutchouc éthylène diène propylène

L'EPDM est l'un des diélectriques extrudés, utilisé récemment dans l'isolation des câbles de moyenne et haute tension. Son excellente résistance aux intempéries et à l'eau sont les caractéristiques clés du succès dans plusieurs applications.

D'une façon générale, un élastomère d'EPDM est un ter-polymère d'éthylène, de propylène et d'un diène non conjugué, contenant habituellement 2 à 10 % de ce dernier. Ils peuvent changer dans le rapport d'éthylène et de propylène introduit, comme dans le type de diène utilisé, dépendant de l'application finale de l'élastomère (Figure 1.6).

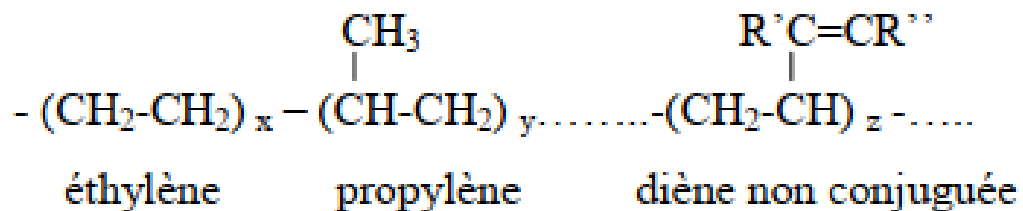


Figure 1.6: Représentation chimique de l'EPDM.

Le rapport quantitatif des monomères confère les propriétés spécifiques à l'élastomère final. Les polymères avec faible contenu en éthylène sont amorphes et faciles à traiter, tandis que ceux à fort contenu en éthylène sont semi cristallins et possèdent des meilleures propriétés physiques, mais ils engendrent des problèmes au niveau de leur mise en œuvre.

La structure est constituée d'une chaîne totalement saturée, conférant une excellente résistance à l'ozone, à la chaleur et aux intempéries, caractéristiques de cette classe d'élastomères [26].

Les propriétés électromécaniques de l'EPDM sont regroupées dans le tableau (1.4) suivant :

Tableau 1.4: Les propriétés électromécaniques de l'EPDM.

EPDM		
Propriétés électriques	Résistivité transversale (ρ_t)	$10^{10} - 10^{13} \Omega\text{m}$
	Constante diélectrique (ϵ_r)	2,5 - 3
	Facteur de pertes diélectriques ($\text{tg} \delta$)	0,016 - 0,03 à 20 °C
	Rigidité diélectrique (E_c)	20 - 35 kV/mm
Propriétés mécaniques	Résistance à la traction (RT)	5 - 15 N/mm ²
	Allongement à la rupture (A %)	300 - 700

Les principales propriétés physico- chimiques de l'EPDM sont :

- ✓ Une excellente résistance à l'ozone et à l'oxygène ;
- ✓ Une excellente résistance aux intempéries ;
- ✓ Une excellente résistance à la chaleur sèche et humide et à la vapeur. Il est utilisable à des

basses températures (jusqu'à - 55 °C) sans affecter la souplesse et la flexibilité de l'isolant.

La plage d'utilisation en température peut varier entre - 60 °C et +150 °C ;

- ✓ Une excellente résistance aux produits chimiques et solvants polaires, comme l'eau, les fluides hydrauliques à base d'esters phosphatiques, les cétones, les alcools et les glycols ;
- ✓ Une faible densité de 0,86 à 0,87 : la densité de l'EPDM est plus faible que celle de n'importe quel autre type d'élastomère. En pratique, cela signifie qu'on fabrique un plus grand nombre de pièces par kilogramme de polymère ;
- ✓ Une faible résistance au feu : l'EPDM, comme tous les élastomères, a le même comportement dans un incendie ; il brûle facilement et propage la flamme, mais ne produit pas de gouttes enflammées, il ne dégage pas de gaz corrosifs ou toxiques, à l'exception de CO et CO₂. Parfois une faible quantité de SO₂ provenant de certains agents de vulcanisation [26].

I.3.3.3 Polychlorure de Vinyle

La première découverte du PVC en 1872 par E. Baumann [27]. Ce matériau souffrance d'une mauvaise stabilité thermique (Figure 1.7), ce qui empêche son utilisation comme isolant dans les câbles HT [28]. Il est encore spécifié et convient pour les câbles dont la tension maximale est inférieure à 7,2 kV [29].

La structure chimique du PVC est [27] : $[-CH_2 - CHCl]_n$.

Avec n le degré de polymérisation, il est de l'ordre de 500 à 3500.

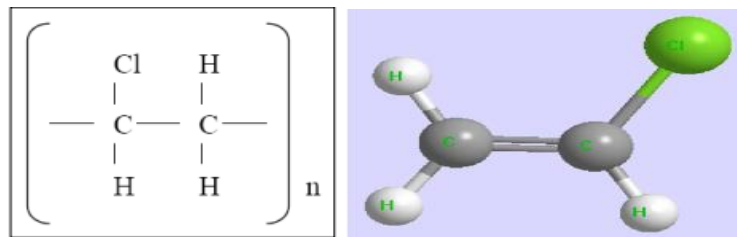


Figure 1.7: Molécule de polychlorure de vinyle (PVC) [30].

Le processus de polymérisation consiste à souder bout à bout, en une longue chaîne, un grand nombre de molécules identiques du produit de base (CH₃Cl). Cet assemblage forme des molécules géantes ou des macromolécules constituant un nouveau produit appelé polymère (figure 1.8). Cette polymérisation se produit sous l'effet d'une température et d'une pression élevée, ainsi que sous l'influence d'un catalyseur éventuel [30, 31].

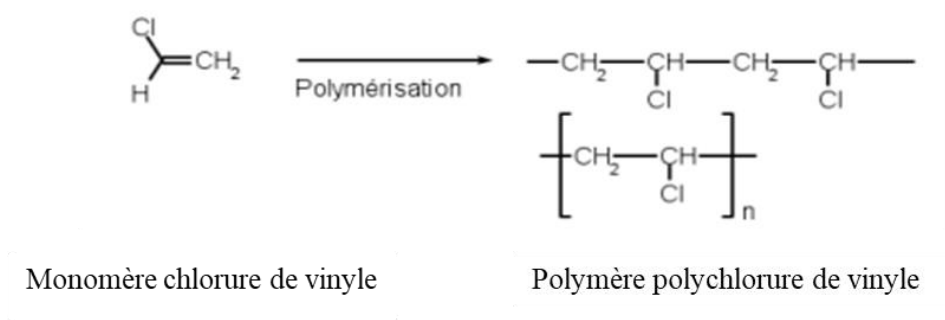


Figure 1.8: Polymérisation du PVC [30].

Les propriétés électromécaniques de **PVC** sont regroupées dans le tableau (1.5) suivant :

Tableau 1.5: Les propriétés électromécaniques du PVC [31, 32].

PVC		
Propriétés électriques	Résistivité transversale (ρ_t)	$10^8 - 10^{14} \Omega\text{m}$
	Constante diélectrique (ϵ_r)	3,4 - 20 °C
	Facteur de pertes diélectriques ($tg\delta$)	0,015 - 20 °C
	Rigidité diélectrique (E_c)	37 kV/mm
Propriétés mécaniques	Résistance à la traction (RT)	30 - 60 Mpa
	Allongement à la rupture (A %)	100 - 500

Les propriétés physico-chimiques du polychlorure de vinyle sont les suivantes :

- ✓ La masse volumique des compositions varie entre 1,0 et 2,0 g/cm³ à la température ambiante (1,4 g/cm³ pour les mélanges non plastifiés et 1,2 à 1,3g/cm³ pour les formules plastifiées) ;
- ✓ Il a un bon vieillissement thermique. Sous l'action prolongée de la chaleur, il devient jaune puis brun, puis rouge et enfin noire, et forme en général une intumescence ;
- ✓ Il a une résistance exceptionnelle à l'ozone. Il Possède une résistance moyenne aux hydrocarbures aliphatiques, acides et aux bases ;
- ✓ Il résiste au fluage à température élevée (absence de point de fusion franc). Mais, il est fragile aux basses températures (demande des précautions pour la pose à temps très froid) ;
- ✓ La température de transition vitreuse est élevée, se situant entre 75 et 80 °C, ce qui le rend impropre à de nombreuses applications sans l'adjonction de plastifiants. Avec l'emploi de plastifiants, la température de transition vitreuse se situe entre -10 et -5 °C ;
- ✓ Il est colorable en couleurs vives [31].

I.3.3.4 Polyéthylène

Il s'agit du polymère synthétique le plus fabriqué pour ses propriétés mécaniques et chimiques. En effet, le polyéthylène est particulièrement résistant aux attaques chimiques. Il possède une faible perméabilité à la vapeur d'eau et une bonne résistance aux fissurations. Comme son coût de production est faible, il est utilisé dans des applications très variées [33].

Le polyéthylène est obtenu par polymérisation de l'éthylène. Le mécanisme de synthèse générique est représenté par : $n\text{H}_2\text{C} \rightarrow [-\text{CH}_2 - \text{CH}_2-]$.

La polymérisation nécessite l'ajout de réactifs chimiques. Ce sont habituellement des peroxydes. Ces initiateurs, sous l'effet de la température, par exemple, se décomposent en deux radicaux. Ces derniers permettent d'ouvrir les doubles liaisons et se placent en tête ou en fin de chaîne. Le centre actif est déplacé en bout de chaîne et la réaction peut ainsi continuer (Figure 1.9).

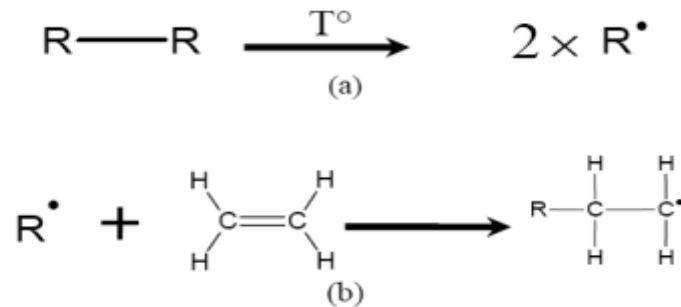


Figure 1.9: Polymérisation : (a) Création de radicaux, (b) Déplacement du centre actif [34].

Après la polymérisation, les molécules d'éthylènes sont attachées selon l'axe de leur double liaison pour former une longue chaîne contenant uniquement des liaisons simples entre les atomes de carbone (Figure 1.10).

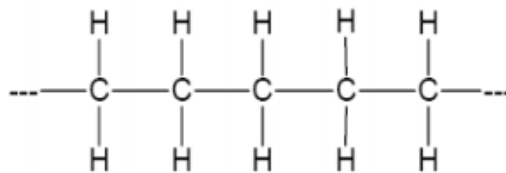


Figure 1.10: Fraction de polyéthylène [34].

Selon les conditions de polymérisation (pression, température, catalyseurs, ...), on distingue le polyéthylène basse densité (PEBD) et le polyéthylène haute densité (PEHD). La présence de ces ramifications dans la chaîne de polyéthylène influe sur les propriétés physiques (densité, flexibilité, viscosité, ...), et favorise l'initiation de l'oxydation.

Les propriétés usuelles du PEBD sont regroupées dans le tableau (1.6).

Tableau 1.6: Les propriétés de l'PEBD [35 – 37].

PEBD		
Propriétés électriques	Résistivité transversale (ρ_t)	-
	Constante diélectrique (ϵ_r)	2 - 3
	Facteur de pertes diélectriques ($tg\delta$)	Faible
	Rigidité diélectrique (E_c)	Forte
Propriétés mécaniques	Résistance à la traction (RT)	9 - 23 MPa
	Allongement à la rupture (A %)	150 - 1000
	Module d'élasticité	200 - 500 MPa
Propriétés physico-chimiques	Densité	0,91 - 0,92 g/cm ³
	Taux de cristallinité (%)	43 - 50
	Température de fusion	105 - 115 °C

Le polyéthylène haute densité a été synthétisé pour la première fois dans les années 1950 par les chimistes K. Ziegler et G. Natta de l'institut Max Planck. La pression utilisée pour la fabrication de ce polyéthylène est beaucoup plus faible que pour un PEBD (50 bars) [35].

Les propriétés usuelles du PEHD sont regroupées dans le tableau (1.7).

Tableau 1.7: Les propriétés de l'PEHD [33 – 38].

PEHD		
Propriétés électriques	Résistivité transversale (ρ_t)	$>10^{14} \Omega m$
	Constante diélectrique (ϵ_r)	2,3 - 2,5
	Facteur de pertes diélectriques ($tg\delta$)	0,0001
	Rigidité diélectrique (E_c)	150 kV/mm
Propriétés mécaniques	Résistance à la traction (RT)	17 - 32 MPa
	Allongement à la rupture (A %)	400 - 900
	Module d'élasticité	-
Propriétés physico-chimiques	Densité	0,94 - 0,965 g/cm ³
	Taux de cristallinité (%)	65 - 80
	Température de fusion	125 - 135 °C

I.3.3.5 Polyéthylène réticulé chimiquement

Le polyéthylène thermoplastique PE est un polymère semi-cristallin qui possède des bonnes propriétés

diélectriques. Cependant, ce thermoplastique a une mauvaise tenue aux hautes températures, limitée à 75 °C. L'élastomère PRC a remplacé le PE. En effet, la réticulation de PE a amélioré les propriétés diélectriques.

Des études indiquant que le PRC est stable à 130 °C pendant 36 h. Cependant, si la température du conducteur atteint 250 °C (par exemple, lors d'un court-circuit), l'isolation à base de PRC se dégrade en quelques secondes.

Généralement, le PRC est obtenu à partir du PEBD. Il existe plusieurs façons de réticuler un polyéthylène : par l'utilisation de peroxyde, par un procédé au silane ou par irradiation [39 - 41]. Les différentes propriétés du polyéthylène réticulé chimiquement sont regroupées dans le tableau (1.8) suivant :

Tableau 1.8: Les propriétés du PRC [37 – 41].

PRC		
Propriétés électriques	Résistivité transversale (ρ_l)	$10^{15} \Omega m$
	Constante diélectrique (ϵ_r)	2,3
	Facteur de pertes diélectriques ($tg\delta$)	0.0001
	Rigidité diélectrique (E_c)	37,78 kV/mm
Propriétés mécaniques	Contrainte à la rupture	19 MPa
	Module d'élasticité	121 MPa
	Allongement à la rupture (%)	500
Propriétés physico-chimiques	Densité	0,92 g/cm ³
	Température maximale de fonctionnement	90 °C
	Température maximale en court-circuit	250 °C
	Température de ramollissement	127 °C
	Température de dégradation	450 - 500 °C

I.3.4 Ecran semi-conducteur externe

La couche au-dessus de l'isolant est appelée écran d'isolation. Sa fonction est d'homogénéiser le champ électrique radial et de fournir un chemin sûr aux courants de fuite. L'écran d'isolation empêche les décharges partielles au-dessus de l'isolant. Il est généralement fabriqué à partir du même matériau que l'écran conducteur [42].

Cette interface est nécessaire puisque le métal ne fait pas adhérer parfaitement au diélectrique polymère extrudé, en raison des différents coefficients de dilatation de ces deux matériaux. En outre, dans les câbles HVDC soumis à une charge élevée, le gradient électrique maximal peut se

produire à l'interface isolant-Semi-conducteur externe. Par conséquent, cette interface peut fonctionner en présence de valeurs particulièrement importantes de champ électrique. En ce qui concerne les semi-conducteurs intérieures et extérieures, ils sont habituellement faits du même composé de base utilisé pour l'isolation, remplie de particules de noir de carbone, ce qui garantit une résistivité volumique dans la gamme de 100 à 1000Vm. Dans tous les cas, les composés utilisés pour le semi-conducteur externe peuvent être autres que celles pour le semi-conducteur intérieur. Donc, avec différentes valeurs de la résistivité électrique.

1.3.5 Ecran métallique

Le blindage métallique est un facteur de sécurité important dans les câbles haute tension. En cas de dommage mécanique causé aux câbles, un commutateur rapide permet un accès à faible impédance au courant de défaut. Le courant de charge est produit par le condensateur formé entre le conducteur et le blindage métallique. Le cuivre et l'aluminium sont des matériaux typiques pour le blindage métallique en raison de leur bonne conductibilité électrique et de la résistance contre la corrosion. Ils résistent ainsi mieux aux décharges partielles qui se propagent à travers le blindage métallique, ce qui rend cette partie de câbles particulièrement intéressante.

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

- ⊗ Fournir un trajet de retour pour le courant de charge capacitive dans des conditions d'exploitation ;
- ⊗ Réalisation de mise à la terre qui permet d'écouler les courants de défaut jusqu'à ce que le système soit hors tension ;
- ⊗ Protection contre les contacts accidentels ;
- ⊗ Protection mécanique de l'isolant, ils servent comme armure ;
- ⊗ Rôle d'étanchéité : grâce à leur technologie (écran massif, écran rubané, contre coléus soudé...), les écrans métalliques peuvent assurer l'étanchéité radiale du câble [43].

Généralement, l'écran est une gaine de plomb pour les câbles 63, 90 et 225 kV. Pour les câbles 400 kV, l'écran peut être constitué d'une gaine de plomb. Cependant, une technologie associant une nappe de fils d'aluminium et une gaine de plomb est utilisée, de plus, des écrans sont développés, comprenant une nappe de fils d'aluminium ou de cuivre disposée sous une feuille d'aluminium soudée sur elle-même.

Ces technologies d'écran dites « mixtes » permettent de réduire sensiblement le poids total du câble.

Un matelas de dilatation peut être mis en œuvre pour diminuer les contraintes mécaniques au niveau de l'écran résultant de la dilatation de l'enveloppe isolante [44].

Le dimensionnement de l'écran est directement lié à l'intensité du courant de court-circuit qu'il doit supporter : 8 ou 10 kA en haute tension, 31,5 kA en 225 kV et 63 kA en 400 kV.

Les résistances des écrans sont de l'ordre de 0,2 Ω/km en 225 kV et 0,1 Ω/km en 400 kV.

Le tableau (1.9) précise les épaisseurs des gaines de plomb généralement pratiquées.

Tableau 1.9: Epaisseur de la gaine des câbles en fonction de la tension et de la section [44].

Section (mm ²) \ Tension [kV]	240	400	630	800	1000	1200	1600	2000	2500
63	2,25	1,95	1,8	1,85	2,1	2,15	2,25		
90	3,25	2,9	2,6	2,4	2,25	2,35	2,2		
225			3,4	3,2	3,0	3,0	3,0		
400					5,6	5,4	5,2	4,9	4,7

I.3.6 Gaine de protection

La gaine extérieure est la couche la plus externe du câble. Comme il peut y avoir une induction électromagnétique lorsque le câble est utilisé, une tension induite relativement élevée peut être générée entre l'âme et la couche de protection métallique d'un câble long à haute tension. Pour empêcher la tension induite de circuler dans la couche de protection métallique, les performances d'isolation de la gaine extérieure doivent être renforcées et le câble doit être protégé contre les dommages mécaniques et la corrosion chimique. Par conséquent, la gaine extérieure doit être à la fois isolante et présente une résistance mécanique adéquate. Ses matériaux constitutifs comprennent principalement le polyéthylène (PE) et le chlorure de polyvinyle (PVC) [45].

I.4 Modèle électrique du câble de haute tension

Le schéma électrique simplifié du câble est représenté sur la figure (1.11). La résistance radiale de l'isolant est beaucoup plus importante que celles correspondant aux semi-conducteurs et au cuivre, qui peuvent donc être négligées.

D'autre part, le semi-conducteur externe possède une résistivité très faible, par conséquent, une résistance longitudinale très faible par rapport à celle de l'isolant [46].

L'impédance complexe de ce circuit $R_s R_i C$ s'écrit :

$$Z^* = Z' + jZ'' = R_s + \frac{R_i}{1 + \omega^2 C^2 R_i^2} - j \frac{\omega R_i^2 C}{1 + \omega^2 C^2 R_i^2} \quad (1.1)$$

avec ω la pulsation de la tension appliquée au circuit.

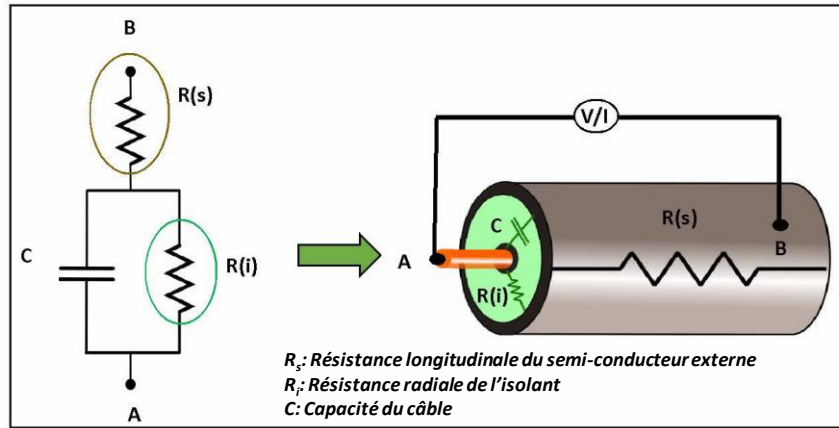


Figure 1.11: Schéma électrique équivalent simplifié du câble HT [46].

Le facteur de perte est un paramètre souvent utilisé pour déterminer la qualité d'un isolant. Il traduit la puissance dissipée dans le diélectrique et correspond au rapport des impédances réelle et imaginaire :

$$\tan\delta = \frac{Z'}{Z''} = \frac{1}{\omega \cdot R_i^2 \cdot C} + \omega R_s C \quad (1.2)$$

La résistance de l'isolant étant beaucoup plus importante que celle du semi-conducteur externe (de plusieurs décades), le premier terme de l'équation peut être négligé par rapport aux deux autres, et l'équation simplifiée s'écrit :

$$\tan\delta = \frac{1}{\omega \cdot R_i \cdot C} + \omega R_s C \quad (1.3)$$

En basse fréquence, le deuxième terme de l'équation (1.3) devient très faible, alors que le premier augmente proportionnellement à $1/\omega$.

Pour les fréquences basses, le facteur de perte se réduit donc à :

$$\tan\delta = \frac{1}{\omega \cdot R_i \cdot C} \quad (1.4)$$

En haute fréquence, le terme en $1/\omega$ devient négligeable et le facteur de perte est dominé par la résistance série du semi-conducteur externe. Il peut donc s'exprimer ainsi :

$$\tan\delta = \omega R_s C \quad (1.5)$$

L'évolution avec la fréquence du facteur de perte du circuit équivalent du mini-câble est illustrée dans la figure (1.12) suivante, sur laquelle ont été indiquées la partie du spectre correspondant essentiellement à la contribution de l'isolant et celle faisant ressortir de façon prépondérante la contribution du semi-conducteur.

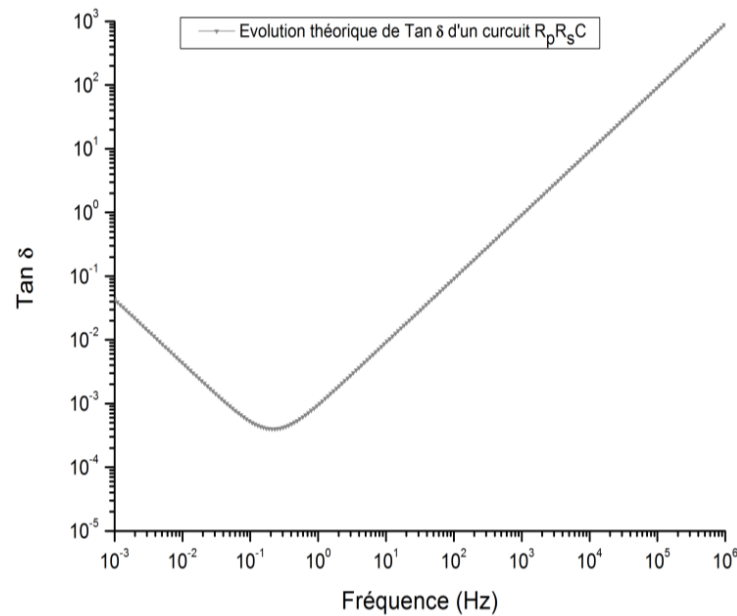


Figure 1.12: Evolution du facteur de perte en fonction de la fréquence [46].

I.5 Les propriétés fondamentales des diélectriques

Les diélectriques existent sous forme solide, liquide et gazeuse. Ils sont capables de stocker l'énergie électrique, puisqu'ils permettent au champ électrique de les pénétrer ; cette aptitude de pénétration est caractérisée par leur permittivité électrique.

I.5.1 Résistivité

La résistivité est la traduction de l'aptitude du matériau à s'opposer au passage du courant lorsqu'il est soumis à une contrainte en tension. Elle représente l'indice de performance du matériau. On peut différencier la résistivité de surface de la résistivité transversale (ou de volume). Dans le cadre des isolants de câbles, nous ne nous intéresserons qu'à la résistivité de volume [47].

La résistivité transversale pour un échantillon plan est donnée par la relation suivante :

$$\rho_V = \frac{S}{e} \cdot R \quad (1.6)$$

Avec ρ_V en Ωm , S la surface de l'électrode de mesure (m^2), e l'épaisseur de l'échantillon (m) et R la résistance électrique de l'échantillon (Ω).

On considère un matériau comme isolant quand sa résistivité a une valeur supérieure à $10^{11} \Omega\text{m}$.

Pour le PVC, la résistivité va de $10^{11} \Omega\text{m}$ à $10^{17} \Omega\text{m}$ suivant la formulation.

I.5.2 Conductivité électronique

La conductivité dans les polymères provient du déplacement sous l'action d'un champ électrique de deux types de porteurs de charges. On trouve d'une part des charges électroniques et d'autre part des charges ioniques.

Dans les polymères, la conductivité ionique ne dépend pas uniquement du nombre d'ions, mais il est aussi nécessaire de s'intéresser à la mobilité des ions en présence. Celle-ci est tributaire de la viscosité du polymère. Elle augmente également avec la température [48].

Il existe des phénomènes caractéristiques d'une conductivité ionique : le transport de matière (dégagement gazeux, dépôt de matière aux électrodes), et l'apparition d'effets de polarisation avec déviation de la loi d'Ohm.

Différents paramètres sont susceptibles d'influencer la conductivité. Mais, l'effet de la température est le plus significatif. Il y a trois comportements de la variation de la conductivité des polymères avec la température (Figure 1.13).

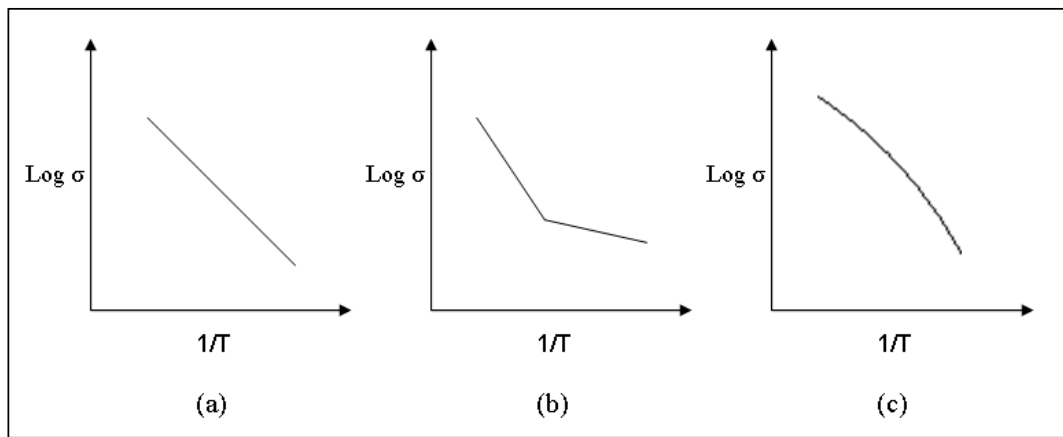


Figure 1.13: Représentation graphique des différents types de comportement de variation de conductivité avec la température [49, 50].

Dans la majorité des cas, on peut appliquer la loi d'Arrhenius pour relier la conductivité à la température. On obtient alors une relation de la forme :

$$\sigma = \sigma_0 \cdot e^{-\frac{E_a}{K.T}} \quad (1.7)$$

Dans ce cas, le tracé de $\log(\sigma) = f(1/T)$ sera une droite (sur la figure (1.13.a)). E_a est l'énergie d'activation et σ_0 une constante. Cette relation peut être considérée comme toujours vraie sur un intervalle réduit de température.

Parfois, l'évolution de la conductivité avec la température présente une température de transition, (figure 1.13.b). On peut alors écrire la variation de σ avec T en considérant deux portions linéaires :

$$\sigma = \sigma_1 \cdot e^{-\frac{E'_a}{K.T}} + \sigma_2 \cdot e^{-\frac{E''_a}{K.T}} \quad (1.8)$$

Enfin, certains polymères présentent une évolution de la conductivité avec la température telle que celle représentée sur le graphe de la figure (1.13.c). Ce type d'évolution peut être décrit par la relation :

$$\log(\sigma) = \log(\sigma_0(t)) - \frac{E_a(T)}{R.T} \quad (1.9)$$

I.5.3 Phénomène de la polarisation

Les pertes diélectriques sont dues aux mouvements des porteurs de charges. L'effet de ce mouvement est appelé polarisation induite. On distingue plusieurs types de polarisation (figures 1.14 – 1.15) : électronique, ionique, dipolaire, macroscopique, interfaciale, spontanée. Celles-ci peuvent coexister ou apparaître séparément. De plus, tous ces types de polarisation peuvent être classés en deux groupes selon leurs caractères : la polarisation élastique et la polarisation de relaxation. La polarisation totale est la somme des différents types de polarisation [51, 52].

Pour une charge ponctuelle q placée au point de coordonnées r , le moment électrique par rapport à l'origine 0 s'écrit :

$$m_e = q \cdot r \quad (1.10)$$

Pour N charges ponctuelles, le moment électrique p est défini par la relation :

$$p = \sum_{i=1}^N q_i \cdot r_i \quad (1.11)$$

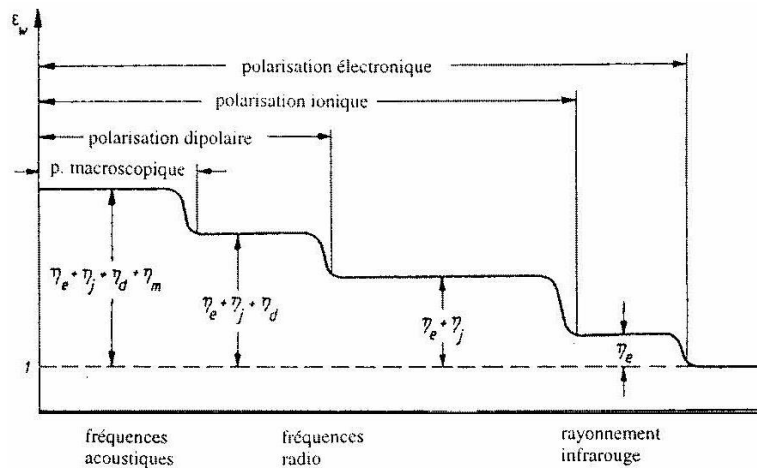


Figure 1.14: Variation de la permittivité diélectrique en fonction de la fréquence [51].

Type de polarisation	$E = 0$	$\xrightarrow{E}$
Electronique		
Ionique		
par orientation		
Interfaciale		

Figure 1.15: Présentation de différents types de polarisation [52].

Considérons le cas d'un diélectrique non polaire. Si on le soumet à l'action d'un champ électrique, les centres des charges positives et négatives ne vont plus coïncider, chaque atome ou molécule se déforme et peut être assimilé à un dipôle dont le moment électrique est :

$$P = q \cdot l \quad (1.12)$$

D'un point de vue macroscopique, pour un volume Δv et si N est le nombre d'atomes ou molécules par unité de volume, alors :

$$\sum_{i=1}^{N \cdot \Delta v} p_i = N \cdot p \cdot \Delta v = p \cdot \Delta v \quad (1.13)$$

P est le moment dipolaire par unité de volume, il est également appelé polarisation du diélectrique :

$$P = \lim_{\Delta v \rightarrow 0} \frac{dp}{dv} \quad (1.14)$$

1.5.4 Permittivité diélectrique

La permittivité diélectrique est une propriété physique qui décrit la réponse d'un milieu donné à un champ électrique appliqué.

C'est une grandeur macroscopique. Elle traduit la façon dont le champ électrique influe sur l'organisation des charges électriques dans un matériau donné, notamment le déplacement des charges et la réorientation des dipôles électriques [53, 54].

Dans le cas d'un milieu linéaire, homogène et isotrope, et avec réponse instantanée aux changements du champ électrique E , la réponse du matériau correspondant aux différents phénomènes de polarisation se traduit par une polarisation induite.

La permittivité relative en champ statique (ϵ_r) est un coefficient de référence permettant de situer la valeur de la constante diélectrique d'un corps par rapport à celle du vide, prise comme base :

$$\epsilon_r = \epsilon / \epsilon_0 \quad (1.15)$$

où ϵ_0 est la permittivité du vide est égale à : $1/(36 \cdot \pi \cdot 10^9)$ F/m.

La permittivité en champ alternatif est donnée par :

$$\epsilon_r(\omega) = \epsilon'(\omega) - j\epsilon''(\omega) = \epsilon_\infty + \frac{\epsilon_s - \epsilon_\infty}{1 + j\omega\tau} \quad (1.16)$$

Avec :

$$\epsilon'_r(\omega) = \epsilon_\infty + \frac{\epsilon_s - \epsilon_\infty}{1 + \omega^2\tau^2} = 1 + \frac{N \cdot Z \cdot q_0^2 (\omega_0^2 - \omega^2)}{\epsilon_0 \cdot m_0 \cdot (\omega_0^2 - \omega^2)^2 + \frac{\omega^2 \phi^2}{m_0^2}} \quad (1.17)$$

$$\epsilon''_r(\omega) = \frac{(\epsilon_s - \epsilon_\infty) \cdot \omega \cdot \tau}{1 + \omega^2\tau^2} = \frac{N \cdot Z \cdot q_0^2}{m_0 \cdot \epsilon_0} + \frac{\frac{\omega \cdot \phi}{m_0}}{(\omega_0^2 - \omega^2)^2 + \frac{\omega^2 \phi^2}{m_0^2}} \quad (1.18)$$

$$\omega_c = \frac{1}{\tau} = 2\pi \cdot f_c \quad (1.19)$$

$$\phi = \mu_0 \cdot q_0^2 \cdot \omega_0^2 \quad (1.20)$$

Où ϵ_s : valeur maximale, ϵ_∞ : Valeur minimale, τ : Temps de relaxation, f_c : Fréquence de relaxation

pour laquelle la dissipation de l'énergie est maximale, ω : Pulsation du champ électrique et N : Concentration volumique des atomes.

1.5.5 Les pertes diélectriques

Les pertes diélectriques correspondent à l'énergie dissipée dans un diélectrique lorsqu'il est soumis à un champ électrique extérieur. Ainsi, quand un champ électrique est appliqué au diélectrique, la polarisation ne suit pas ce champ de manière instantanée : ceci traduit une absorption d'énergie par le diélectrique, équivalente au travail nécessaire pour déplacer ou induire les dipôles, ainsi que pour déplacer les charges libres. Le cas simple, correspondant à la situation fréquente de l'application d'une tension sinusoïdale à un système d'isolation, est celui d'un champ extérieur qui varie de façon sinusoïdale avec une pulsation ω : on remarque alors l'existence d'une composante du courant à travers le diélectrique en phase avec le champ (à la différence de la composante de déplacement, qui est en quadrature avec le champ). L'existence de la composante du courant en phase avec le champ traduit ainsi les pertes diélectriques d'une tension sinusoïdale à un système d'isolation, est celui d'un champ extérieur qui varie de façon sinusoïdale avec une pulsation ω : on remarque alors l'existence d'une composante du courant à travers le diélectrique en phase avec le champ (à la différence de la composante de déplacement, qui est, elle, en quadrature avec le champ). L'existence de la composante du courant en phase avec le champ traduit ainsi les pertes diélectriques.

$$\tan \delta = \frac{|I_R^*|}{|I_C^*|} = \frac{I_R}{I_C} = \frac{\omega \cdot \epsilon'' \cdot C_0 \cdot U}{\omega \cdot \epsilon' \cdot C_0 \cdot U} = \epsilon'' / \epsilon' \quad (1.21)$$

Avec δ est l'angle de pertes.

1.5.6 Rigidité diélectrique

La rigidité diélectrique d'un matériau est la valeur maximale du champ électrique que l'on peut lui appliquer sans qu'il ne subisse une dégradation irréversible, nommée claquage ou perforation diélectrique, rendant impossible toute nouvelle application de la tension. Le claquage est précédé par une augmentation importante du courant circulant dans le matériau, avec des conséquences thermiques destructives : fusion, évaporation, décomposition, carbonisation, etc.

En pratique, la rigidité diélectrique est le rapport entre la tension de claquage et la distance entre les électrodes auxquelles cette tension est appliquée, dans des conditions d'essai spécifiées. Pour que cette mesure soit rigoureusement correcte, le champ devrait être uniforme, c'est-à-dire que les électrodes soient planes, parallèles, et dotées de bords ne provoquant aucun renforcement local du champ. En pratique, on utilise souvent des électrodes dont le rayon de courbure est grand devant la distance interélectrodes.

I.6 Défauts dans les câbles de transmission électrique

La fonction première d'un câble électrique est d'acheminer un courant. Lorsqu'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 (Figure 1.16). On parle alors de 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. Elles peuvent être localisées sur une portion de câble soumise à des contraintes d'exploitation particulièrement sévères, ou l'affecter sur toute sa longueur. 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). Les modifications des propriétés des câbles sont en partie dues à un vieillissement naturel, anticipé par les ingénieurs et pris en compte dans la détermination de la durée de vie des systèmes. Néanmoins, 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 ;
- ✚ Agressions chimiques résultant d'une contamination par des réactifs (eau borée, fluides réfrigérants).

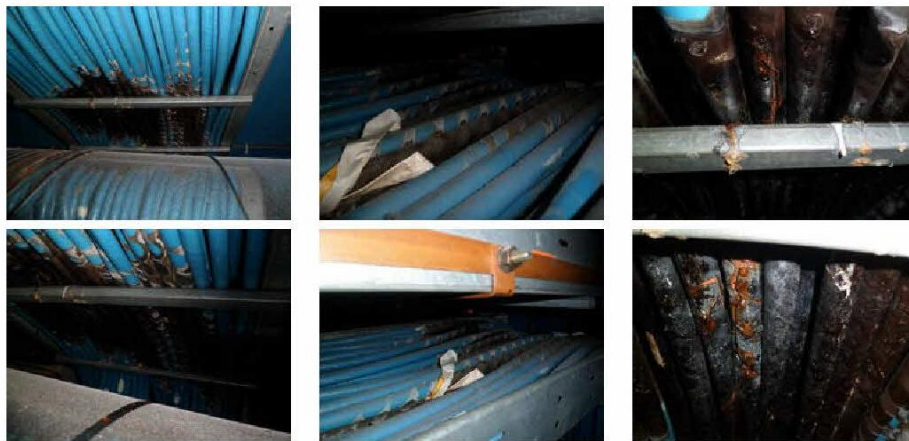


Figure 1.16: Câbles localement endommagés [55].

I.7 Conclusion

Les câbles qui sont mis en œuvre en HTA et en HTB sont plus volumineux qu'en BT car pour garantir un isolement satisfaisant en HTA ou en HTB il faut :

- ✚ Augmenter l'épaisseur des isolants au niveau des conducteurs ;
- ✚ Eloigner les parties actives mises sous tension en utilisant la propriété isolante de l'air ;
- ✚ Utiliser des gaz dont les propriétés diélectriques (isolantes) sont supérieures à celle de l'air pour souffler l'arc provoqué par un court-circuit ;

Lors de la fabrication du câble, la mise en place de l'isolation en PVC se fait par extrusion directement autour de l'âme, celle-ci ayant auparavant été enrubannée avec un semi-conducteur graphité. Une alternative existe : dans ce cas, le semi-conducteur peut être déposé également par extrusion. Les autres éléments sont également déposés par enrubannage ou par extrusion suivant leur type : l'écran métallique et le ruban tissé sont enrubannés, la gaine externe est extrudée et le semi-conducteur externe est soit enrubanné soit extrudé.

Nous constatons que le transport de l'énergie électrique peut être considéré comme un système complexe avec de nombreuses interactions non-linéaires, dont l'optimisation tant technique que financière relève encore de beaucoup de règles de bonnes pratiques même si les recherches en cours permettent d'évoluer progressivement vers une aide à la décision de plus en plus efficace.

Dans la continuité de cette réflexion, le chapitre suivant s'appuie à la fois sur une synthèse bibliographique portant sur le graphite naturel et l'oxyde de zinc utilisés comme additifs, et sur une modélisation numérique réalisée à l'aide du logiciel COMSOL Multiphysics, afin de simuler le comportement électromagnétique d'un câble triphasé haute tension.

CHAPITRE II

MODELISATION DU COMPORTEMENT D'UN CABLE ELECTRIQUE TRIPHASE

II.1 Introduction

L'introduction de la simulation a un impact profond sur l'approche des systèmes complexes dans le monde de l'ingénierie et de la technologie. Ce solveur numérique joue un rôle particulièrement important dans le domaine des câbles haute tension souterrains. Des modèles et algorithmes complexes se combinent pour offrir une nouvelle perspective sur le comportement des câbles haute tension souterrains. Les phénomènes les plus complexes des occurrences du monde réel peuvent être recréés et analysés grâce aux simulations, qui offrent aux chercheurs un moyen d'étudier les champs électriques et les potentiels dans les câbles haute tension souterrains avec une profondeur sans précédent [56].

L'utilisation de câbles électriques souterrains dans les réseaux de distribution et de transmission a connu une croissance significative ces dernières années. Aujourd'hui, un grand nombre de secteurs industriels utilise des matériaux composites, et l'étude de leur comportement devient de plus en plus cruciale.

Par rapport aux matériaux traditionnels, ils présentent d'avantages, telles qu'une résistance et une rigidité spécifiques élevées, une grande résistance à la fatigue et à la corrosion [57].

Afin d'améliorer les performances des câbles électriques, des matériaux additifs peuvent être incorporés dans le matériau isolant polymère pour produire ce que l'on appelle des composites polymères.

L'étude de l'impact des matériaux additifs tels que le graphite naturel (C) et l'oxyde de zinc (ZnO) sur le comportement de champ électrique dans les différentes couches diélectriques, ainsi que celle du germanium (Ge) et du graphite naturel (C) dans les différentes couches semi-conductrices d'un câble électrique triphasé haute tension de 33 kV, est cruciale pour cette investigation.

Dans ce chapitre, nous rassemblons quelques rappels bibliographiques concernant, d'une part, les différentes propriétés du graphite naturel et de l'oxyde de zinc que nous utilisons comme matériaux additifs dans la partie isolante du câble, et d'autre part, les lois de mélanges binaires et ternaires usuellement utilisées pour le calcul ou la prédiction du comportement de la permittivité en fonction de la concentration de la porosité dans les matériaux composites.

Enfin, nous présentons la modélisation d'un câble électrique triphasé haute tension à l'aide du logiciel COMSOL Multiphysics, qui est un logiciel de simulation numérique basé sur la méthode des éléments finis (FEM), utilisé pour modéliser, analyser et résoudre des phénomènes physiques complexes impliquant plusieurs domaines couplés (multiphysiques).

II.2 Propriétés du graphite naturel

Les différentes propriétés du graphite naturel sont les suivantes :

II.2.1 Propriétés physico-chimiques du graphite naturel

- ❖ La structure cristalline particulière du graphite est de forme hexagonale, ce qui entraîne une anisotropie, c'est-à-dire que les propriétés du matériau peuvent varier considérablement selon qu'elles sont mesurées dans le plan ou perpendiculairement aux plans [58] ;

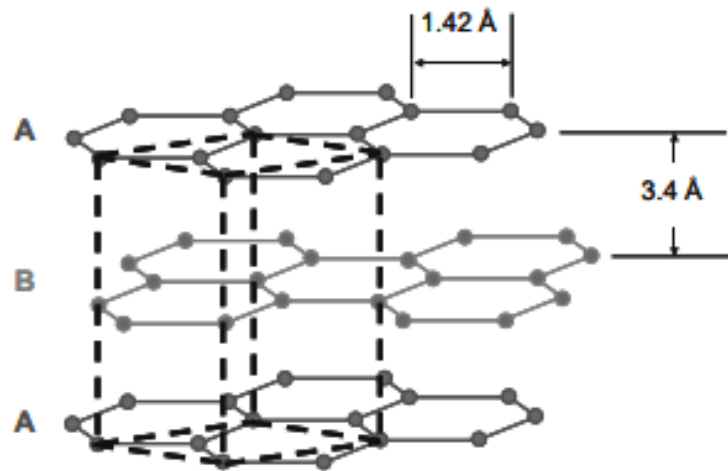


Figure 2.1: Schéma de la structure en graphite [59].

- ❖ Le graphite pur est l'un des matériaux les plus chimiquement inertes. Il résiste à la plupart des acides et des gaz corrosifs. Toutefois, des impuretés sont presque toujours présentes à un certain degré dans les graphites naturels et artificiels ;
- ❖ Le graphite n'a pas de point de fusion normal, car à une atmosphère, il ne fond pas mais se sublime lorsque la température atteint environ 4000 K et une pression de 100 atm. Sa chaleur de sublimation est environ 46,84 KJ/mol ;
- ❖ Le point triple (où les trois états, solide, liquide et gaz sont en équilibre) est estimé, selon des données récentes, à une température de 4200 K et une pression de 100 atm ;
- ❖ Le volume atomique est d'environ 5,315 cm³/mol ;
- ❖ La chaleur de vaporisation du graphite est relativement élevée et varié entre 355,8 et 598,2 KJ/mol [58] ;
- ❖ La masse volumique du cristal parfait est de l'ordre de 2,26 g/cm³ à une température de 300 K et une pression de 1 atm [58, 60, 61], tandis que la densité de masse est environ de 1,75 g.cm⁻³ [60].

II.2.2 Propriétés thermiques du graphite naturel

- ✚ La conductivité thermique d'un cristal de graphite a été signalée jusqu'à 4180 W/m.K dans les directions planes pour le graphite pyrolytique hautement cristallin recuit sous contrainte à une température de 25 °C. pour les directions parallèle et perpendiculaire, les valeurs sont respectivement de 390 W/m.K et environ de 2W/m.K ;
- ✚ La capacité thermique molaire (chaleurs spécifique) du graphite varié entre 8,033 et 8,635 J/mol.K à 25 °C, et elle augmente avec l'élévation de la température selon la relation suivante :

$$C_p = 4,03 + (1,14 \times 10^{-3})T - (2,04 \times 10^5)/T^2 \quad (2.1)$$

Avec : C_p : La capacité thermique molaire ; T : Température.

- ✚ La dilatation thermique du cristal de graphite présente un effet marqué anisotropie. Elle est faible dans les directions planes ab (plus faible que celle de la plupart des matériaux) et devient négative jusqu'à environ 400 °C, avec un minimum autour de 0 °C. Dans la direction perpendiculaire, la dilatation thermique est plus élevée d'un ordre de grandeur et augmente lentement et progressivement. À 0 °C, le coefficient de dilatation thermique est de $25 \times 10^{-6} / ^\circ\text{C}$ et à 400 °C, il atteint $28 \times 10^{-6} / ^\circ\text{C}$ en moyenne [58].

II.2.3 Propriétés électriques du graphite naturel

- ❖ Le graphite naturel a une constante diélectrique relative égale à 10 – 15 [62] ;
- ❖ La conductivité thermique est dominée par la chaleur spécifique et varie en fonction du cube de la température ($\sim T^3$). À des températures plus élevées, au-dessus des maximaux, la conductivité thermique diminue avec l'augmentation de la température en raison de la diffusion des phonons [60] ;
- ❖ La résistivité électrique du graphite parallèle aux plans basaux (directions ab) est faible, variant entre 2,5 et $5 \times 10^{-6} \Omega\text{m}$, ce qui fait du matériau un bon conducteur d'électricité. En revanche, la résistivité électrique dans la direction perpendiculaire est élevée, atteignant $3000 \times 10^{-6} \Omega\text{m}$, et le matériau est considéré comme isolant électrique. Cette résistivité diminue légèrement avec l'élévation de la température ;
- ❖ La résistivité électrique du cristal de graphite dans les directions planes ab augmente avec la température. Cette augmentation résulte de la diminution du libre parcours moyen des électrons, dans un mécanisme similaire à celui de l'augmentation de la conductivité thermique examinée ;
- ❖ La résistivité électrique du cristal de graphite dans la direction perpendiculaire (c) diminue légèrement avec l'augmentation de la température, probablement parce que les

électrons peuvent sauter ou passer dans une autre orbite en raison d'une activation thermique accrue [58] ;

Les conductivités du graphite pour différente température sont résumées dans le tableau (2.1).

Tableau 2.1: La conductivité électrique du graphite pour différente température [63].

Conductivité électrique	300 K	77,5 K	4,2 K
$\sigma_a(\text{S/m})$	$2,26 \times 10^6$	$3,87 \times 10^6$	$3,32 \times 10^7$
$\sigma_c(\text{S/m})$	590	330	380

II.2.4 Propriétés mécaniques du graphite naturel

- Ⓢ Le module de Young du graphite pour la direction parallèle aux plans est de 1020 Gpa, tandis que dans la direction perpendiculaire aux plans, il est de 36,3 Gpa [60, 63] ;
- Ⓢ Le module de cisaillement dans la direction parallèle aux plans est de 4,5 Gpa [60] ;
- Ⓢ Le module de masse est d'environ 286 Gpa [63].

II.3 Propriétés du l'oxyde de zinc

Les différentes propriétés du l'oxyde de zinc sont les suivantes :

II.3.1 Propriétés physico-chimiques d'oxyde de zinc

L'oxyde de zinc est un matériau largement utilisée dans un certain nombre d'applications, comme les varistances, employées pour bloquer les surtensions électriques (parafoudre). Il est également utilisé dans les matériaux composites.

- L'oxyde de zinc est un composé chimique de formule ZnO , constitué d'environ 80,36 % de zinc et 9,66 % d'oxygène ;
- La masse molaire d'oxyde de zinc est de 81,38 g/mol ;
- Sa température de fusion est de 1975 °C et sa masse volumique est de 5600 Kg/m³ ;
- L'oxyde de zinc massif, connu sous le nom de zincite, cristallise selon la structure hexagonale compacte de type würtzite, appartenant au groupe d'espace $P6_3mc$, numéro de groupe 186 dans la classification de Bravais ;
- L'oxyde de zinc est un matériau transparent dont l'indice de réfraction statique à l'état massif est égal à 2 [64].

II.3.2 Propriétés électriques d'oxyde de zinc

- Dans l'oxyde de zinc, il existe deux types d'imperfections dans le réseau cristallin de ZnO, responsables de la conduction de type n observée dans le matériau : la première imperfection est intrinsèque (atome de Zn en position interstitielle, Zn et lacune d'oxygène (V-O)). La deuxième imperfection est intentionnelle (dopage) [64] ;
- L'oxyde de zinc est un semi-conducteur dégénéré, de conductivité de type n, due à un excès de zinc en position interstitielle et / ou à une déficience en oxygène [65] ;
- Les valeurs de la résistivité électrique de l'oxyde de zinc en couche mince se situent dans une gamme allant de $10^{-6} - 10^7 \Omega\text{m}$ [64] ;
- L'oxyde de zinc (ZnO) est un semi-conducteur à large bande interdite (E_g autour de 3,2 eV) et transparent dans le visible et le proche infrarouge, avec une énergie de liaison des excitons $E_L = 60 \text{ meV}$ à température ambiante [66, 67] ;
- La conductivité électrique du film d'oxyde de zinc peut être analysée par la relation : $(\sigma = \sigma_0 \cdot \exp(-\frac{E_g}{kT}))$, à la température ambiante, la conductivité électrique est trouvée égale à $7,261 \times 10^{-7} \text{ S/cm}$ et se diminue avec augmentation de la température [68] ;
- L'oxyde de zinc a une constante diélectrique relative égale à 8,75 [69].

II.3.3 Propriétés mécaniques d'oxyde de zinc

- ❖ Un module de Young de $111,2 \pm 4,7 \text{ GPa}$ pour une pénétration plastique de 300 nm ;
- ❖ L'oxyde de zinc présente une dureté d'environ $5 \pm 0,1 \text{ GPa}$ à une profondeur de pénétration plastique de 300 nm [70] ;
- ❖ L'oxyde de zinc présente un mécanisme primaire de déformation équivalent à un glissement selon des plans basaux et pyramidaux. Cette étude a mis en évidence que les dommages occasionnés sur le semi-conducteur de ZnO provoquent une propagation importante des défauts ;
- ❖ Les plans perpendiculaires à la surface sont plus aptes au glissement pour le ZnO orienté suivant l'axe a, ce qui rend sa dureté inférieure à celle du ZnO orienté suivant l'axe c. Cela signifie que l'orientation des plans de l'oxyde de zinc a un rôle essentiel sur les propriétés mécaniques du matériau [71].

II.4 Les lois de mélanges

Dans les milieux où la distribution spatiale des inclusions est désordonnée, il n'existe pas de solution rigoureuse. Le recours à des lois phénoménologiques (lois de mélange), à des approches

de type milieu effectif, à des méthodes numériques pour construire la morphologie interne, ou encore aux méthodes de bornes devient alors incontournable pour l'évaluation de la permittivité [72].

II.4.1 Les mélanges diélectriques binaires

Les théories largement utilisées sont :

II.4.1.1 Concept de champ moyen : Théorie de Bruggeman symétrique

Pour traiter le problème des fortes concentrations volumiques, une autre théorie a été proposée par Bruggeman en 1935 [73, 74]. Dans ce modèle du milieu effectif approximatif, le champ est considéré autour de chaque particule, que l'on suppose habituellement sphériques (considérées à la fois la matrice et les inclusions comme des particules). Ce modèle est valide aux fractions volumiques plus élevées puisqu'il traite les deux constituants de manière symétrique [74].

Dans le modèle de Bruggeman (Figures 2.2 – 2.3), l'hypothèse d'un matériau hôte explicite n'est plus supposée.

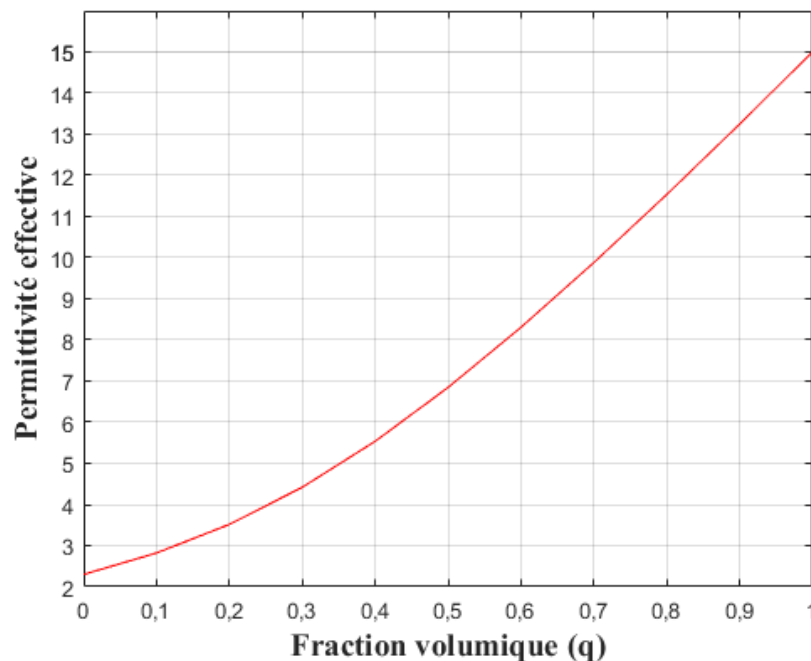


Figure 2.2: Permittivité effective d'un mélange diélectrique composite binaire (polyéthylène réticulé chimiquement - graphite naturel).

Au lieu de cela, les particules de chaque composant sont supposées être incorporées dans un milieu efficace dont la permittivité est égale à la permittivité du mélange ϵ_{eff} que l'on cherche à déterminer [75]. Ainsi ϵ_{eff} doit être déterminée à partir de la relation [76, 77] :

$$(1 - q) \frac{\varepsilon_1 - \varepsilon_{\text{eff}}}{\varepsilon_1 + 2\varepsilon_{\text{eff}}} + q \frac{\varepsilon_2 - \varepsilon_{\text{eff}}}{\varepsilon_2 + 2\varepsilon_{\text{eff}}} = 0 \quad (2.2)$$

Où ε_{eff} , ε_1 et ε_2 sont respectivement les permittivités effectives du mélange, de la matrice et de l'inclusion ; q est la fraction volumique du matériau.

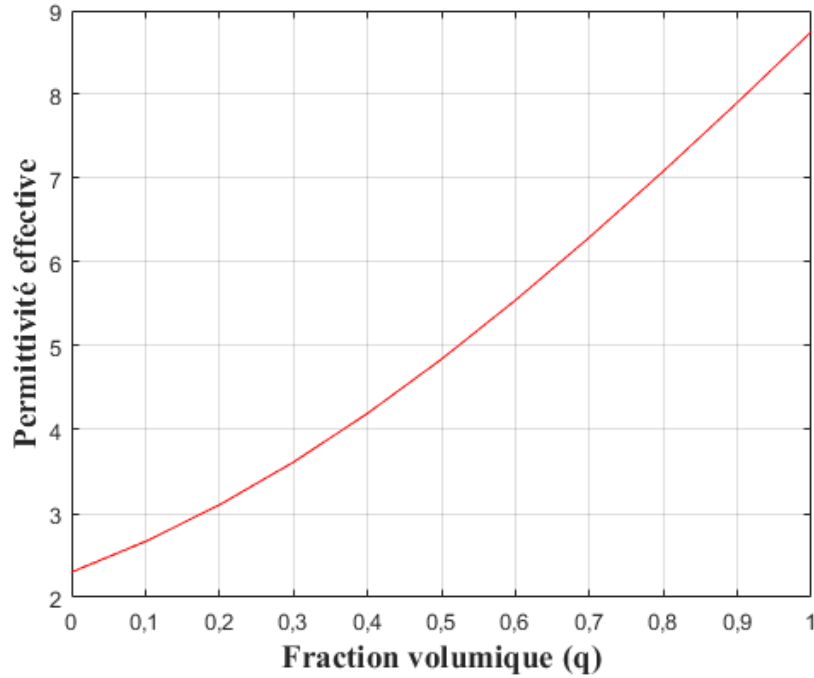


Figure 2.3: Permittivité effective d'un mélange diélectrique composite binaire (polyéthylène réticulé chimiquement - oxyde de zinc).

II.4.1.2 Loi de Lichtenecker et Rother

Les descriptions analytiques des caractéristiques diélectriques d'un mélange formé par une dispersion volumique aléatoire d'inclusions dans une matrice continue, sont en général compliquées à cause de la nature statistique des localisations spatiales aléatoires et des orientations de la phase dispersée. Cela signifie que, si un tel mélange est soumis au champ électrique, la conduction électrique et la polarisation dépendront de la dispersion spatiale aléatoire ainsi que de l'orientation relative des inclusions présentées dans le mélange. Une telle approche stochastique appliquée aux mélanges diélectriques a été développée en premier par Lichtenecker et Rother (Figures 2.4 – 2.5).

Les études expérimentales utilisent la formule de Lichtenecker même dans le cas des milieux anisotropes. Cette loi est particulièrement mieux adaptée pour décrire le comportement diélectrique (statique ou dynamique) des mélanges statistiques et pour toutes les fractions volumiques.

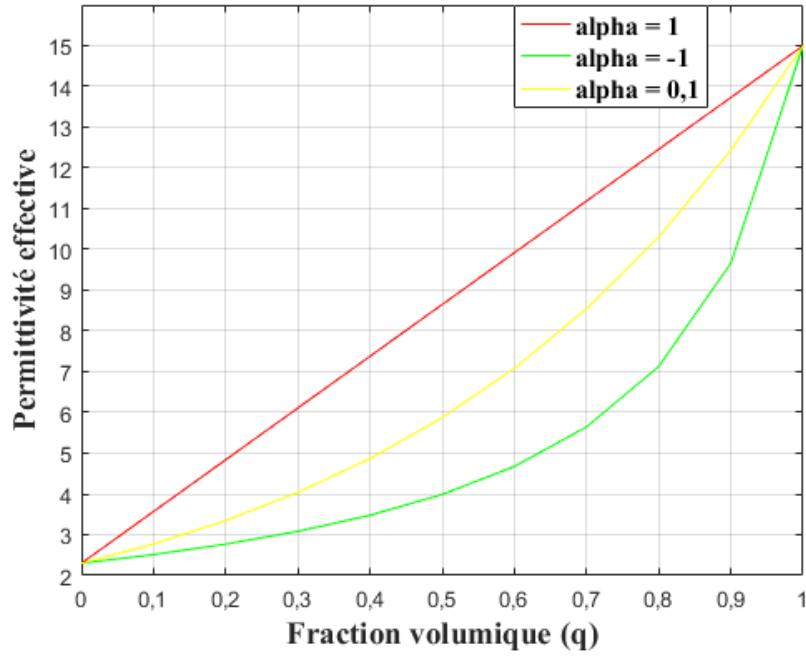


Figure 2.4: Permittivité effective d'un mélange diélectrique composite binaire (polyéthylène réticulé chimiquement - graphite naturel).

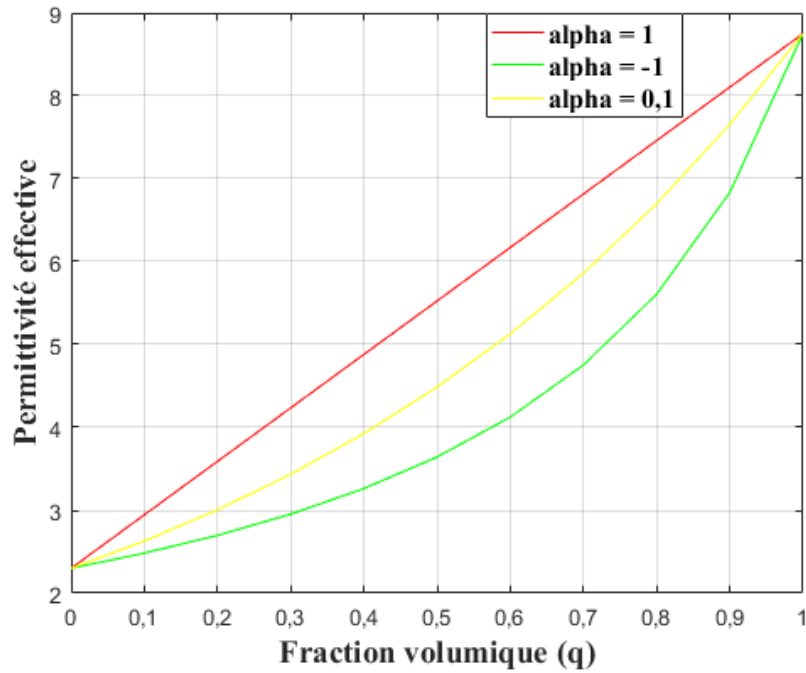


Figure 2.5: Permittivité effective d'un mélange diélectrique composite binaire (polyéthylène réticulé chimiquement – oxyde de zinc).

Dans la loi logarithmique, la géométrie des inclusions ne joue pas un rôle important dans la détermination du comportement diélectrique macroscopique du mélange. Cette loi est donnée par la relation suivante [78] :

$$\epsilon_{\text{eff}}^{\alpha} = [q\epsilon_2^{\alpha} + (1 - q)\epsilon_1^{\alpha}] \quad (2.3)$$

Avec : $-1 \leq \alpha \leq 1$. Pour α égal à 1 ou à -1, on obtient deux matériaux qui décrivent les frontières de Wiener [78, 79] et qui donnent des limites de la constante diélectrique.

Dans le cas où α tend vers 0, Lichtencker a proposé une forme intermédiaire entre la forme série et la forme parallèle, appelée règle de mélange logarithmique, pour les matériaux désordonnés :

$$\ln \epsilon_{\text{eff}} = q \ln \epsilon_2 + (1 - q) \ln \epsilon_1 \quad (2.4)$$

II.4.1.3 Loi de Looyenga

La loi de Looyenga constitue un outil théorique et pratique essentiel pour modéliser le comportement diélectrique des matériaux hétérogènes. Son principal intérêt réside dans sa capacité à prédire la permittivité effective des mélanges à l'aide d'une formulation mathématique simple et robuste. Contrairement à d'autres modèles théoriques, elle ne nécessite pas d'hypothèses restrictives sur la géométrie ou la distribution des phases, ce qui la rend particulièrement adaptée aux systèmes complexes tels que les sols et les matériaux granulaires. Le modèle de Looyenga [80] a supposé que les inclusions ont une forme sphérique et on ne tient pas compte des interactions entre elles (Figures 2.6 – 2.9). Les deux constituants sont supposés avoir des permittivités proches l'une de l'autre : $\epsilon_1 = \epsilon_{\text{eff}} - \Delta\epsilon_{\text{eff}}$, $\epsilon_2 = \epsilon_{\text{eff}} + \Delta\epsilon_{\text{eff}}$. En raison du développement en série de Taylor, $\Delta\epsilon_{\text{eff}}$ est considéré comme assez petit.

La loi de Looyenga est exprimée par la formule [80 – 82] :

$$\epsilon_{\text{eff}} = \left[\left(\epsilon_2^{\frac{1}{3}} - \epsilon_1^{\frac{1}{3}} \right) q + \epsilon_1^{\frac{1}{3}} \right]^3 \quad (2.5)$$

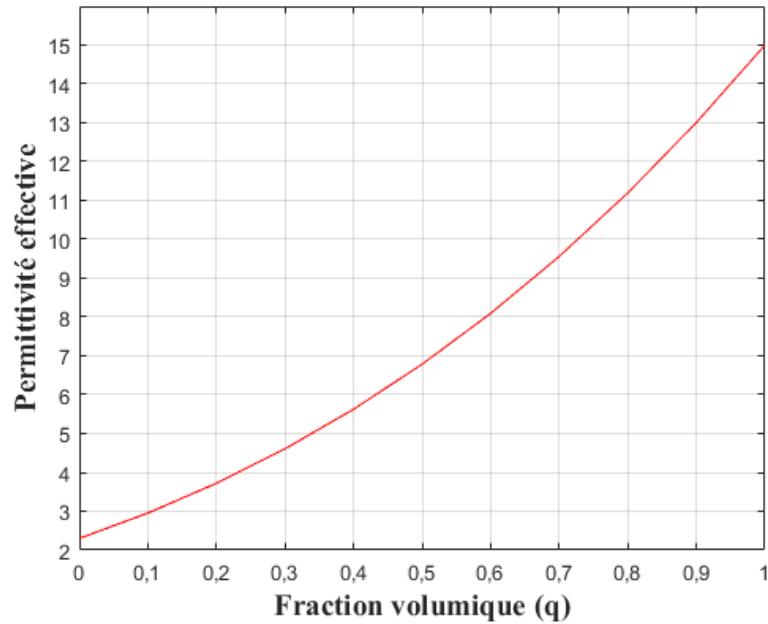


Figure 2.6: Permittivité effective d'un mélange diélectrique composite binaire (polyéthylène réticulé chimiquement - graphite naturel).

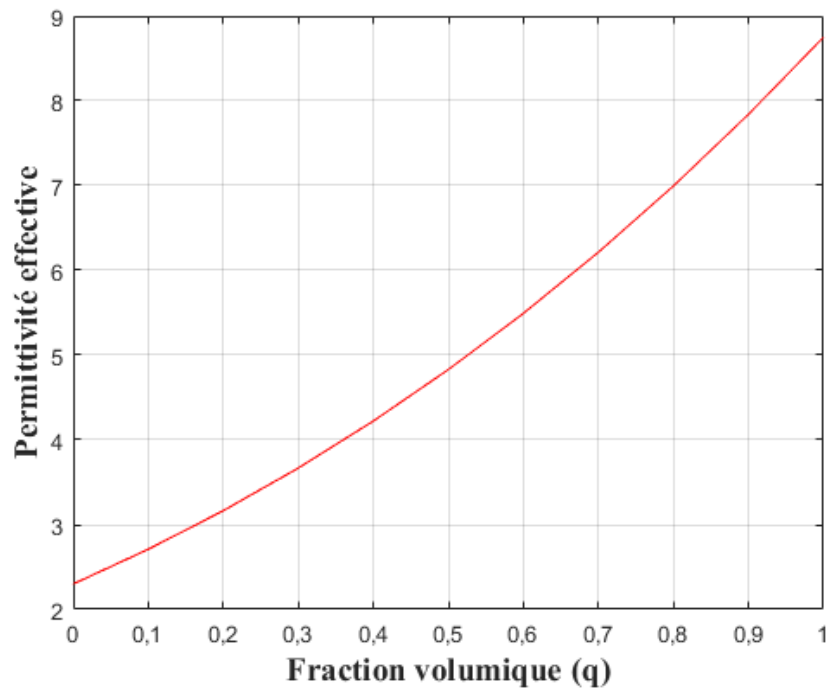


Figure 2.7: Permittivité effective d'un mélange diélectrique composite binaire (polyéthylène réticulé chimiquement - oxyde de zinc).

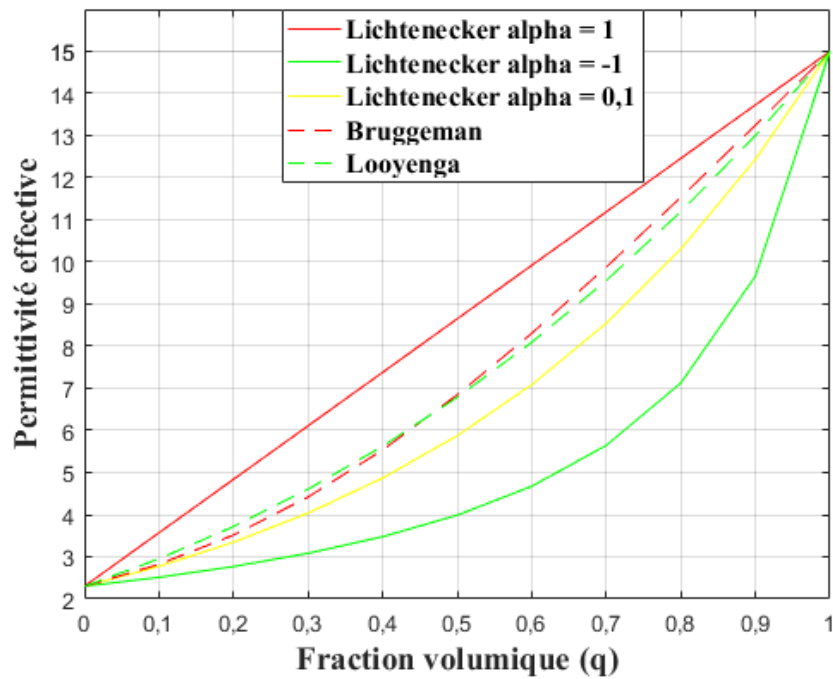


Figure 2.8: Permittivité effective d'un mélange diélectrique composite binaire (polyéthylène réticulé chimiquement - graphite naturel).

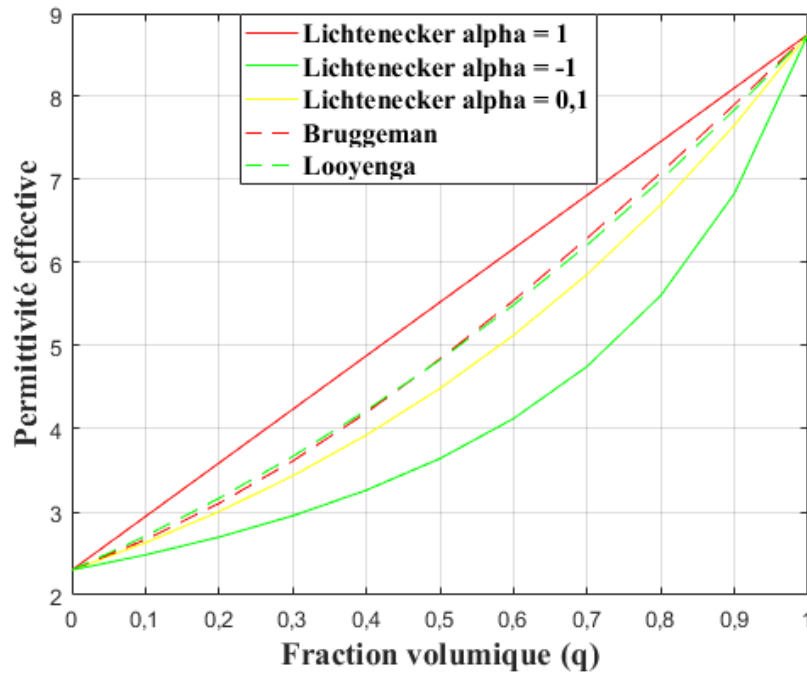


Figure 2.9: Permittivité effective d'un mélange diélectrique composite binaire (polyéthylène réticulé chimiquement - oxyde de zinc).

Les valeurs des permittivités effectives estimées sur un mélange de deux phases, constitué de polyéthylène réticulé chimiquement dont sa permittivité diélectrique est 2,3 et de graphite naturel qui possède une permittivité diélectrique 15, illustrées dans les figures (2.2, 2.4, 2.6 et 2.8), ainsi que pour un autre mélange constitué de polyéthylène réticulé chimiquement et d'oxyde de zinc dont sa permittivité diélectrique est 8,75, illustré les dans figures (2.3, 2.5, 2.7 et 2.9), ont été obtenues en utilisant les différentes lois de mélange Bruggeman, Lichtenecker et Looyenga.

Nous remarquons que la valeur de la permittivité du mélange commence à une valeur égale à celle de la matrice (polyéthylène réticulé chimiquement, $\epsilon_1 = 2,3$) à 0 % de porosité, puis augmente en fonction de la fraction volumique jusqu'à atteindre celle de l'inclusion à 100 %.

Pour les approches de Bruggeman, Lichtenecker logarithmique et Looyenga sont quasi-linéaires et assez proches sur tout l'intervalle de la fraction volumique. Ces valeurs sont comprises entre les bornes de Wiener (Lichtenecker $\alpha \pm 1$), qui dépend de la forme, de la taille, de la concentration volumique et de l'orientation de différentes phases.

II.4.2 Les mélanges diélectriques ternaires

On peut citer quelques théories permettant à nous d'étudier les mélanges ternaires (Tableau 2.2) :

Tableau 2.2: Fraction volumique de mélange ternaire.

Dénomination de ces Fraction volumique	P1	P2	P3	P4	P5	P6	P7	P8
Fraction volumique de l'inclusion (%)								
Inclusion 1 (graphite naturel)	0	2	4	6	8	10	12	14
Inclusion 2 (oxyde de zinc)	0	2	4	6	8	10	12	14

II.4.2.1 Loi de Wiener

Wiener a proposé un modèle de description de la permittivité effective d'un composite à n constituants, donné par :

$$\varepsilon_{\text{eff}}^{\alpha} = \sum_{i=1}^n q_i \varepsilon_i^{\alpha} \quad (2.6)$$

On remarque l'introduction d'un paramètre noté α , appelé facteur de forme ou facteur de dépolarisation. Ce paramètre est compris entre -1 et $+1$.

Deux cas limites se présentent :

$\alpha = -1$: Dans ce cas, le modèle décrit la constante diélectrique d'un composite formé par n couches disposées en série entre deux armatures planes d'un condensateur (Figure 2.10. a). C'est le modèle indirect de Wiener.

$\alpha = 1$: Dans ce cas, le modèle décrit la constante diélectrique d'un composite formé par n couches disposées en parallèle entre deux armatures planes d'un condensateur (Figure 2.10. b). C'est le modèle direct de Wiener [83].

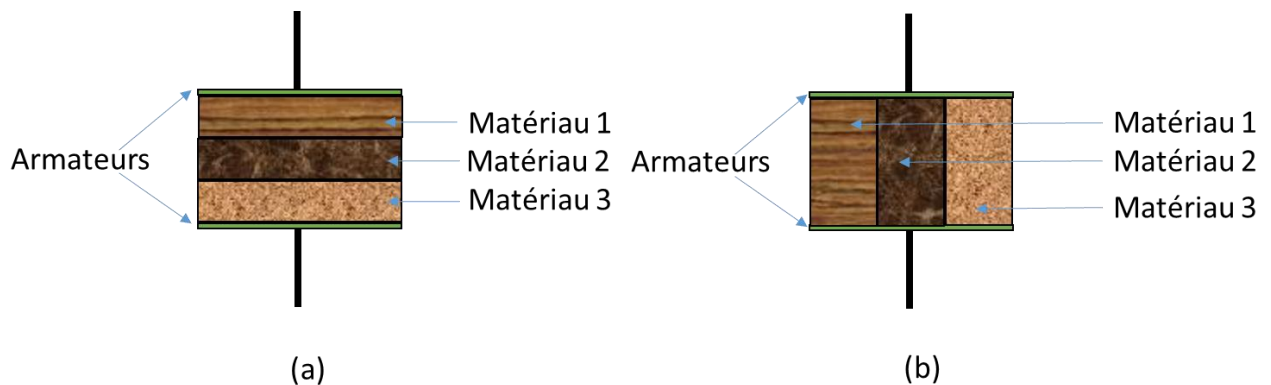


Figure 2.10: Schématisation des cas extrêmes du modèle de Wiener pour un composite ternaire [84].

Les variations de la permittivité effective d'un mélange diélectrique composite ternaire sont représentées dans la figure (2.11).

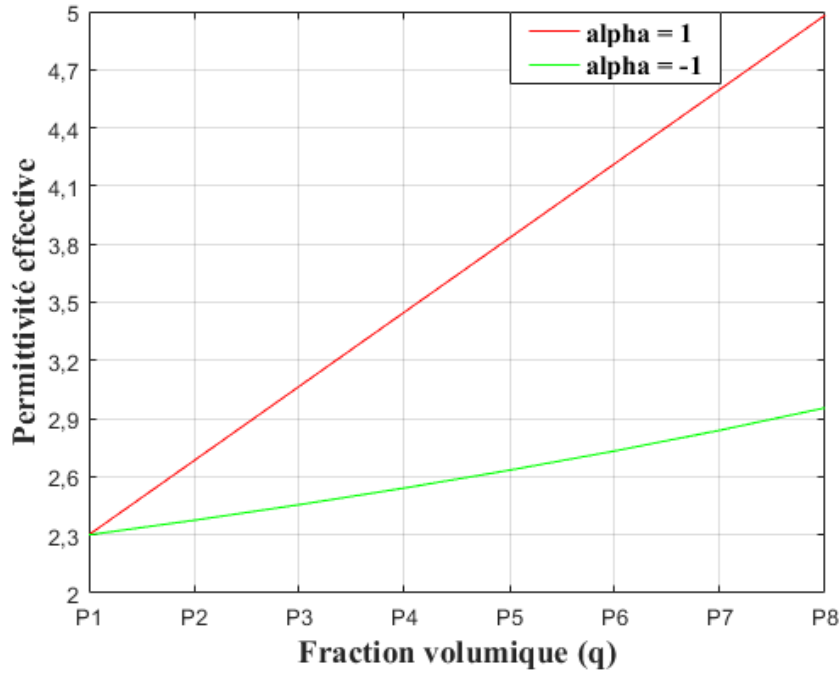


Figure 2.11: Permittivité effective d'un mélange diélectrique composite ternaire (polyéthylène réticulé chimiquement – graphite naturel – oxyde de zinc).

II.4.2.2 Modèle de Lichtenecker-Rother

Lichtenecker et Rother ont proposé un modèle mathématique pour la détermination de la constante diélectrique d'un mélange composé de n constituants. À partir de la forme générale de Wiener, Lichtenecker a établi sa loi logarithmique donnée par l'expression :

$$\ln(\epsilon_{\text{eff}}) = \sum_{i=1}^n q_i \ln(\epsilon_i) \quad (2.7)$$

Ce modèle a prouvé sa validité dans plusieurs travaux et pour divers types de matériaux. Si l'on part de la formule pour deux constituants (équation 2.3), Où ϵ_{eff} représente la permittivité effective du mélange, on peut donc considérer ce nouveau mélange comme un seul matériau caractérisé par ϵ_{eff} . Si on ajoute à celui-ci un autre constituant ayant une permittivité ϵ_3 , la loi binaire de Lichtenecker reste valable, et on écrit alors (Figure .12) :

$$\ln(\epsilon_m) = V_f \cdot \ln(\epsilon_{\text{eff}}) + V_{f3} \cdot \ln(\epsilon_3) \quad (2.8)$$

Où ϵ_m représente la permittivité effective du nouveau matériau.

Puisque :

$$\ln(\epsilon_{\text{eff}}) = V_{f1} \cdot \ln(\epsilon_1) + V_{f2} \cdot \ln(\epsilon_2) \quad (2.9)$$

On peut développer

$$\ln(\epsilon_m) = V_f \cdot (V_{f1} \cdot \ln(\epsilon_1) + V_{f2} \cdot \ln(\epsilon_2)) + V_{f3} \cdot \ln(\epsilon_3) \quad (2.10)$$

Avec toujours : $V_{f1} + V_{f2} = 1$ et $V_f + V_{f3}$

On aura enfin :

$$\ln(\varepsilon_m) = q_1 \cdot \ln(\varepsilon_1) + q_2 \cdot \ln(\varepsilon_2) + q_3 \cdot \ln(\varepsilon_3) \quad (2.11)$$

Où $q_1 = V_f \cdot V_{f1}$, $q_2 = V_f \cdot V_{f2}$, $q_3 = V_{f3}$

Cette formule exprime la permittivité du mélange ternaire à partir des paramètres de chacun de ses constituants [83].

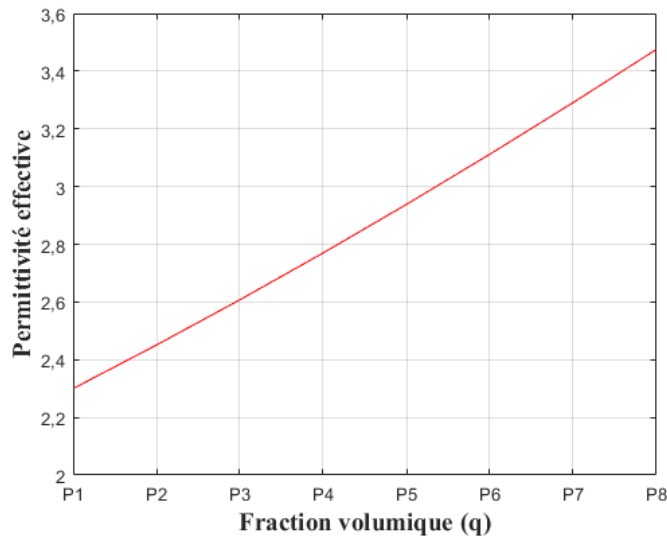


Figure 2.12: Permittivité effective d'un mélange diélectrique composite ternaire (polyéthylène réticulé chimiquement – graphite naturel – oxyde de zinc).

II.4.2.3 Modèle de Looyenga

Le modèle proposé est composé de trois constitutions différentes. L'un de ces constitutions est considéré comme une matrice ayant une constante diélectrique égale à ε_1 , tandis que les deux autres constituants (inclusions 1 et inclusions 2) possèdent des permittivités ε_2 et ε_3 , et ont des porosités P_1 et P_2 , respectivement (Figures 2.13 – 2.14).

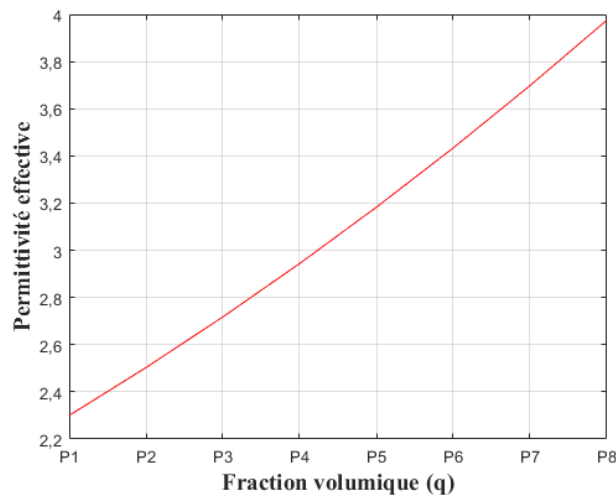


Figure 2.13: Permittivité effective d'un mélange diélectrique composite ternaire (polyéthylène réticulé chimiquement – graphite naturel – oxyde de zinc).

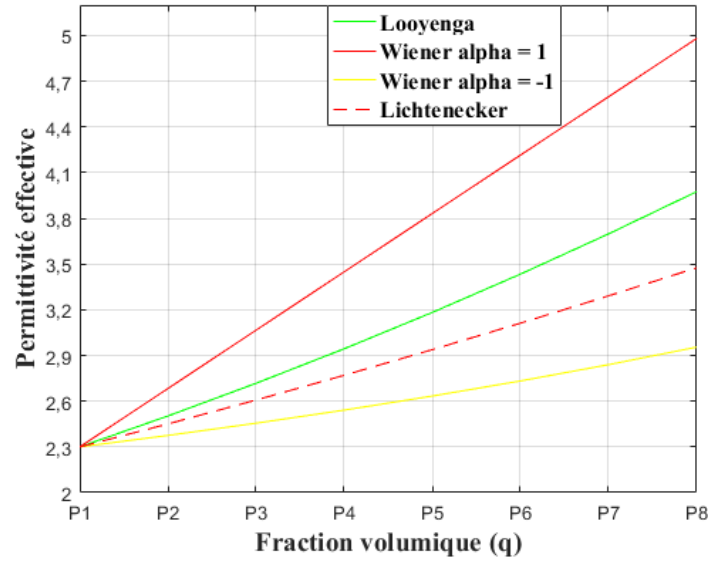


Figure 2.14: Permittivité effective d'un mélange diélectrique composite ternaire (polyéthylène réticulé chimiquement – graphite naturel – oxyde de zinc).

Pour calculer la permittivité relative d'un mélange ternaire, nous considérons qu'au départ, toutes les inclusions de permittivité ε_3 sont séparées de la composition globale. Les compositions restantes (matrice + inclusions 1) vont constituer un mélange primaire, possédant une constante diélectrique ε' , calculée en utilisant la loi de mélange habituelle pour deux compositions (Looyenga). Les inclusions séparées, ayant une permittivité ε_3 (inclusions 2), seront ensuite ajoutées à ce mélange primaire, menant à une nouvelle composition ayant une permittivité relative résultante ε .

$$\varepsilon' = \left[\left(\varepsilon_1^{\frac{1}{3}} + P_1' (\varepsilon_2^{\frac{1}{3}} - \varepsilon_1^{\frac{1}{3}}) \right)^3 \right] \quad (2.12)$$

Dans cette relation, le terme P_1' est égal à P_1 dans le cas de deux compositions et détermine la porosité des inclusions 1. Comme nous sommes en présence de trois compositions, la fraction volumique de la matrice est égale à $1 - P_1 - P_2$. Pour contourner cet obstacle, nous proposons de réaliser une transformation qui permet le passage d'un milieu à deux phases à un milieu à trois phases, ce qui nous permettrons d'utiliser la relation de la loi de mélange. Cette transformation, appelée « Transformation de l'Echelle de Porosité : TEP », repose sur l'utilisation de la fraction volumique P_1' . La nouvelle porosité P_1' dépend de la concentration de la porosité P_1 et la porosité P_2 qui s'écrit alors :

$$P_1' = P_1 / (1 - P_2) \quad (2.13)$$

Après le calcul de la permittivité relative du mélange primaire en appliquant la transformation de

l'échelle de porosité, le deuxième type des inclusions possédant une porosité P_2 , sera ajouté au mélange. La constante diélectrique du mélange est donnée par [84] :

$$\varepsilon_{\text{eff}} = \left[\left(\varepsilon_3^{\frac{1}{3}} + P_2 (\varepsilon_3^{\frac{1}{3}} - \varepsilon_1^{\frac{1}{3}}) \right)^3 \right] \quad (2.14)$$

Les valeurs des permittivités effectives estimées pour un mélange de trois phases, constitué d'une matrice en polyéthylène réticulé chimiquement dont sa permittivité diélectrique est 2,3 et deux inclusions, l'un est le graphite naturel qui possède une permittivité diélectrique 15 et l'autre est l'oxyde de zinc dont sa permittivité diélectrique est 8,75 (Figures 2.11– 2.14) en utilisant les lois de mélange : wiener, Lichtenecker-Rother et Looyenga.

Les fractions volumiques des inclusions sont identiques et inférieure à 28 %, nous remarquons que la permittivité du mélange commence à une valeur égale à celle de la matrice ($\varepsilon_1 = 2,3$) à 0 % de porosité, et accroît en fonction de la fraction volumique jusqu'à atteindre 28 % de porosité des inclusions.

II.5 Modélisation du câble électrique triphasé haute tension

La figure (2.15) présente le câble électrique triphasé haute tension à isolation PRC et armure en fil d'acier Cu/ PRC/SWA/PVC 33 kV, $3 \times 70 \text{ mm}^2$ [57, 85].

En raison de son très faible facteur de perte diélectrique, qui reste constant pendant toute sa durée de vie, et en raison de l'excellente des propriétés du matériau d'isolation PRC, solidement épissé longitudinalement avec un écran intérieur et extérieur en matériau semi-conducteur, le câble a une haute fiabilité de fonctionnement. Il est utilisé dans les postes de transformation, les blocs de commutation, dans les centrales électriques et les installations industrielles [85].



Figure 2.15: Câble électrique triphasé haute tension à isolation PRC et armure en fil d'acier [57, 85].

La figure (2.16) montre une géométrie de modèle 2D correspondant à l'étude de cas de simulation. Elle représente la section transversale de câble électrique triphasé haute tension étudiée.

Les grandeurs géométriques et certains paramètres physiques des matériaux du câble nécessaire à la définition du milieu et du sous-domaine sont résumés dans les tableaux (2.3, 2.4), respectivement.

Tableau 2.3: Spécification technique du câble souterrain haute tension 33 kV [57, 85].

Paramètre	Values [mm]
Diamètre du conducteur	9,43
Épaisseur de l'écran conducteur	0,3
Épaisseur nominale de l'isolation (PRC)	8
Épaisseur de l'écran isolant	0,3
Épaisseur de la gaine intérieure	1,8
Diamètre du fil d'armure	3,15
Épaisseur nominale de la gaine extérieure en PVC	3,6
Diamètre global approximatif du câble	84

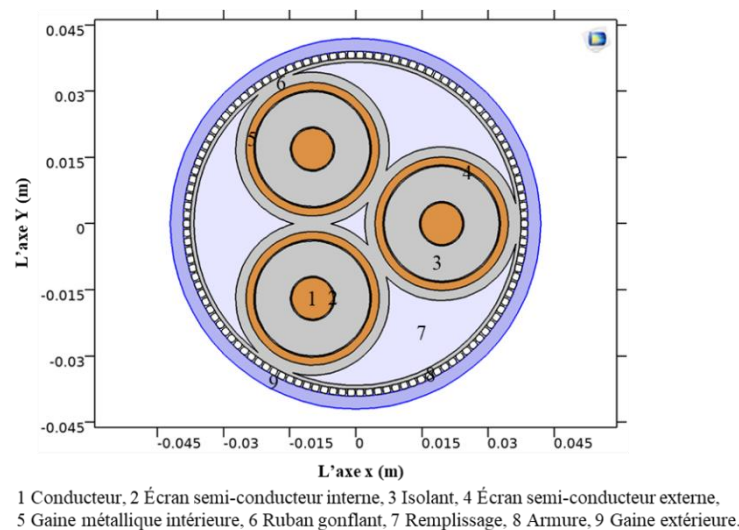


Figure 2.16: Géométrie du modèle 2D de la section transversale de câble HT [57].

Dans le logiciel Comsol Multiphysics, un modèle 2D est mis en œuvre. Il est basé sur la méthode des éléments finis (FEM) qui transforme le modèle conçu en un maillage de nombreux éléments. Elle est utilisée pour calculer les valeurs de chaque point du modèle pour obtenir des résultats précis. Le logiciel est composé de nombreux modules. Dans le présent travail, nous avons utilisé le module AC / DC en lui ajoutant la subdivision électrostatique pour déterminer les distributions de potentiel et les distributions de champ électrique dans le câble.

Tableau 2.4: Les caractéristiques électriques des matériaux utilisés pour le câble PRC 33 kV [40, 57, 85 – 88, 90, 91].

Composants	Matériau	Permittivité relative	Conductivité électrique [S/m]	Résistivité électrique [Ωm]
Conducteur	Cuivre	1	$5,96 \times 10^7$	$1,677 \times 10^{-8}$
Couches semi-conductrices	Silicium	11,9	$4,347 \times 10^{-4}$	$2,3 \times 10^3$
Isolation	PRC	2,3	10^{-18}	10^{18}
Gaine métallique intérieure	Cuivre	1	$5,96 \times 10^7$	$1,677 \times 10^{-8}$
Remplissage, ruban gonflant	EPR	2,35	10^{-15}	10^{15}
Fil de cuivre d'armure	Fil d'acier galvanisé	1	$6,2 \times 10^6$	$1,61 \times 10^{-7}$
Gaine métallique extérieure	PVC	3	10^{-15}	10^{15}

La détermination du champ électrique E est basée sur le potentiel scalaire V [92] :

$$E = -\nabla V \quad (2.15)$$

Le déplacement électrique D est lié au champ électrique E par la formule (2.16) suivante :

$$D = \varepsilon_0 \varepsilon_r E \quad (2.16)$$

Où ε_r est la permittivité relative du milieu isolant et ε_0 est la permittivité de l'espace libre.

Pour obtenir la relation entre le déplacement électrique D et la densité de charge libre ρ , on utilise la loi de Gauss :

$$\nabla \cdot D = \rho \quad (2.17)$$

Puisque le problème est bidimensionnel, alors l'équation de Poisson en termes de potentiel électrique scalaire est donnée par :

$$\frac{\partial^2 V}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 V}{\partial y^2} = -\frac{\rho}{\varepsilon} \quad (2.18)$$

Le système est triphasé équilibré de fréquence $f = 50$ Hz. Donc, les tensions des phases sont données par les expressions suivantes :

$$V_1 = V_0 \quad (2.19)$$

$$V_2 = V_0 \cdot e^{-\frac{j2\pi}{3}} \quad (2.20)$$

$$V_3 = V_0 \cdot e^{+\frac{j2\pi}{3}} \quad (2.21)$$

Pour ce travail, la valeur efficace de la tension de ligne est de 33 kV, donc $V_0 = 33/\sqrt{3}$ kV.

La permittivité effective d'un mélange diélectrique binaire est déterminée à l'aide de modèle de Bruggeman, l'hypothèse de l'existence du matériau hôte explicite n'est plus supposée. Au lieu de

cela, les particules de chaque composant de matériel unique sont supposées être incorporées dans un milieu efficace dont la permittivité est égale à la permittivité du mélange ε_{eff} que nous essayons de trouver [76, 77]. Ainsi, elle doit être déterminée à partir de la relation (2.2).

Une forme générale de l'équation de Böttcher pour un système multi-phases, est donnée par [93]:

$$\sum_{i=1}^n q_i \frac{\varepsilon_i - \varepsilon_{\text{eff}}}{\varepsilon_i + 2\varepsilon_{\text{eff}}} = 0 \quad (2.22)$$

Avec :

ε_{eff} : représente la constante diélectrique du mélange ;

ε_1 : représente la constante diélectrique de la matrice ;

$\varepsilon_{i,n}$: représente la constante diélectrique du $i^{\text{ème}}$ constituant ;

$q_{i,n}$: représente la fraction volumique des inclusions de du $i^{\text{ème}}$ constituant.

II.6 Résultats et discussion

Les matériaux composites permettent d'améliorer les performances des câbles électriques. Ils apportent de nombreux avantages, tels que la minimisation des défauts microscopiques, la faible perte diélectrique et durée de vie sera considérables.

Les tableaux (2.5, 2.6) présentent les permittivités diélectriques calculer des différent couches du câble en fonction de la concentration des matériaux additifs individuelles et multiples.

Tableau 2.5: Les permittivités diélectriques des différent couches du câble en fonction de la concentration des matériaux additifs individuelles.

Matériaux Concentration	Semi-conducteur Si		Isolant PRC		Ecran commun EPR		Gaine extérieure PVC	
Matériaux additif	C	Ge	C	ZnO	C	ZnO	C	ZnO
0 %	11,9		2,3		2,35		3	
2,5 %	11,971	11,992	2,4160	2,3853	2,4674	2,4358	3,1326	3,0892
5 %	12,043	12,085	2,5410	2,4748	2,5937	2,5256	3,2735	3,1816
7,5 %	12,115	12,178	2,6757	2,5684	2,7297	2,6196	3,4231	3,2770
10 %	12,188	12,272	2,8206	2,6664	2,8759	2,7178	3,5818	3,3756
12,5 %	12,261	12,367	2,9765	2,7687	3,0329	2,8203	3,7500	3,4774
15 %	12,334	12,462	3,1441	2,8756	3,2015	2,9272	3,9280	3,5824
17,5 %	12,407	12,557	3,3237	2,9869	3,3820	3,0385	4,1146	3,6907
20 %	12,481	12,654	3,5161	3,1029	3,5750	3,1543	4,3147	3,8021
22,5 %	12,555	12,750	3,7215	3,2235	3,7809	3,2746	4,5237	3,9167
25 %	12,629	12,847	3,9403	3,3487	4	3,3994	4,7434	4,0345
27,5 %	12,704	12,945	4,1727	3,4784	4,2324	3,5286	4,9737	4,1554
30 %	12,779	13,044	4,4188	3,6127	4,4782	3,6631	5,2147	4,2795

Tableau 2.6: Les permittivités diélectriques des différent couches du câble en fonction de la concentration des matériaux aditifs multiples.

Matériaux Concentration	Semi-conducteur Si		Isolant PRC		Ecran commun EPR		Gaine extérieure PVC	
	Ge	C	C	ZnO	C	ZnO	C	ZnO
0 %	11,9		2,3		2,35		3	
2,5 %, 2,5 %	12,064		2,507		2,559		3,227	
5 %, 5 %	12,23		2,741		2,795		3,476	
7,5 %, 7,5 %	12,398		3,004		3,058		3,748	
10 %, 10 %	12,567		3,298		3,353		4,045	
12,5 %, 12,5 %	12,738		3,623		3,679		4,366	
15 %, 15 %	12,911		3,983		4,037		4,713	

Où :

C : Graphite naturel qui possède une constante diélectrique entre 12 - 15 [62] ;

Ge : Germanium qui possède une constante diélectrique égale à 16 [88] ;

ZnO : oxyde de zinc de permittivité diélectrique égale à 8,75 [69].

Pour obtenir des résultats précis grâce à l'analyse par éléments finis, les régions critiques sont subdivisées en petites régions appelées éléments, ce que l'on appelle le maillage, comme le montre la figure (2.17).

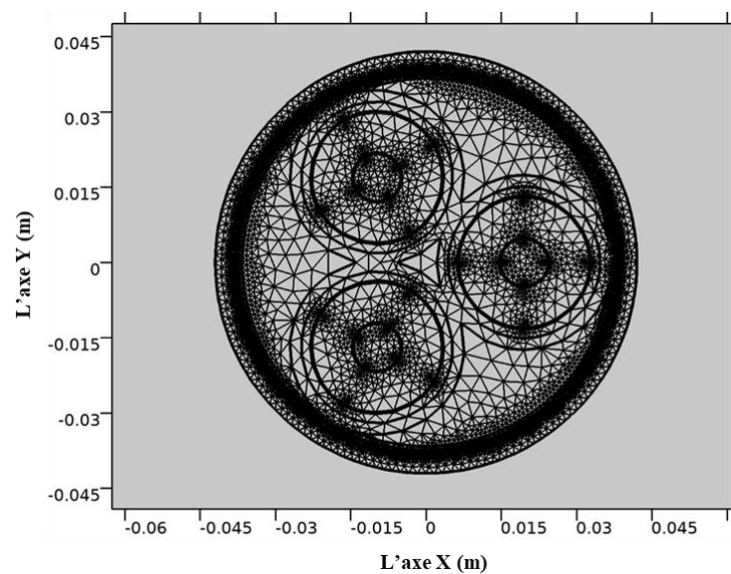


Figure 2.17: Modèle géométrique de maillage d'un câble souterrain triphasé à haute tension à isolation PRC et armure en fil d'acier.

Nous avons utilisé pour ce travail, un maillage régulier de type triangulaire. Chaque élément contient trois nœuds. Nous constatons que la taille de l'élément est équivalente à la concentration du champ électrique dans ce domaine.

II.6.1 Distribution du potentiel électrique

Le modèle de simulation de la distribution du potentiel électrique est présenté dans la figure (2.18).

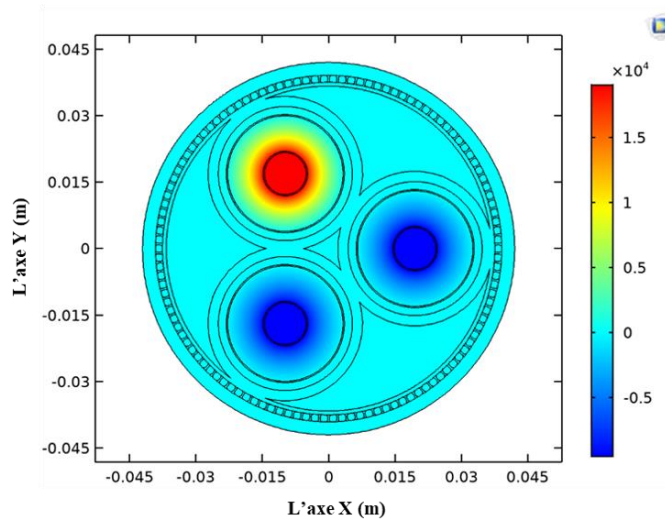


Figure 2.18: Distribution du potentiel électrique dans un modèle de câble souterrain triphasé à haute tension à isolation PRC.

La figure (2.18) montre la distribution du potentiel électrique pour le modèle de câble souterrain en tenant compte des variations de l'angle de phase du potentiel électrique. La distribution du potentiel électrique est plus élevée et constante à l'intérieur de conducteur, et diminue en fonction du rayon autour des différentes couches du câble. Elle est faible à l'extrémité du câble.

II.6.2 Distribution du champ électrique

Le modèle de simulation de la distribution du champ électrique est illustré à la figure (2.19).

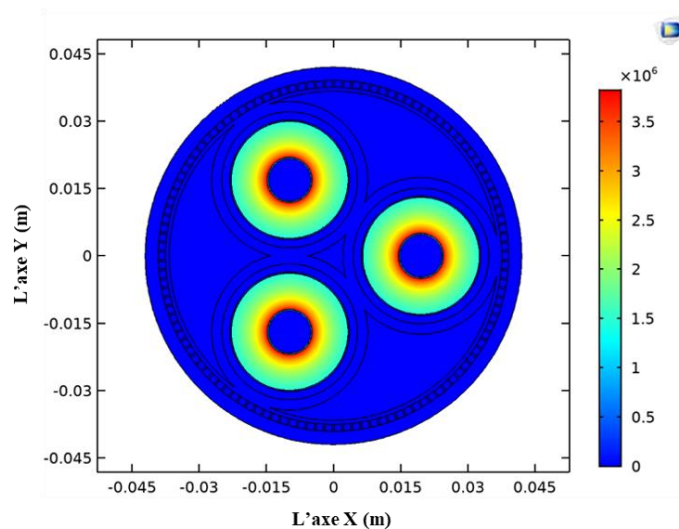


Figure 2.19: Distribution du champ électrique dans un modèle de câble souterrain triphasé à haute tension à isolation PRC.

Nous observons la symétrie de rotation du champ électrique autour des trois conducteurs, en raison de la symétrie du câble. Le champ électrique à l'intérieur du conducteur est nul, tandis que la distribution de l'intensité du champ électrique à proximité de conducteur est élevée, atteint sa valeur maximale et diminue à l'extrémité du câble. Elle diminue en fonction du rayon du câble.

II.6.2.1 L'effet des matériaux additifs dans la couche semi-conductrice interne

Dans le but d'étudier l'impact des matériaux additive dans la couche semi-conductrice interne sur le comportement de champ électrique dans le câble, les figures (2.20 – 2.22) illustrent le comportement du champ électrique à l'intérieur des câbles souterrains à haute tension en ajoutant des matériaux additifs avec plusieurs concentrations dont la variante est la couche semi-conductrice interne de silicium (Si) pur et composites de germanium (Ge), graphite naturel (C) et multiple, respectivement.

Les figures (2.23, 2.24) illustrent l'intensité de champ électrique maximum dans la couche semi-conducteur interne et la couche isolante, respectivement, en fonction de concentration de matériaux additifs.

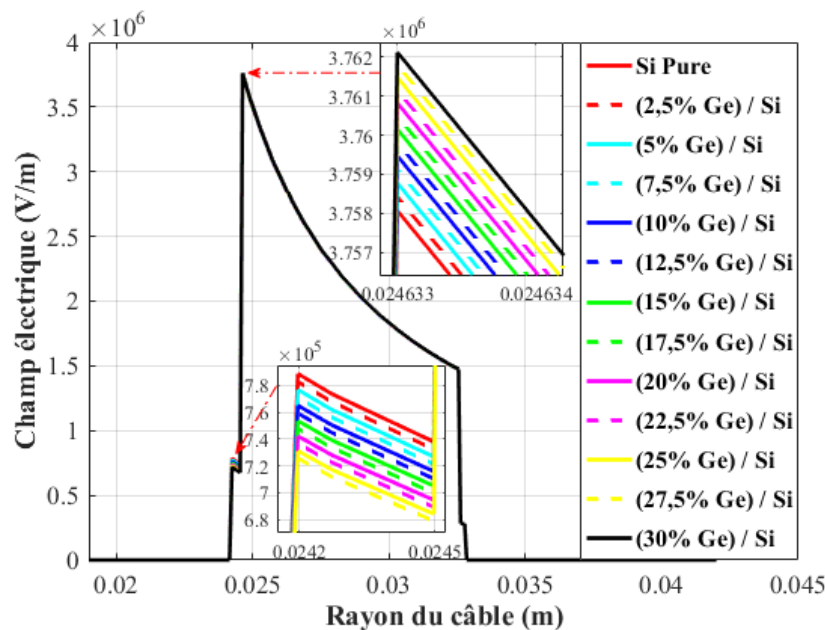


Figure 2.20: Effet de germanium dans la couche semi-conducteur interne sur le comportement de champ électrique dans le câble.

Les résultats de cette section, illustrent l'impact des matériaux additifs individuels et multiples dans les différentes couches diélectriques du câble souterrain à haute tension sur le comportement de la distribution du champ électrique avec plusieurs concentrations.

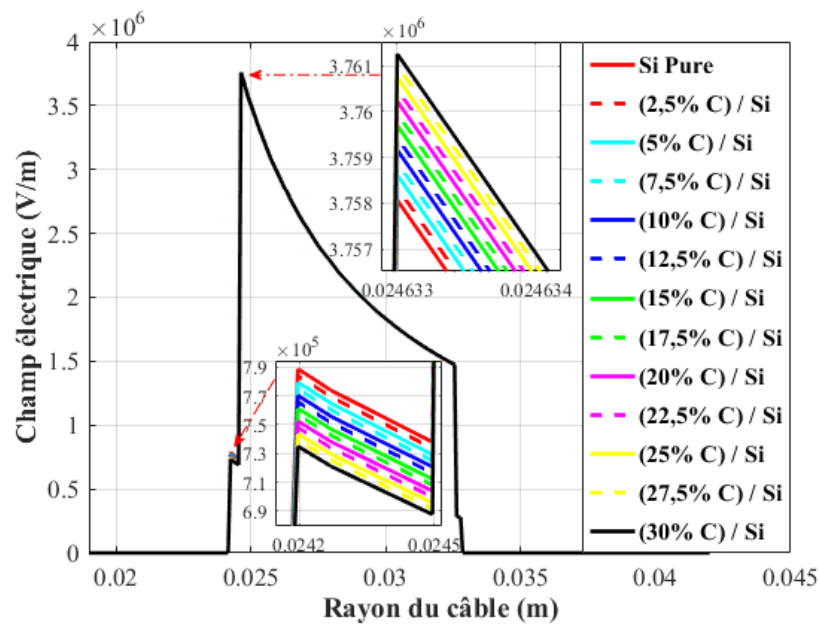


Figure 2.21: Effet de graphite dans la couche semi-conducteur interne sur le comportement de champ électrique dans le câble.

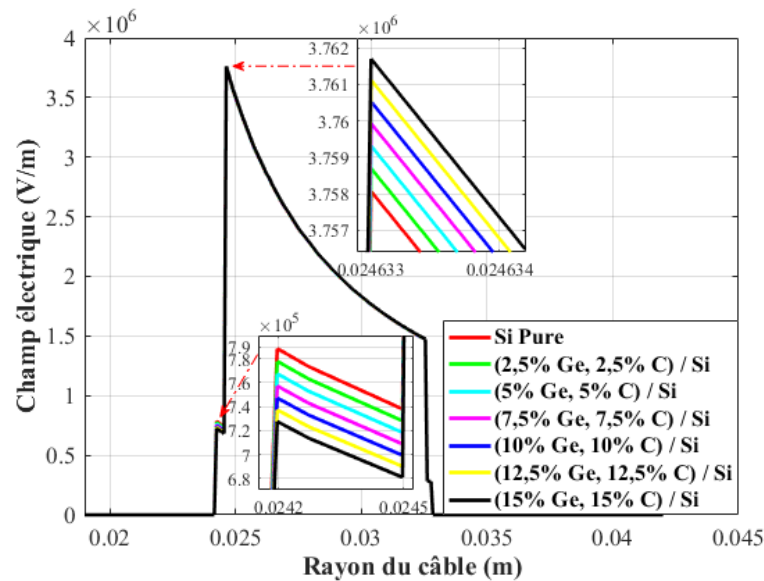


Figure 2.22: Effet de germanium et de graphite dans la couche semi-conducteur interne sur le comportement de champ électrique dans le câble.

Nous constatons que ces nouveaux semi conducteurs sont des matériaux prometteurs. Ils sont envisagés comme isolants. Ce résultat peut ouvrir un nouveau champ de recherche dans la conception et l'optimisation de plastique aux propriétés électriques avancées pour le transport et de stockage de l'énergie.

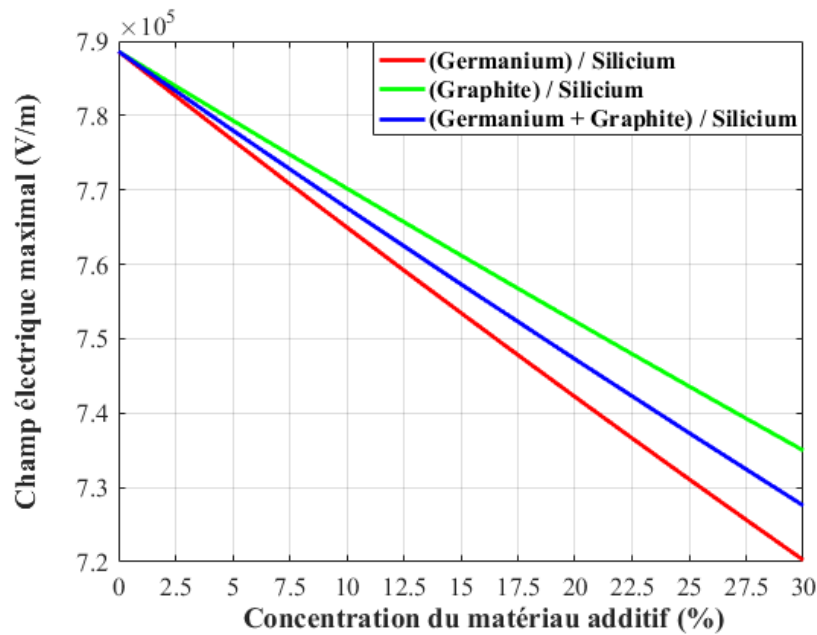


Figure 2.23: L'intensité de champ électrique maximale dans la couche semi-conducteur interne en fonction de concentration de matériaux additifs.

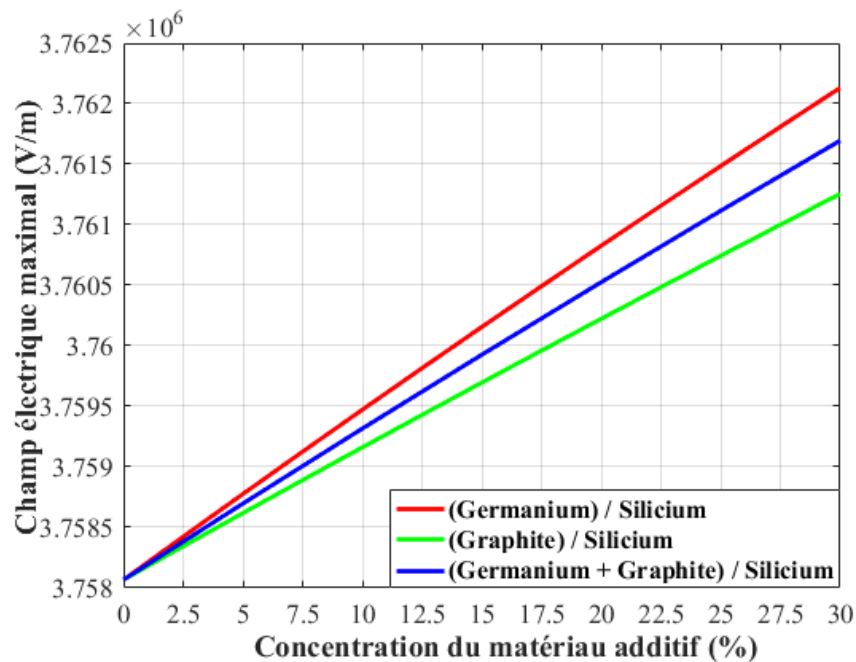


Figure 2.24: L'intensité de champ électrique maximale dans la couche isolante en fonction de concentration de matériaux additifs.

Dans la zone correspondante au semi-conducteur interne ($x : 0,0242 - 0,0245$ m, $y : 0 - 0,042$ m), on observe que la distribution de champ électrique diminue avec l'augmentation de la concentration du matériau additif individuelles et multiples, sachant que l'intensité de champ électrique dans le cas de silicium pur atteint 788,616 kV/m dans cette zone. Elle diminue en

fonction de germanium, de graphite naturel et multiple ; elle atteint 720,249 kV/m (environ 8,67 %), 734,986 kV/m (environ 6,80 %), et 727,573 kV/m (environ 7,74 %), respectivement à 30 %, de la concentration de matériaux additifs. Par contre, dans la zone correspondante à la partie isolante du câble haute tension ($x : 0,0242 - 0,0325$ m, $y : 0 - 0,042$ m), où la distribution de champ électrique est maximale, on observe que la distribution de champ électrique augmente avec l'augmentation de la concentration du matériau additif individuelles et multiples, sachant que l'intensité de champ électrique dans le cas de silicium pur atteint 3758,066 kV/m dans cette zone. Elle augmente en fonction de germanium, de graphite naturel et multiple ; elle atteint 3762,130 kV/m (environ 0,108%), 3761,254 kV/m (environ 0,084 %), et 3761,695 kV/m (environ 0,096 %), respectivement à 30 % de la concentration de matériaux additif.

II.6.2.2 L'effet des matériaux additifs dans la couche isolante

Dans le but d'étudier l'impact des matériaux additive dans la couche isolante, les figures (2.25 – 2.27) illustrent le comportement de champ électrique à l'intérieur des câbles souterrains à haute tension en ajoutant des matériaux additifs avec plusieurs concentrations dont la variante est la couche isolante de polyéthylène réticulé (PRC) pur et composites de graphite naturel (C), oxyde de zinc (ZnO) et multiple, respectivement.

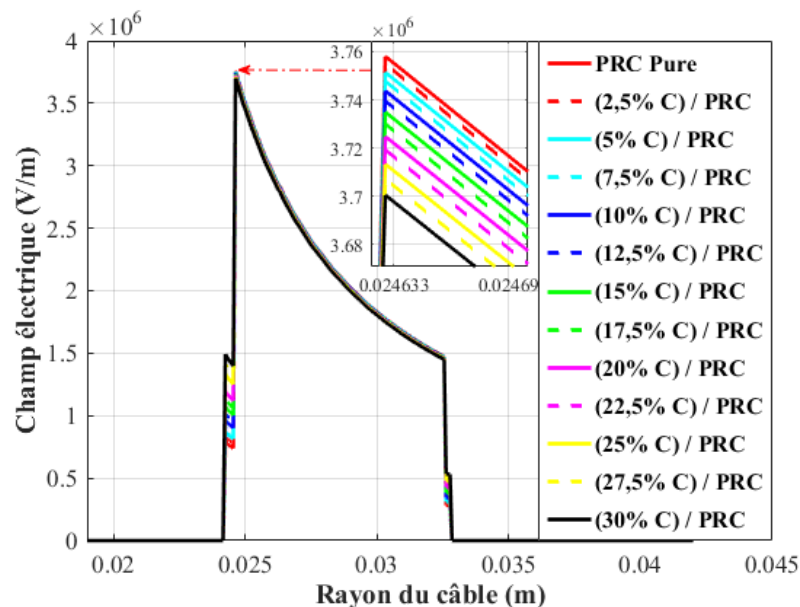


Figure 2.25: Effet de graphite dans la couche isolante sur le comportement de champ électrique dans le câble.

A l'heure actuelle, le matériau utilisé pour l'isolation des câbles en haute tension est principalement le polyéthylène réticuler chimiquement. Pour diminuer la conductivité de ce dernier, des additifs sont ajoutés dans le plastique. Ces additifs « piègent » les charges électriques

et réduisant leur mobilité, ce qui permet de réduire la conductivité électrique.

Notre contribution est un pas supplémentaire pour augmenter l'isolation des câbles électrique. La base de l'isolant est toujours le polyéthylène, mais en ajoutant une très petite quantité de polymère bien déterminée, il y' aura une modification dans les caractéristiques électrique, chimique et mécanique du câble. En réduisant la conductivité, on peut alors utiliser moins de plastique et donc alléger le câble.

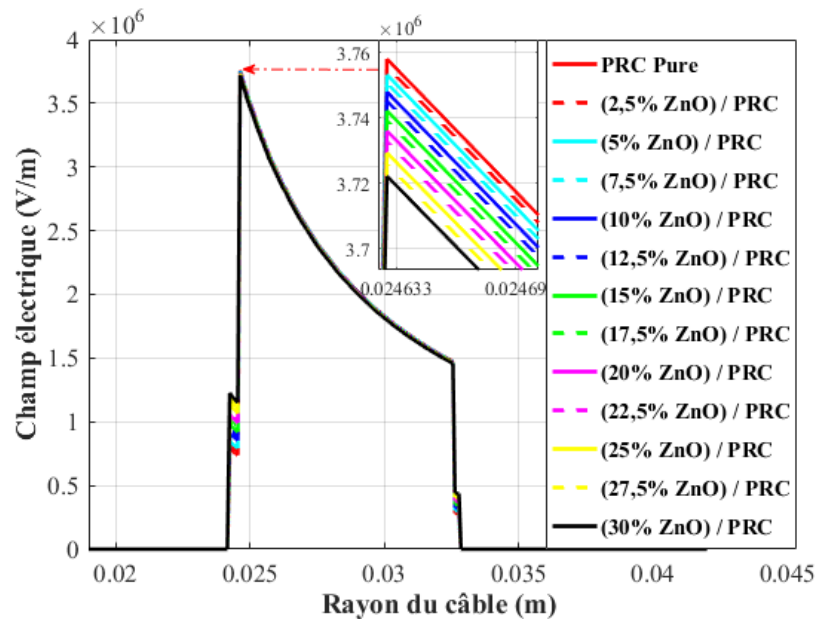


Figure 2.26: Effet d'oxyde de zinc dans la couche isolante sur le comportement de champ électrique dans le câble.

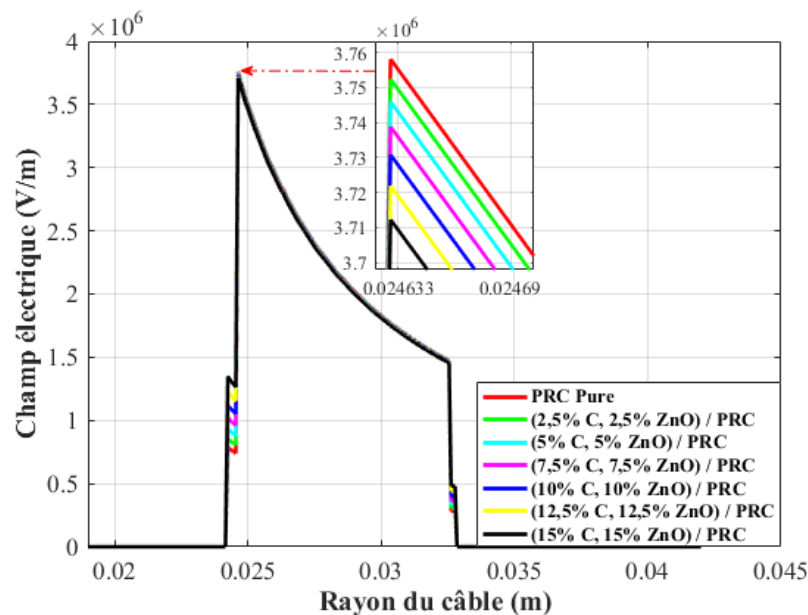


Figure 2.27: Effet de graphite et d'oxyde de zinc dans la couche isolante sur le comportement de champ électrique dans le câble.

La figure (2.28) illustre l'intensité de champ électrique maximale dans la couche isolante en fonction de la concentration de matériaux additifs.

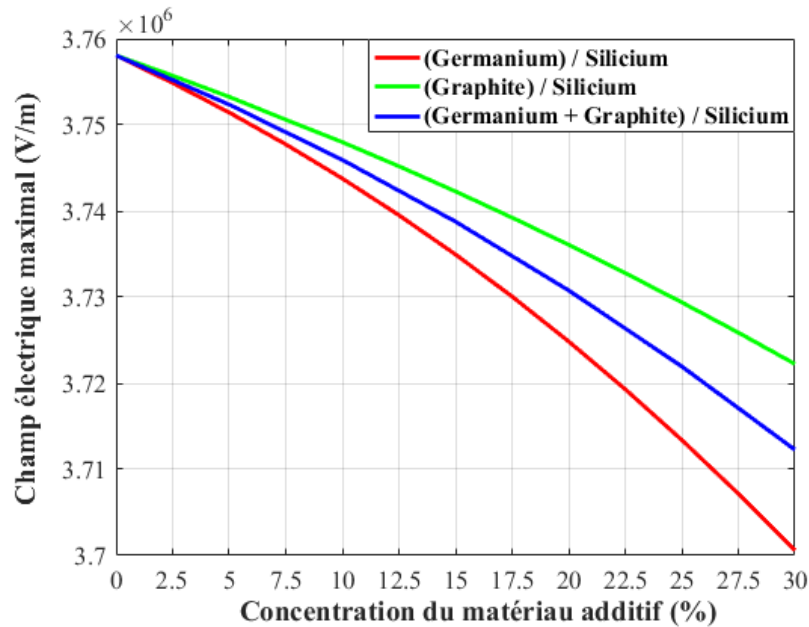


Figure 2.28: L'intensité de champ électrique maximale dans la couche isolante en fonction de concentration de matériaux additifs.

Dans la zone correspondante à la partie isolante de câble haute tension ($x : 0,0245 - 0,0325$ m, $y : 0 - 0,042$ m), où le de champ électrique est maximum, on observe que la distribution de champ électrique diminué avec l'augmentation de la concentration du matériau additif individuelles et multiples, sachant que l'intensité de champ électrique dans le cas de polyéthylène réticulé pur atteint 3758,066 kV/m. Elle diminue en fonction de graphite naturel, oxyde de zinc et multiple atteignant respectivement 3700,590 kV/m (environ 1,53 %), 3722,244 kV/m (environ 0,953 %) et 3712,276 kV/m (environ 1,218 %), respectivement à 30 % de la concentration de matériaux additif.

II.6.2.3 L'effet des matériaux additifs dans la couche semi-conductrice externe

Les figures (2.29 – 2.31) illustrent le comportement du champ électrique à l'intérieur des câbles souterrains à haute tension en ajoutant des matériaux additifs avec plusieurs concentrations dont la variante est la couche semi-conductrice externe de silicium (Si) pur et composites de germanium (Ge), graphite naturel (C) et multiple, respectivement. Les figures (2.32, 2.33) illustrent l'intensité de champ électrique maximale dans la couche semi-conducteur externe et la couche isolante en fonction de la concentration des matériaux additifs.

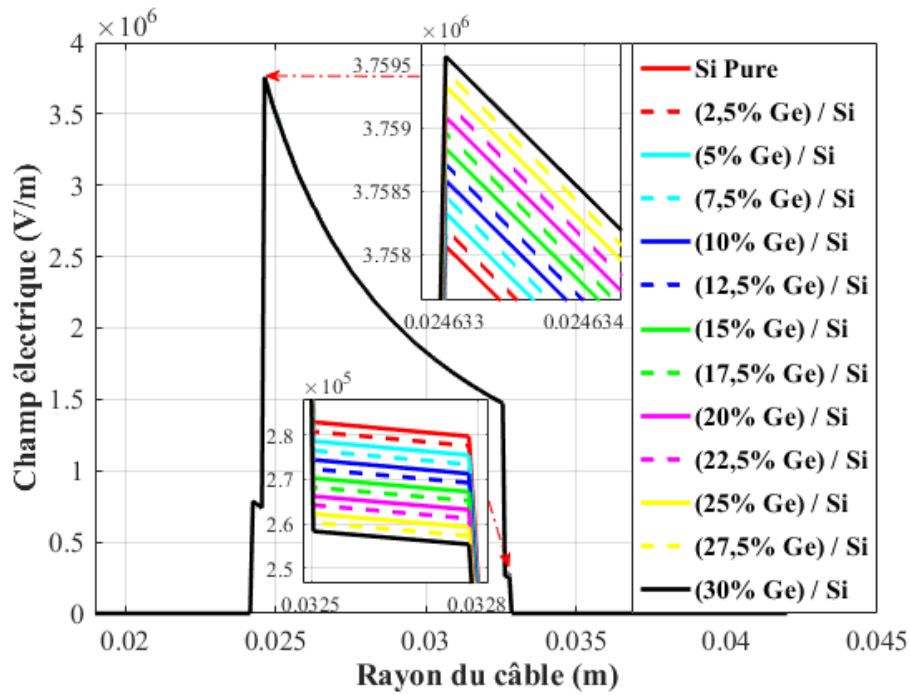


Figure 2.29: Effet de germanium dans la couche semi-conducteur externe sur le comportement de champ électrique dans le câble.

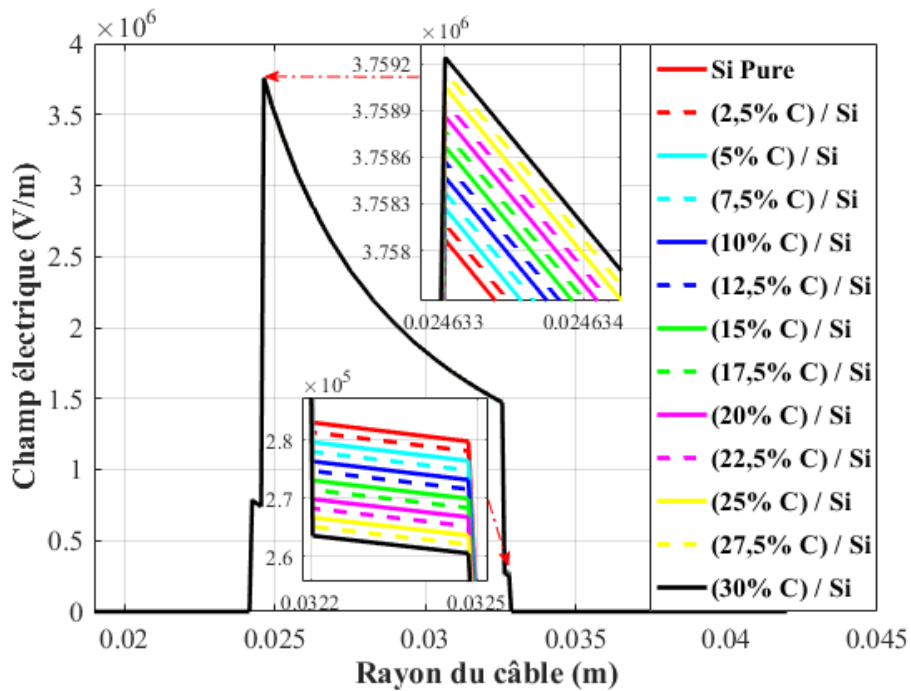


Figure 2.30: Effet de graphite dans la couche semi-conductrice externe sur le comportement de champ électrique dans le câble.

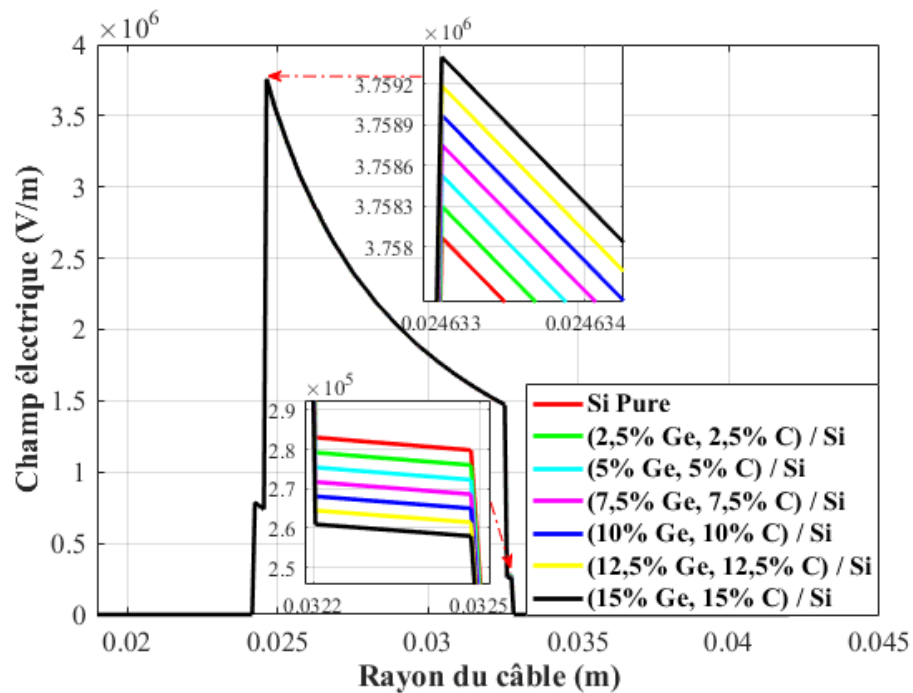


Figure 2.31: Effet de germanium et de graphite dans la couche semi-conductrice externe sur le comportement de champ électrique dans le câble.

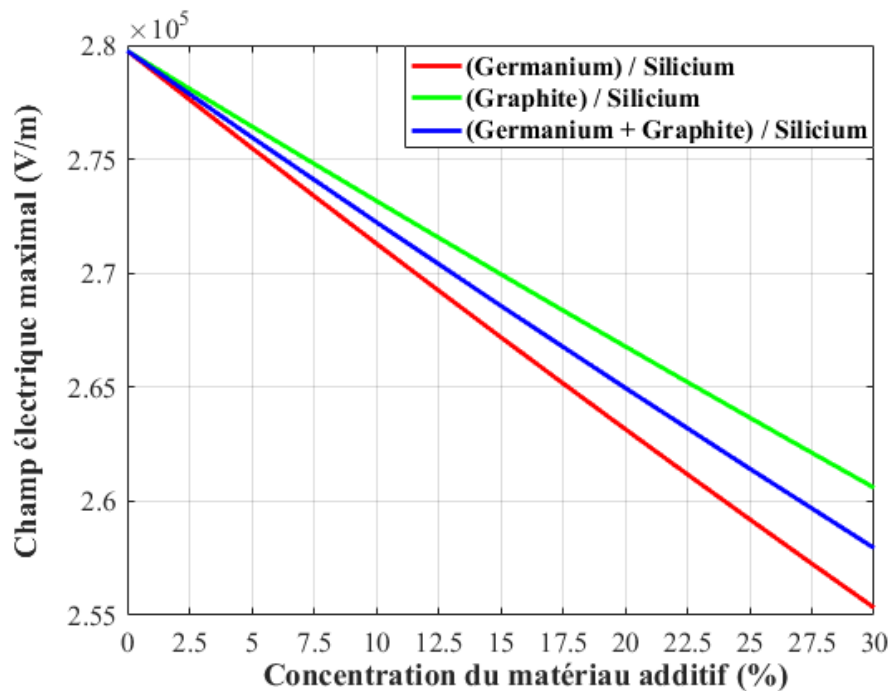


Figure 2.32: L'intensité de champ électrique maximum dans la couche semi-conductrice externe en fonction de concentration de matériaux additifs.

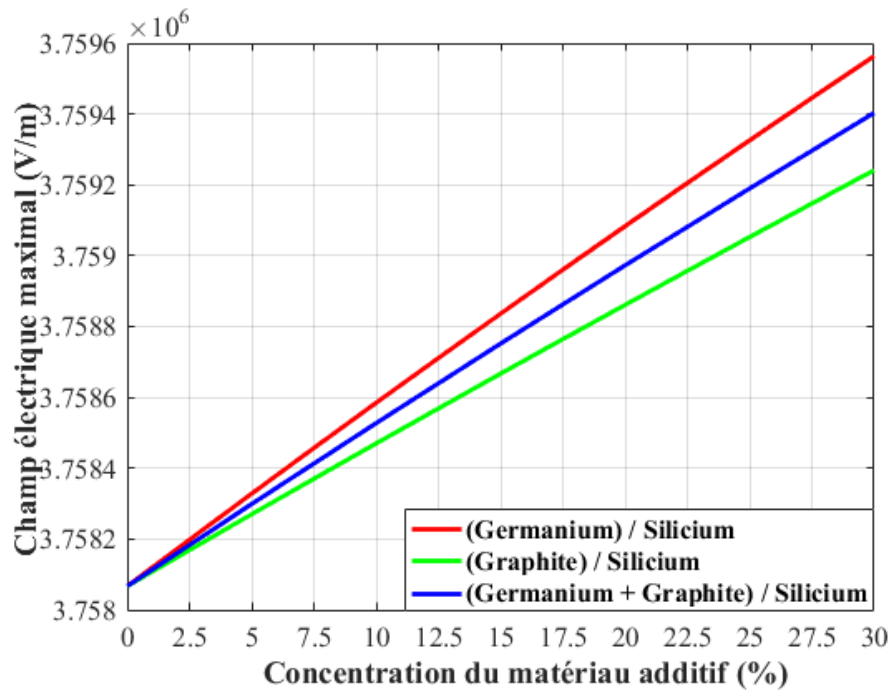


Figure 2.33: L'intensité du champ électrique maximale dans la couche isolante en fonction de concentration de matériaux additifs.

Dans la zone correspondante au semi-conducteur externe ($x : 0,0325 - 0,0328$ m, $y : 0 - 0,042$ m), on observe que la distribution du champ électrique diminue avec l'augmentation de la concentration du matériau additif individuel et multiple, sachant que l'intensité du champ électrique dans le cas de silicium pur atteint 279,755 kV/m dans cette zone. Elle diminue en fonction de germanium, de graphite naturel et multiple, atteignant respectivement 255,329 kV/m (environ 8,73 %), 260,591 kV/m (environ 6,85 %) et 257,944 kV/m (environ 7,79 %) à 30 % de concentration de matériaux additifs. Par contre, dans la zone correspondante à la partie isolante de câble haute tension ($x : 0,0245 - 0,0325$ m, $y : 0 - 0,042$ m), où la distribution de champ électrique est maximale, on observe que le champ électrique augmente avec l'augmentation de la concentration du matériau additif individuel et multiple, sachant que l'intensité de champ électrique dans le cas de silicium pur atteint 3758,066 kV/m dans cette zone. Elle augmente en fonction de germanium, de graphite naturel et multiple, atteignant respectivement 3759,563 kV/m (environ 0,039 %), 3759,245 kV/m (environ 0,031 %), et 3759,403 kV/m (environ 0,035 %) à 30 % de concentration de matériaux additifs.

II.6.2.4 L'effet des matériaux additifs dans l'écran commun et la gaine extérieure

Dans le but d'étudier l'impact des matériaux additifs dans la couche écran commun et dans la couche gaine extérieure sur le comportement de champ électrique dans le câble, les figures (2.34

– 2.36) illustrent les variations à l'intérieur des câbles souterrains à haute tension en ajoutant des matériaux additifs avec plusieurs concentrations dont la variante est l'écran commun de caoutchouc éthylène propylène (EPR) pur et composites de graphite naturel (C), oxyde de zinc (ZnO) et multiple, respectivement.

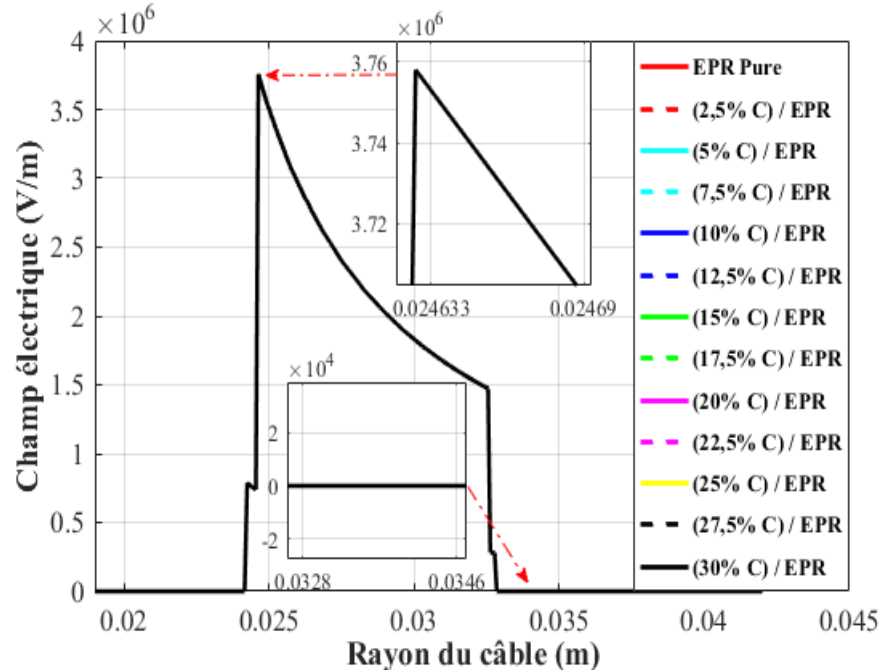


Figure 2.34: Effet de graphite dans la couche écran commun sur le comportement du champ électrique dans le câble.

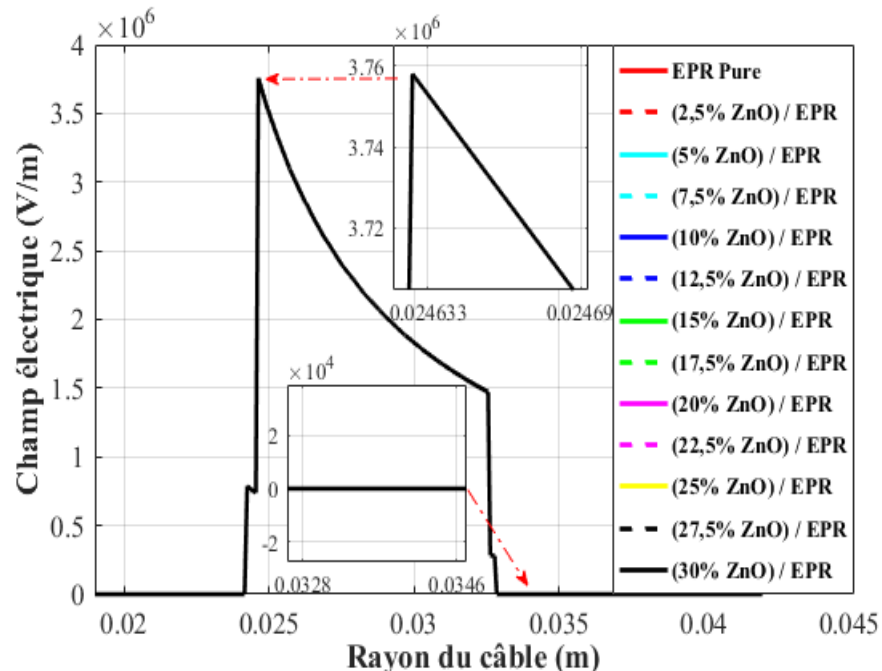


Figure 2.35: Effet d'oxyde de zinc dans la couche écran commun sur le comportement du champ électrique dans le câble.

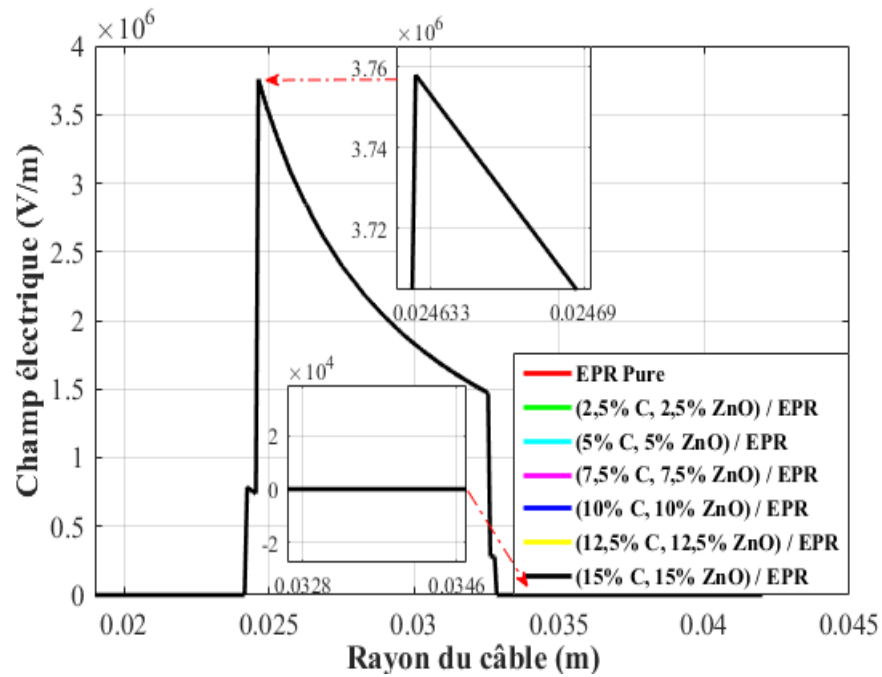


Figure 2.36: Effet de graphite et d'oxyde de zinc dans la couche écran commun sur le comportement du champ électrique dans le câble.

Les figures (2.37 – 2.39) illustrent le comportement de champ électrique à l'intérieur des câbles souterrains à haute tension en ajoutant des matériaux additifs avec plusieurs concentrations dont la variante est la gaine extérieure de polychlorure de vinyle (PVC) pur et composites de graphite naturel (C), oxyde de zinc (ZnO) et multiple, respectivement.

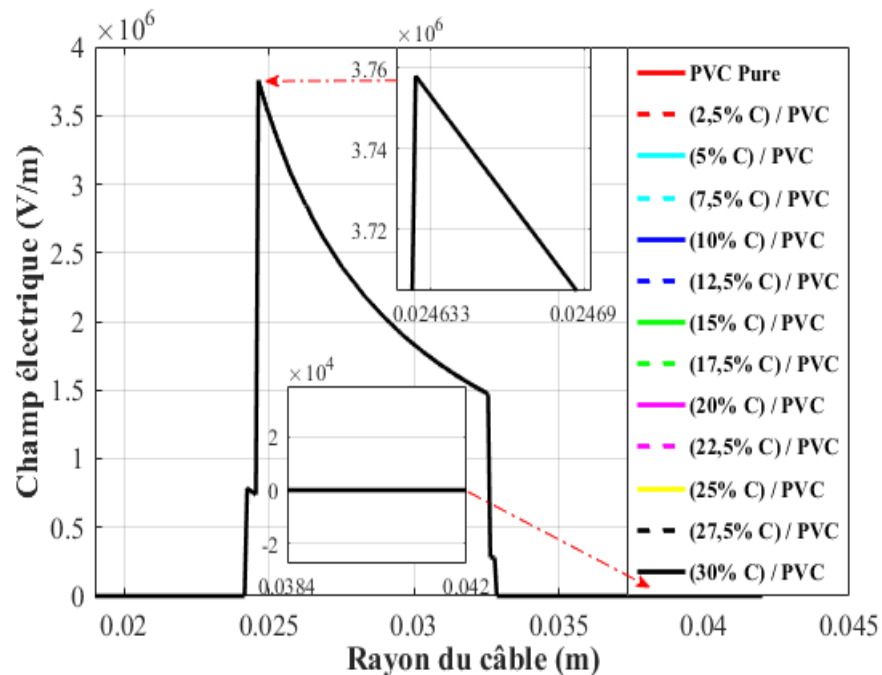


Figure 2.37: Effet de graphite dans la couche gaine extérieure sur le comportement du champ électrique dans le câble.

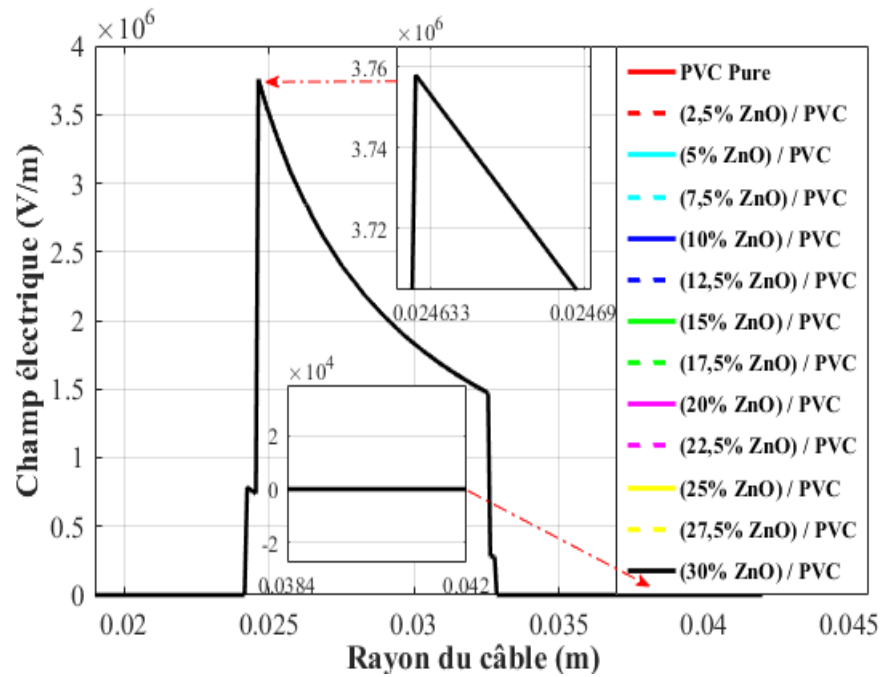


Figure 2.38: Effet d'oxyde de zinc dans la couche gaine extérieure sur le comportement de champ électrique dans le câble.

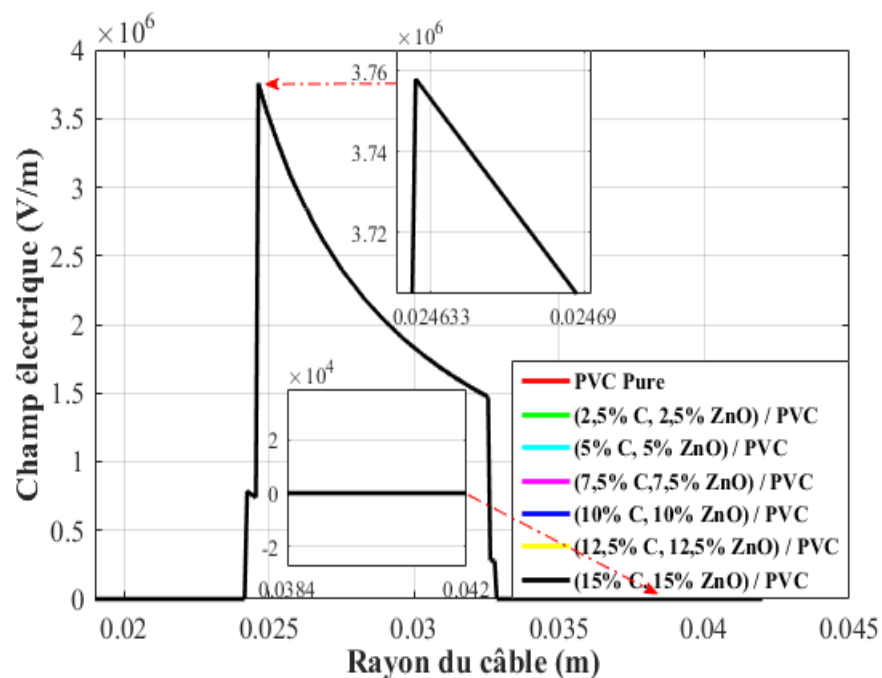


Figure 2.39: Effet de graphite et d'oxyde de zinc dans la couche gaine extérieure sur le comportement du champ électrique dans le câble.

D'après les figures (2.34 – 2.39), on remarque que l'augmentation de la concentration du matériau additif individuel et multiple n'a aucune influence sur la distribution de champ électrique dans le câble, puisque les potentiels électriques au niveau de la couche écran commun

sont mis à la terre. Sachant que l'intensité de champ électrique maximale autour de câble atteint 3758,066 kV/m.

II.7 Conclusion

La caractérisation d'un câble électrique souterrain à haute tension peut être simulée et analysée à l'aide de la modélisation numérique avec une grande précision par le logiciel COMSOL Multiphysics mise en œuvre la méthode des éléments finis. Pour résoudre numériquement les problèmes d'électrostatique.

L'ajout de particules individuelles ou multiples aux matériaux purs pour différentes couches du câble électrique souterrain à haute tension modifie la constante diélectrique du matériau et affecte la distribution du champ électrique dans le câble électrique souterrain à haute tension.

L'utilisation des matériaux individuels et multi-composites au lieu de matériaux purs diminue la distribution du champ électrique en fonction de la concentration des matériaux additifs individuels ou multiples.

La réduction de la distribution du champ électrique en fonction de la concentration des matériaux additifs dans la couche isolante est la plus importante par rapport aux autres couches du câble.

L'ajout de particules individuelles ou multiples aux matériaux purs des couches semi-conductrices interne et externe augmente considérablement la distribution du champ électrique dans la couche isolante.

L'ajout de particules individuelles ou multiples aux matériaux purs des différentes couches diélectriques qui viennent après la couche semi-conductrice extérieure du câble d'alimentation n'affecte pas la distribution du champ électrique parce que les potentiels électriques au niveau de la couche d'écran commune sont mis à la terre.

Afin d'approfondir la compréhension des phénomènes influençant le comportement électrique des câbles haute tension, le chapitre suivant se concentre sur l'analyse des décharges partielles, qui constituent un indicateur critique de l'état de l'isolation. Cette nouvelle étape vise à modéliser et à simuler le comportement d'un câble soumis à un champ électrique en régime continu haute tension, en tenant compte des effets localisés pouvant compromettre la fiabilité du système d'isolation. Cette approche permettra d'évaluer plus finement les performances des matériaux dans des conditions réelles de fonctionnement.

CHAPITRE III

MODELISATION DU CABLE HVDC EN PRESENCE DE DECHARGES PARTIELLES

III.1 Introduction

La décharge partielle est un phénomène qui peut être surveillé pour évaluer la qualité de l'isolation. Cependant, ce phénomène est assez complexe et nécessite une compréhension de divers processus concurrents. Ce chapitre vise à analyser le comportement du câble pour le transport de courant continu à haute tension. Au niveau fondamental, une décharge partielle est une panne localisée qui se produit sans destruction totale de l'isolation.

Les propriétés électriques essentielles qui influencent le fonctionnement optimal des câbles à courant continu en haute tension sont étudiées et analysées numériquement. La distribution du potentiel et du champ électrique est déterminée en résolvant l'équation de Poisson à l'aide de la méthode des différences finies. Les résultats de la simulation numérique pour les différentes parties du câble en présence de décharges partielles sont représentés et interprétés. Certains aspects de cet effet nécessitent des investigations plus approfondies afin de valider un modèle mathématique réaliste des phénomènes physiques.

III.2 L'importance de transport d'énergie électrique par HVDC

Actuellement dans le monde, un grand nombre de lignes à haute tension sont alimentées en courant alternatif triphasé. Mais dans le contexte particulier de certaines traversées sous-marines ou lignes enterrées, le transport se fait en courant continu (HVDC) pour des raisons d'économie, d'encombrement, de fiabilité et de disponibilité. Son principal intérêt est de permettre le transport de l'électricité sur de longues distances qui génèrent moins de pertes. La capacité de transport de puissance d'une ligne à courant alternatif est inversement proportionnelle à la distance de transmission. La capacité de transport de puissance des lignes à courant continu n'est pas affectée par la distance de transmission. Le HVDC est la solution optimale pour transporter l'électricité dans des câbles enterrés ou sous-marins sur des distances supérieures à environ 100 km. En effet, la puissance réactive produite par la nature capacitive du câble, s'il est alimenté en courant alternatif, finit par empêcher le transport de la puissance active, pourtant recherchée. En courant continu, aucune puissance réactive n'est produite dans le câble [94 - 99].

Le coût d'une ligne de transmission comprend l'investissement en capital nécessaire à l'infrastructure proprement dite et les coûts engagés pour les besoins opérationnels. La ligne à courant continu peut transporter autant de puissance avec deux conducteurs (ayant des polarités positives/négatives par rapport à la terre) qu'une ligne à courant alternatif avec trois conducteurs de même taille. Ainsi, pour un niveau de puissance donné, une ligne à courant continu nécessite une ligne de petite taille, des pylônes plus simples et moins chers, et des coûts de conducteurs et d'isolation réduits. Les lignes à courant continu ne nécessitent pas de compensation de puissance

réactive. Mais les coûts des équipements terminaux sont augmentés en raison de la présence de convertisseurs et de filtres.

L'utilisation du HVDC permet de réduire les pertes de transmission de puissance à environ deux tiers de celles du système HVAC. L'absence d'effet de peau avec le DC est également bénéfique pour réduire marginalement les pertes de puissance, et les pertes diélectriques dans le cas des câbles d'alimentation sont également beaucoup plus faibles pour la transmission DC. Les effets de la décharge corona ont tendance à être moins importants pour les conducteurs à courant continu que pour les conducteurs à courant alternatif.

En raison de sa contrôlabilité rapide, la transmission DC a un contrôle total sur la puissance transmise et la capacité d'améliorer la stabilité transitoire et dynamique dans les réseaux AC associés. Elle peut également limiter les courants de défaut dans les lignes à courant continu. De plus, la transmission en courant continu permet de surmonter certains des problèmes associés à la transmission en courant alternatif.

Par conséquent, la planification de la transmission en courant continu pour diverses applications technologiques nécessite une étude détaillée pour évaluer les avantages. Actuellement, le nombre de lignes en courant continu dans un réseau électrique est très faible par rapport au nombre de lignes en courant alternatif. Cela indique que la transmission en courant continu n'est justifiée que pour des applications spécifiques. Bien que les avancées technologiques et l'introduction de systèmes à courant continu multi-terminaux devraient augmenter le nombre de lignes à courant continu.

III.3 Effet des décharges partielles sur les câbles de transport d'énergie électrique

Les câbles utilisés dans les connexions en courant continu sont soumis à des contraintes électriques constantes et doivent donc être conçus différemment de ceux utilisés en courant alternatif. En raison des contraintes électriques constantes soumises à l'isolation des câbles, la présence de décharges partielles dans l'isolation modifie la distribution du champ électrique interne ce qui induit des renforcements locaux importants du champ électrique, ce qui va conduire à une forte distorsion du champ théorique pouvant conduire à une accélération du vieillissement du câble [100 - 105]. Le vieillissement de l'isolation conduit généralement à une augmentation des défauts structuraux susceptibles de piéger des charges et de surchauffer les différentes couches du câble. La présence simultanée de gradients électriques et thermiques appliqués à l'isolant du câble conduit à une redistribution du champ électrique dans l'isolant, passant d'un comportement capacitif à un comportement résistif. Pour une distribution résistive du champ électrique, la résistivité de l'isolant dépend fortement à la fois du champ électrique et de la température. La

présence de charges d'espace dans l'isolant des câbles haute tension pose un réel problème de fiabilité. Jusqu'à présent, aucune méthode ne permettait la mesure la localisation directe de ces charges dans un câble à isolation épaisse [106].

Actuellement, le matériau le plus utilisé pour l'isolation des câbles HVDC est le polyéthylène de faible densité. Pour réduire la conductivité de ce dernier, des additifs sont ajoutés au plastique, tels que du polyéthylène haute densité, des nanoparticules d'oxydes métalliques, des allotropies de carbone ou encore diverses molécules aromatiques. Ces additifs piègent les charges électriques et réduisent leur mobilité, ce qui contribue à réduire la conductivité électrique.

III.4 Description du problème

La figure (3.1) montre la géométrie de notre problème. Le modèle de simulation est déduit du cas réel qui est une configuration fil-cylindre coaxial qui présente une symétrie de révolution parfaite. De plus, les électrodes sont considérées de longueur infinie le long du fil.

La section d'un modèle de câble électrique extrudé de 90 kV est caractérisée par un conducteur en cuivre au centre entouré d'un isolant polymère (polyéthylène ou polyéthylène réticulé), suivi d'une couche semi-conductrice, de quelques conducteurs en cuivre, d'une gaine en aluminium puis d'une protection plastique.

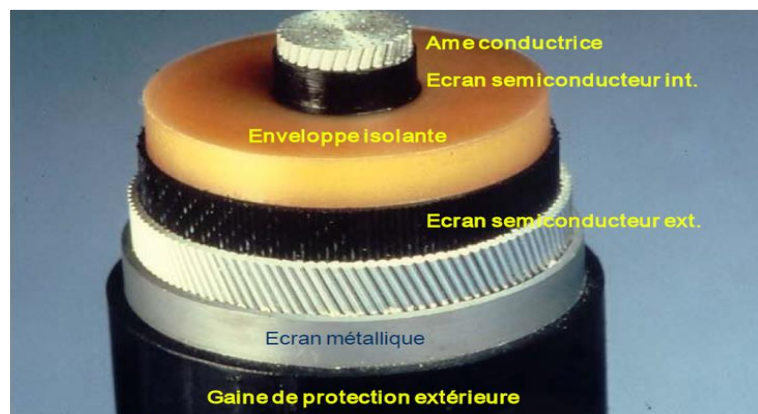


Figure 3.1: Conception d'un câble isolé en polymère.

III.4.1 Modèle mathématique du câble HVDC

Les équations fondamentales régissant le phénomène des décharges partielles dans les câbles de transport d'énergie électrique se réduisent aux équations de l'électrostatique de Maxwell auxquelles s'ajoutent les équations du milieu considéré. Ces équations sont [107 - 112] :

$$\nabla \cdot \vec{E} = \pm \frac{\rho}{\epsilon_0 \cdot \epsilon_r} \quad (3.1)$$

$$\nabla \cdot \vec{j} = 0 \quad (3.2)$$

$$\vec{J} = \pm \rho \cdot \mu \cdot \vec{E} \quad (3.3)$$

$$\vec{E} = -\nabla U \quad (3.4)$$

$$\nabla^2 U = \mp \frac{\rho}{\epsilon_0 \cdot \epsilon_r} \quad (3.5)$$

Avec :

- $\vec{E}$ est le vecteur champ électrique (V/m). Le signe dans l'équation (3.1) est positif si l'électrode active est soumise à une tension de polarité positive et négative dans le cas contraire.
- U est le potentiel électrique (V).
- ρ est la densité de la charge d'espace (C/m³), elle est toujours positive. Le signe dans (3.5) est négatif si l'électrode active est soumise à une tension de polarité positive et positif dans le cas contraire.
- $\vec{J}$ est le vecteur de densité de courant (A/m²). Le signe dans (3.3) est positif si la tension appliquée est de polarité positive et négatif dans le cas contraire.
- μ est la mobilité des ions positifs ou négatifs (m²/V.s).
- ϵ_0 est la permittivité de l'air (= 8.85.10⁻¹² F/m).
- ϵ_r est la permittivité relative du matériau considéré.

L'équation (3.5) est l'équation de Poisson, elle est obtenue en remplaçant l'expression du champ donnée par (3.4) dans (3.1). L'équation (3.2) est l'équation de continuité du courant. L'équation (3.3) est l'équation de densité de courant.

En réalité, il est extrêmement difficile de trouver une solution exacte de ces équations en raison de leur nature non linéaire. Donc, des approches simplificatrices basées sur des modèles hypothétiques sont introduites pour trouver des solutions à des problèmes réels. Plusieurs hypothèses simplificatrices ont été introduites pour résoudre le problème. Par conséquent, une solution numérique est fournie comme outil pour la résolution de cet ensemble d'équations [113 - 117].

III.4.2 Modélisation du diélectrique en présence d'une cavité

Les mécanismes de claquage dans le PE peuvent être divisés en mécanismes électriques, thermiques, électromécaniques et de décharges partielles [118].

Les décharges partielles se produisant dans des vides remplis de gaz. Dans certaines circonstances, peuvent initier des arborescences électriques. Les arborescences électriques peuvent continuer à se propager à travers l'isolation par des décharges continues et finalement donnent lieu à une panne

La cause des décharges partielles est l'augmentation locale de l'intensité du champ et la réduction locale de la résistance électrique.

L'intensité du champ initial pour les décharges de streamer dans les cavités est donnée par [119, 120] :

$$E_C = 25,2 \cdot \frac{U}{m \cdot p_a} \cdot P \cdot \left(1 + \frac{8,6}{\sqrt{Pd/m \cdot p_a}} \right) \quad (3.6)$$

La tension limite pour l'apparition de décharges sur le diélectrique est donnée par :

$$V_C = E_C \cdot e \cdot \left[1 + \frac{1}{\epsilon_r} \left(\frac{d}{e} - 1 \right) \right] \quad (3.7)$$

La modélisation électrique d'une décharge partielle dans une cavité au sein d'un isolant peut être traduite à l'aide d'un diagramme de capacité équivalente. La cavité peut être modélisée par la capacité, la partie du diélectrique entourant la cavité par la capacité C_b en série avec C_g et la partie sans défaut du diélectrique sera représentée par la capacité C_a en parallèle à l'autre branche, comme présenté sur la figure (3.2) :

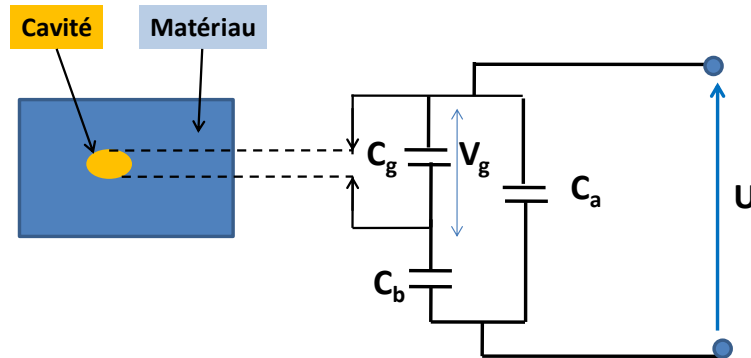


Figure 3.2: Modèle de simulation de la décharge partielle en présence de la cavité.

Où :

- C_g : est la capacité de la cavité, qui est en parallèle avec l'éclateur C_a . Lorsque la tension de claquage de la cavité est atteinte, l'éclateur se met en court-circuit.
- C_b : est la capacité du diélectrique sans décharge partielle en série avec la cavité.
- C_a : la capacité équivalente de l'isolant en parallèle avec C_g et C_b . Cette capacité correspond à la partie saine de l'isolant.
- U : est la tension appliquée aux bornes du diélectrique.
- V_g : la tension aux bornes de la cavité.

$$C_g = \epsilon_0 \frac{S}{e} \quad (3.8)$$

$$C_b = \epsilon_0 \cdot \epsilon_r \frac{S}{d-e} \quad (3.9)$$

$$V_g = U \frac{C_b}{C_b + C_g} \quad (3.10)$$

Lorsque la tension de la capacité de la cavité C_g aux deux extrémités u_g atteint la tension de décharge u_0 , une décharge partielle par étincelle se produit dans la cavité C_g . Lorsque u_g chute jusqu'à l'extinction, l'étincelle s'éteint, une décharge partielle est terminée et un courant d'impulsion de décharge partielle à haute fréquence est généré dans le circuit [121].

Ce vide deviendra l'origine d'une décharge partielle s'il y a l'augmentation de la tension appliquée. Car les gradients de champ dans le vide sont fortement renforcés par la différence de permittivités ainsi que par la forme de la cavité [122].

III.4.3 Conditions aux limites

Comme condition aux limites, Townsend supposa que le champ électrique sur l'électrode active demeure constant et est partout égal à la valeur seuil. Kaptzov lui, postula que la distribution du champ à la surface du conducteur couronné reste constante et est égale à sa valeur seuil même si la tension appliquée augmente.

Au voisinage de la surface du conducteur haute tension :

$U = 400$ kV : Tension appliquée.

$$E = E_{pek} = 32,3 \cdot 10^5 \cdot \delta_r + 0,846 \cdot 10^5 \sqrt{\delta_r / R_1} \quad (3.11)$$

$$\rho_0 = Q_0 / V_1 = Q_0 / (\pi \cdot R_1^2 \cdot l) \quad (3.12)$$

Avec Q : la charge totale du câble en absence de charges dans les diélectriques et les semi-conducteurs.

R_1 : Rayon de l'âme conductrice en cuivre.

l : longueur du câble = 5 m ;

δ_r : Densité relative de l'air.

Pour éviter l'effet des extrémités, on suppose que la longueur du câble est infinie ($l \gg R_1$).

III.4.4 Méthode de résolution de l'équation de Poisson

Pour passer d'un problème exact continu régi par une équation aux dérivées partielles au problème approché discret, nous avons utilisé la méthode des différences finies. La méthode consiste à remplacer les dérivées partielles par des différences divisées ou combinaisons de valeurs ponctuelles d'une fonction caractéristique.

La résolution d'une équation par la méthode des différences finies revient à remplacer la recherche d'une solution continue par la solution en un certain nombre de points [123, 124]. Toute

distribution de points dans l'espace peut être utilisée. Elle consiste à décomposer le domaine d'étude en une grille rectangulaire uniforme dont chaque nœud est à équidistance de son voisin suivant les axes x et y et en chaque nœud, le système différentiel est satisfait.

La méthode des différences finies exploite un maillage à pas constant (quelque soit le type de coordonnées utilisées) et propose deux types de solutions : le premier est explicite, c'est à dire que les inconnues aux nœuds du maillage sont données explicitement par les équations. Le deuxième type est implicite, c'est à dire les inconnues constituent un système linéaire qu'il convient d'inverser, ce dernier est basé sur une forme matricielle « creuse ». Donc, on peut faire une approximation des opérateurs d'une équation différentielle par des différences finies calculées aux nœuds d'un maillage. Aussi on peut faire une approximation de la fonction inconnue d'une équation différentielle.

L'organigramme de résolution du problème considéré est donné par la figure (3.3). Les différentes étapes suivies pour la résolution numérique sont détaillées dans ce qui suit.

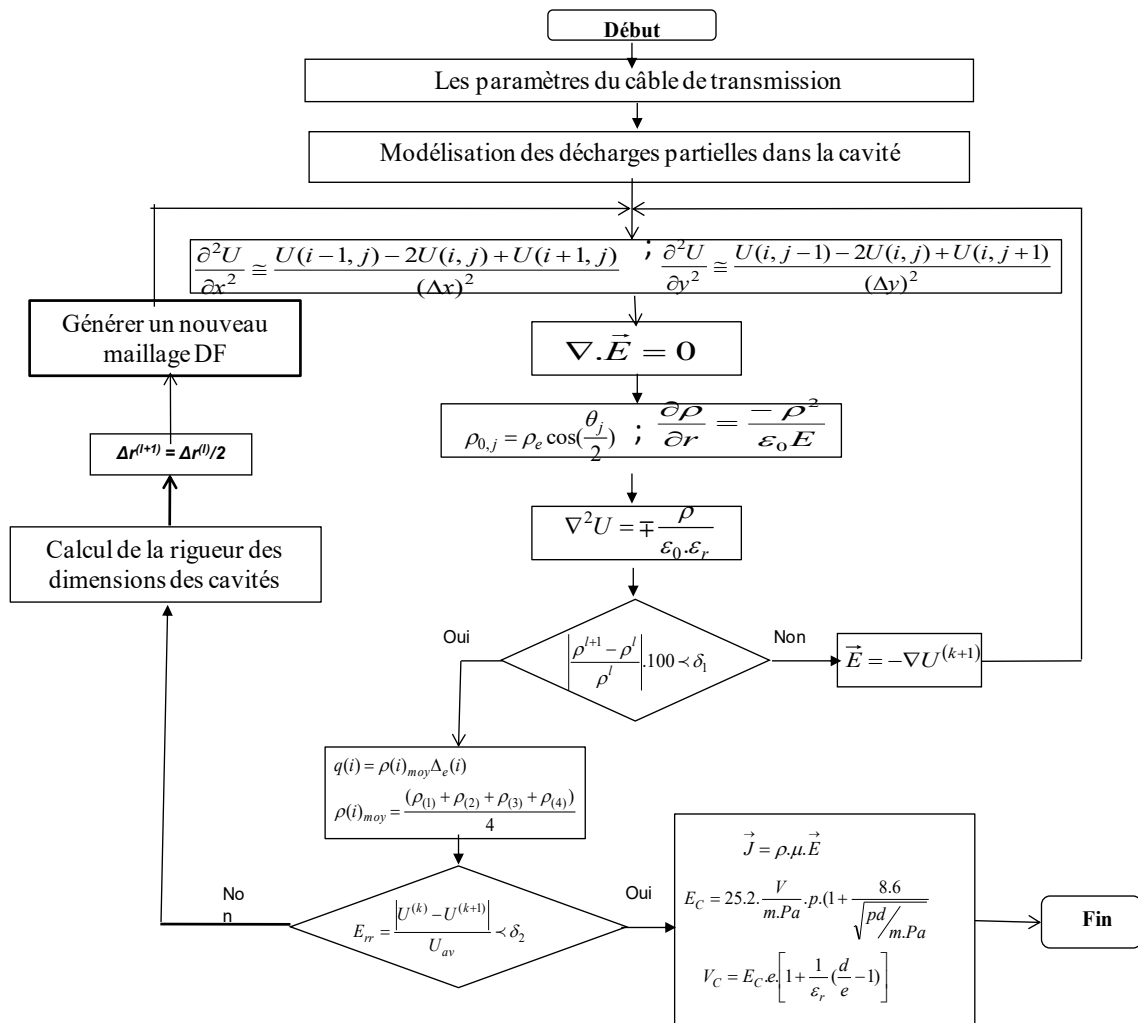


Figure 3.3: Organigramme pour résoudre le problème de la charge d'espace dans le câble HVDC.

Pour la première étape de la résolution, on remplace dans l'équation (3.5), les dérivées d'ordre 2 par les expressions suivantes :

$$\frac{\partial^2 U}{\partial x^2} \cong \frac{U(i-1,j) - 2U(i,j) + U(i+1,j)}{(\Delta x)^2} \quad (3.13)$$

$$\frac{\partial^2 U}{\partial y^2} \cong \frac{U(i,j-1) - 2U(i,j) + U(i,j+1)}{(\Delta y)^2} \quad (3.14)$$

Donc, on trouve la fonction inconnue à deux variables :

$$\nabla^2 U = \frac{\partial^2 U}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 U}{\partial y^2} = \mp \frac{\rho}{\varepsilon_0 \cdot \varepsilon_r} \Rightarrow U(i,j) = 1/4 [U(i-1,j) + U(i+1,j) + U(i,j-1) + U(i,j+1) + h^2] \quad (3.15)$$

Avec : h est le pas de discrétisation spatiale (ou la taille du maillage), en mètres (m).

L'équation aux dérivées partielles est alors remplacée par un système d'équations algébriques pour les valeurs nodales. Nous aboutissons à un système linéaire de forme matricielle :

$$AU = B \quad (3.16)$$

Avec :

A : Matrice de raideur ;

U : Matrice des potentiels aux nœuds ;

B : Second membre du système.

Après la résolution de ce système linéaire (3.16), on trouve la première solution qui représente la distribution du potentiel dans le domaine de calcul.

III.5 Résultats et interprétation

Dans cette étude, nous avons rapporté les résultats obtenus en appliquant le diagramme proposé à la configuration cylindrique. La précision de notre méthode dépend de la précision des paramètres du modèle. Mais il existe d'autres paramètres qui jouent un rôle important dans la précision et la rapidité des calculs.

Le câble HVDC étudié a les caractéristiques données dans le tableau (3.1). L'électrode active est soumise à une tension continue de 110 kV. Le câble est de longueur 25 m. Le matériau choisi comme isolant est le XLPE. L'écran métallique est relié à la terre.

Tableau 3.1: Les caractéristiques du câble utilisé en simulation.

Élément	Type	Épaisseur (mm)	Permittivité relative	Résistivité ($\Omega \cdot m$) at 20 °C
Conducteur	Al	7	8,00	$2,65 \cdot 10^{-8}$
Couche semi-conductrice interne	Si	1	11,68	$2,2 \cdot 10^3$
Diélectrique	PE	10	2,50	10^{16}
Couche semi-conductrice externe	GaAs	1	12,40	$5 \cdot 10^{-6}$
Ecran métallique	Cu	2	0,99	$1,68 \cdot 10^{-8}$
Gaine extérieure	PVC	3,5	5,00	10^{11}

III.5.1 Domaine de discrétisation

L'utilisation d'un maillage régulier permet d'avoir, en tout point, la même forme pour les équations. Le plus simple de ces maillages réguliers est le maillage carré, figures (3.4 – 3.6).

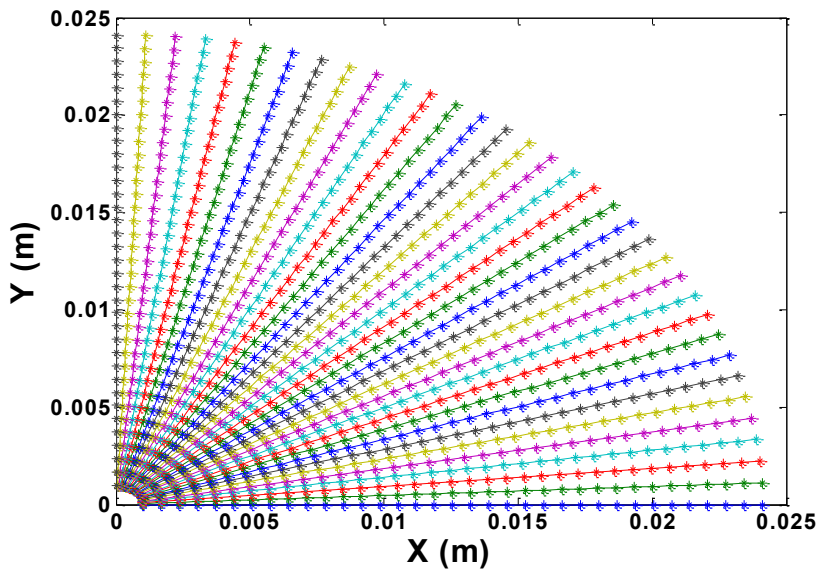


Figure 3.4: Lignes de champ pour 1/4 du domaine de calcul.

Les flèches colorées symbolisent à la fois à la direction du vecteur du champ, et une amplitude relative, identifiée par la couleur.

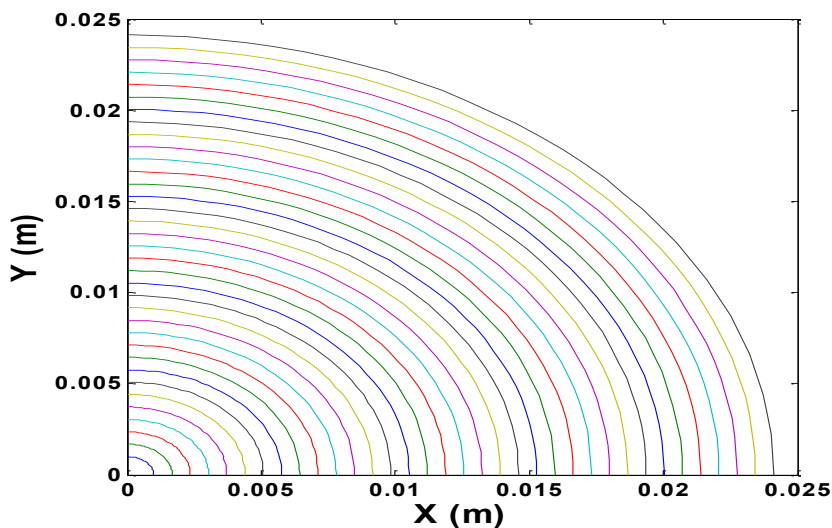


Figure 3.5: Contours équipotentiels pour 1/4 du domaine de calcul.

Dans cette figure les couleurs correspondent aux lignes équipotentiels. Chaque couleur représente un niveau constant du potentiel électrique U .

Le calcul est étendu à un ensemble du domaine de calcul, qui est subdivisé en petits éléments par un maillage rectangulaire où chaque rectangle est identifié par ses quatre sommets (nœuds). Le maillage présenté dans la figure (3.6) est le maillage que nous avons choisi pour discréditer notre

domaine de calcul. Il est généré à partir des contours équipotentiels et de lignes de champ.

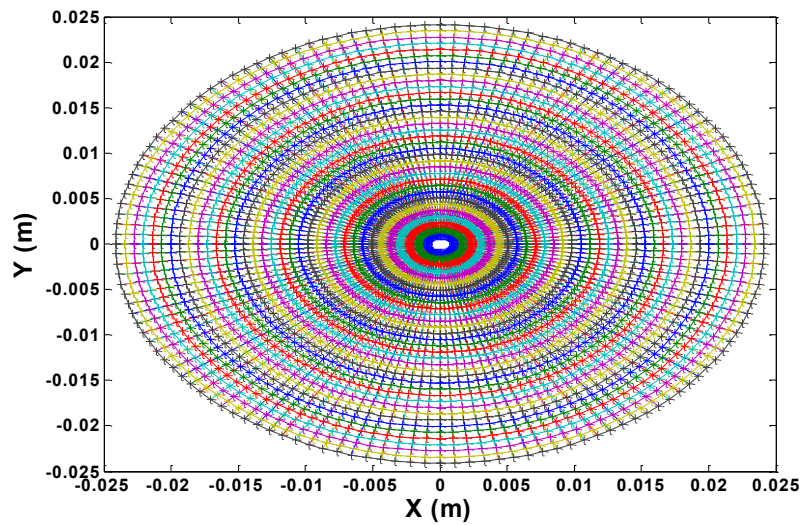


Figure 3.6: Maillage rectangulaire du modèle géométrique du câble.

Pour avoir un compromis entre la précision et le temps nécessaire au tracé de la figure, l'incrément est choisi constant, pour avoir un maillage uniforme. Le nœud (i, j) est donné par l'intersection de l' i ème droite avec le j ème contour.

Une figure de champ est par définition une courbe tangente en chaque point au vecteur champ défini en ce point. On remarque également que les lignes de champ ne se croisent pas. Elles transportent des charges positives vers des charges négatives (ou vers l'infini).

III.5.2 Potentiel électrique

La fonction de potentiel définit un champ de scalaires qui décrit les propriétés électriques de l'espace. L'ensemble des points de l'espace qui sont au même potentiel constitue une surface équipotentielle. La distribution du potentiel électrique entre les deux électrodes est représentée sur les figures (3.7 – 3.8).

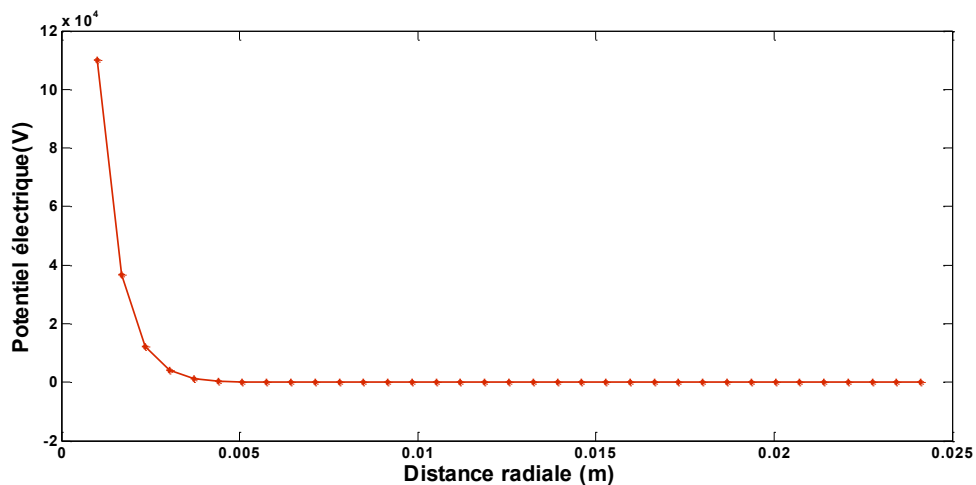


Figure 3.7: Variation du potentiel électrique en fonction de la distance radiale.

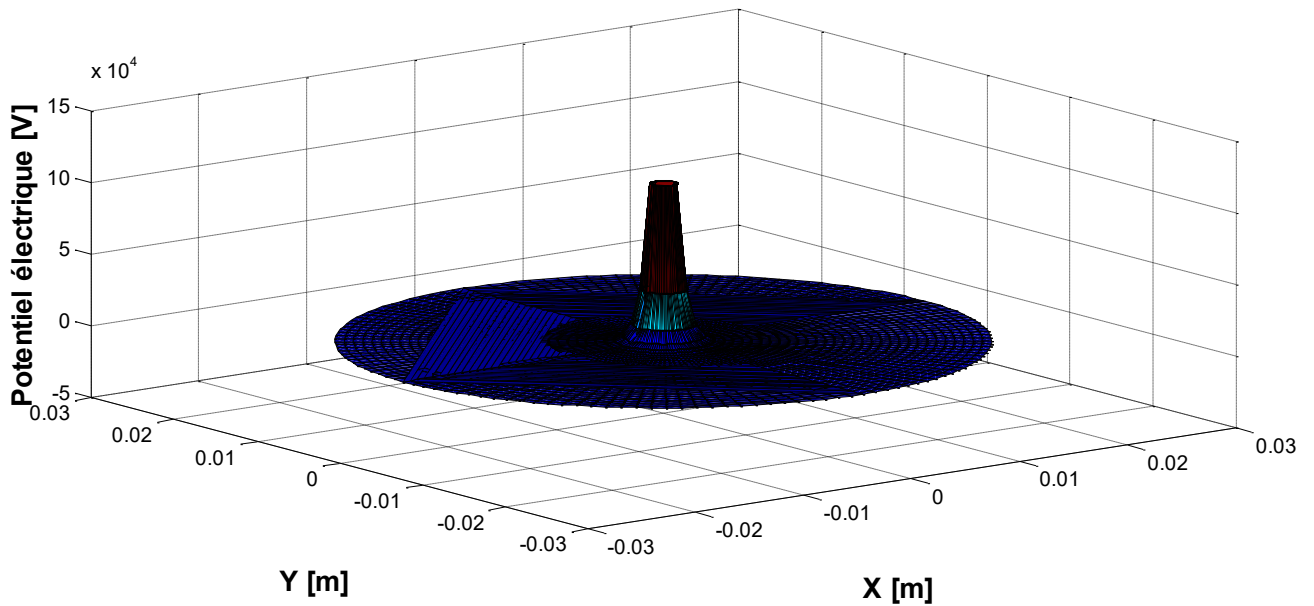


Figure 3.8: Répartition du potentiel électrique dans le câble.

III.5.3 Champ électrique

Après avoir estimé toutes les valeurs de potentiel aux nœuds du maillage, l'estimation des valeurs du champ électrique est réalisée par la méthode d'interpolation/extrapolation.

Étant donnée une distribution de charges, considérée comme externe, il est donc toujours possible de définir en chaque point r de l'espace, une grandeur vectorielle $E(r)$ appelée champ électrique. Les distributions du champ électrique dans notre système sont représentées sur les figures (4.9 – 4.10).

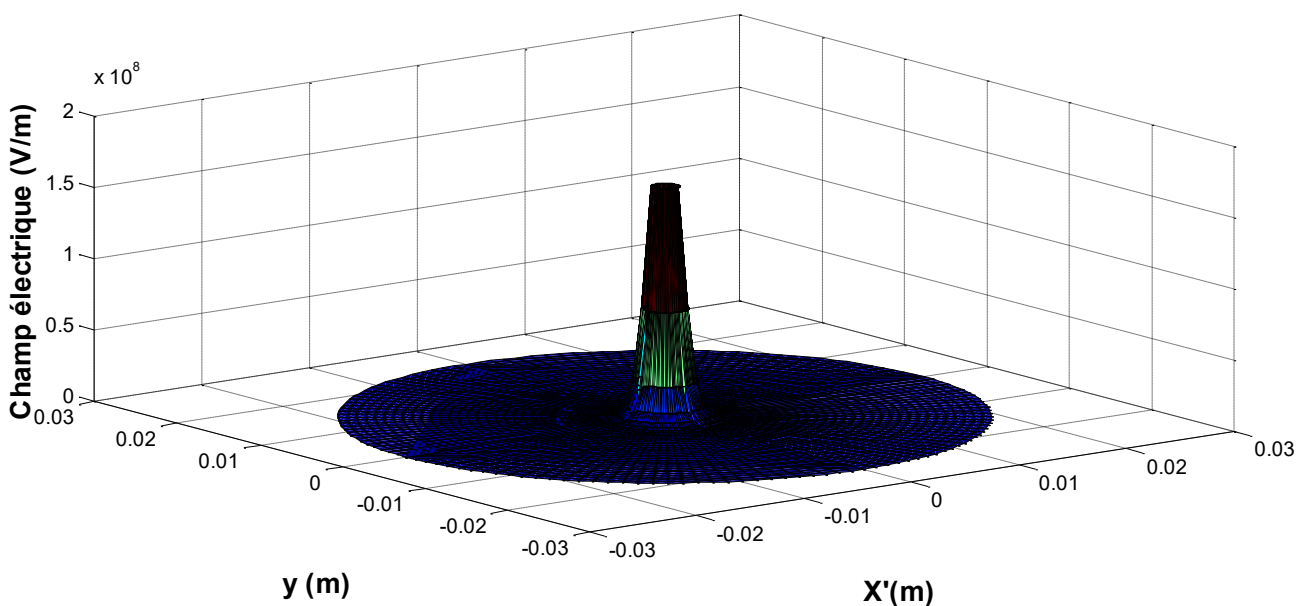
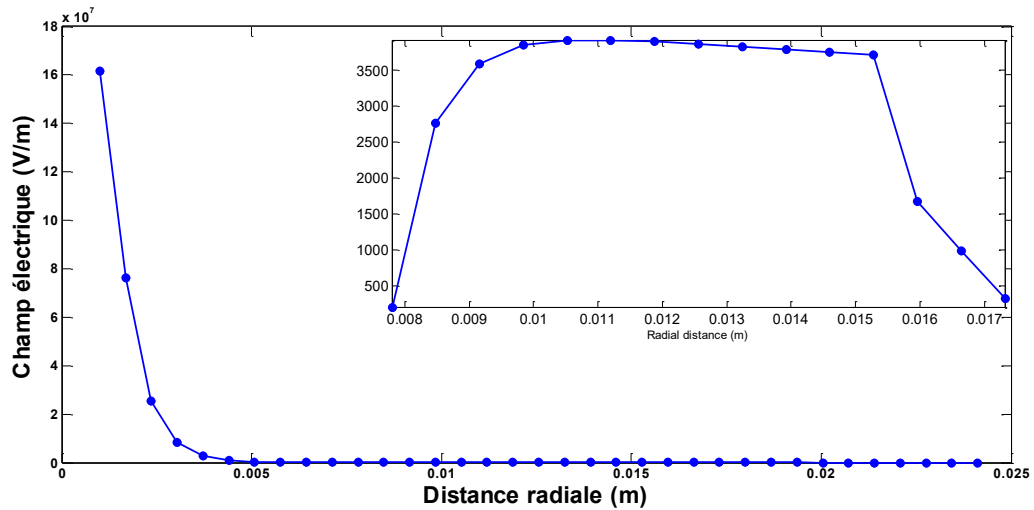
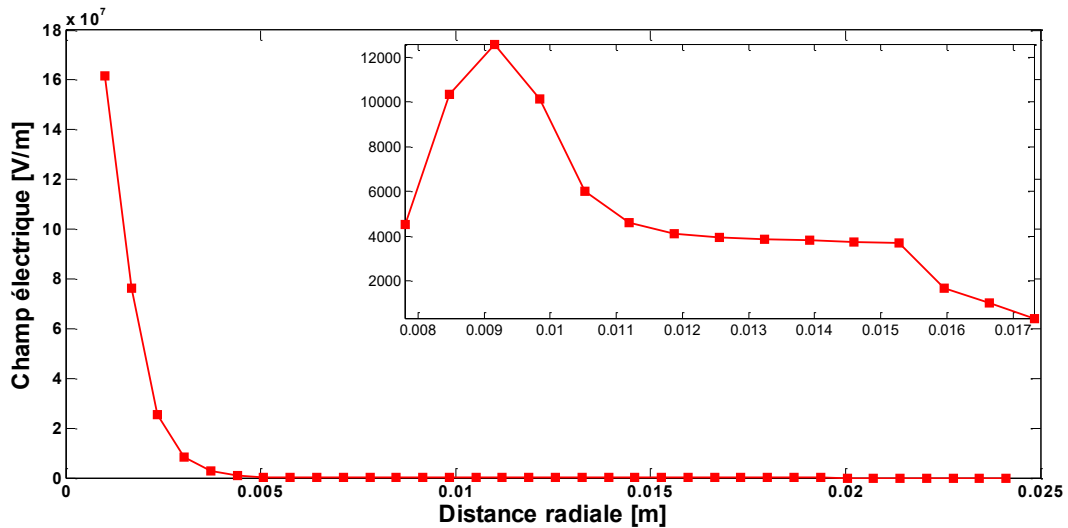


Figure 3.9: Répartition du champ électrique entre les deux électrodes.



(a)



(b)

Figure 3.10: Variation du champ électrique : (a) en absence de cavité, (b) en présence de cavité.

Connaître un champ électrique E revient à connaître le vecteur champ électrique en chaque point de l'espace, en direction et en intensité.

Dans certains cas simples, il est donné par une relation algébrique. Dans des cas plus complexes, il peut être calculé à des points de maillage suffisamment fin.

Avec les ressources informatiques actuelles, il est très facile d'écrire un programme tel qu'en saisissant les charges et leurs positions, l'ordinateur fournisse à chaque point M demandé une petite flèche dont la direction et la longueur renseignent sur le champ électrique en ce point.

A partir des variations de champ entre les deux électrodes, on peut remarquer un aplatissement dans la direction du plan collecteur en raison du rapport élevé entre le champ électrique sur le fil et celui du plan de masse.

Les données des distributions de potentiel et de champ électrique seront utilisées pour réestimer la densité de charge d'espace aux nœuds. Cette procédure se poursuit jusqu'à ce que l'erreur sur le potentiel devienne inférieure à une valeur prédéterminée. L'erreur est définie par :

$$E_{rr} = \frac{|U^{(k)} - U^{(k+1)}|}{U_{av}} \quad (3.17)$$

$$U_{av} = \frac{|U^{(k)} + U^{(k+1)}|}{2} \quad (3.18)$$

Avec : k le nombre d'itérations.

Une fois l'erreur est estimée, il est possible de contrôler la qualité de la solution en calculant la taille optimale de chaque élément du maillage.

Cela revient à construire un maillage optimal, soit au sens de la précision imposée, soit au sens de la taille maximale du problème étudié. Cela implique le développement d'une stratégie d'adaptation du maillage.

III.5.4 Densité de la charge d'espaces

La charge électrique est la source du champ électrique. Le champ électrique en tout point de l'espace peut être mathématiquement lié aux charges présentes.

Nous avons adapté la méthode des caractéristiques simplifiée pour déterminer la distribution de la charge d'espace à l'intérieur du câble électrique. La densité de charges augmente en fonction de la tension appliquée.

Les variations de la densité de la charge d'espaces est illustré dans les figures (3.11 – 3.12). En général, les valeurs calculées sont en bon accord avec celles données par la mesure expérimentale. Cependant, la différence significative entre les deux distributions apparaît au voisinage des frontières pour différents matériaux constituant le câble.

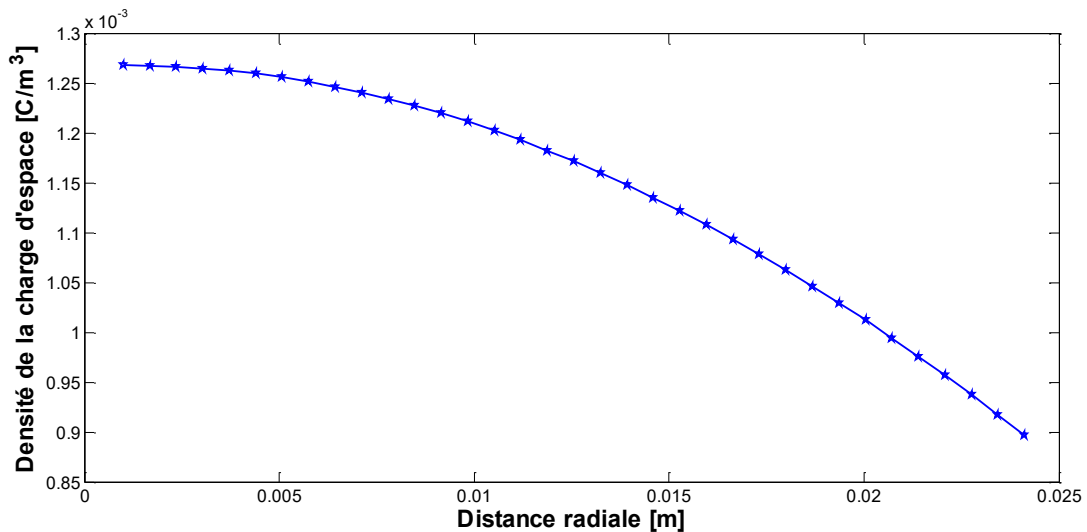
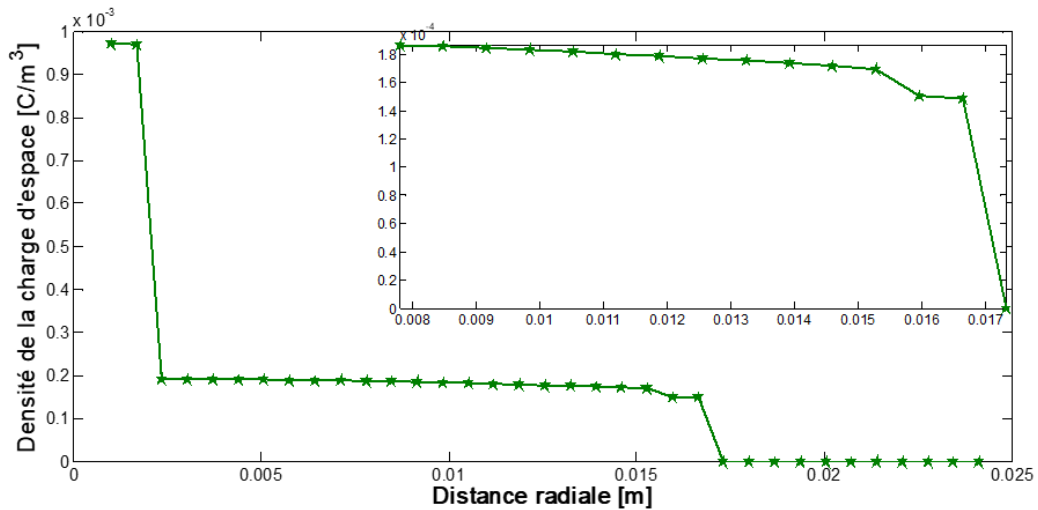
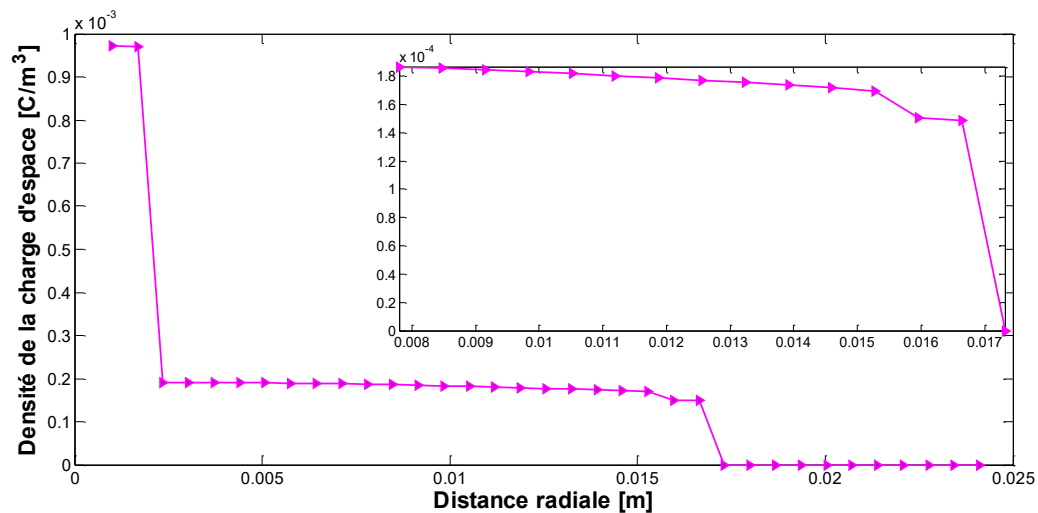


Figure 3.11: Variation de la densité de la charge d'espace entre les deux électrodes sans diélectrique.



(a)



(b)

**Figure 3.12: Variation de la densité de la charge d'espace dans le câble :
(a) en absence de la cavité, (b) en présence de la cavité.**

Cette étape est nécessaire à la résolution de l'équation de Poisson par la méthode des différences finies, dont la procédure d'exécution est donnée dans les étapes suivantes. Cependant, nous avons introduit une troisième condition limite du potentiel correspondant au champ critique du minimum d'ionisation.

III.5.5 Densité du courant électrique

La figure (3.13) donne les variations de la densité de courant en fonction de la tension appliquée et de la distance interélectrodes à l'intérieur du système.

Cette variation est en bon accord avec la loi théorique courant-tension de Townsend. On voit que si la distance augmente, la densité de courant diminue.

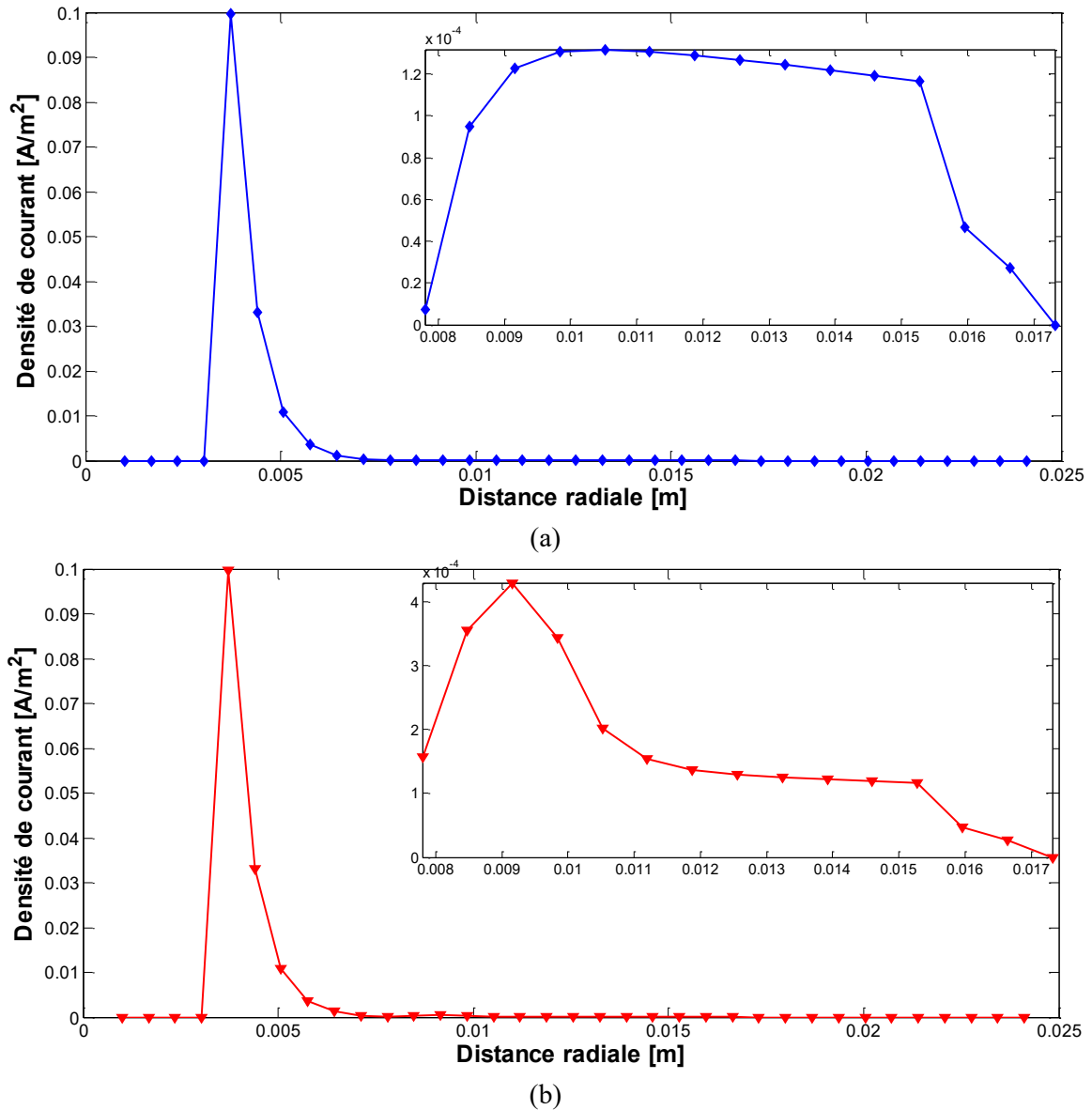


Figure 3.13: Variation de la densité de courant électrique dans l'espace interélectrode : (a) en absence de la cavité, (b) en présence de la cavité.

III.6 Conclusion

Dans ce chapitre, une technique numérique de simulation des propriétés électriques du câble HVDC a été représentée. Le champ ionisé d'un câble DC unipolaire est modélisé comme le champ ionisé d'un seul conducteur cylindrique avec présence de décharge partielle dans le diélectrique. La décharge est décrite par une équation pour la densité d'ions positifs d'une seule espèce et l'équation de Poisson pour le champ électrique.

La méthode des différences finies utilisée pour la résolution du problème présente une bonne approximation dans la détermination des caractéristiques électriques du câble de transport d'énergie HVDC couplé aux décharges partielles.

Les câbles à très haute tension sont de plus en plus utilisés pour transporter l'électricité sur de longues

distances. Mais, plus la tension augmente, plus l'isolation des câbles devient inefficace.

Cette étude électrique est très utile pour analyser l'état du câble en service. Si la différence de potentiel aux bornes de la cavité est inférieure à la tension de claquage, le câble reste en service. Mais dans le cas contraire, il est recommandé de changer le câble pour assurer le bon fonctionnement des installations électriques. La technique utilisée en pratique consiste à augmenter progressivement la tension aux bornes de l'échantillon jusqu'à la tension limite qui correspond, dans la cavité, au champ de claquage du gaz. Par suite de la dissipation d'énergie dans la cavité, il y a neutralisation de charges sur les parois de cette dernière.

Dans la continuité de l'étude numérique du comportement électrique des câbles HVDC en présence de décharges partielles, il devient essentiel d'enrichir ces résultats par une approche expérimentale, le chapitre suivant est consacré à l'élaboration de nouveaux matériaux composites et à l'analyse approfondie de leurs propriétés électriques, chimiques et mécaniques.

CHAPITRE IV

ETUDES EXPERIMENTALES DES NOUVEAUX MATERIAUX COMPOSITES

IV.1 Introduction

L'objectif de ce chapitre est de présenter les matériaux étudiés et les différentes étapes expérimentales utilisées pour préparer les matériaux composites. Nous détaillons les principes et l'implémentation des différentes méthodes de mesure, ainsi que les divers protocoles expérimentaux.

Les essais expérimentaux menés dans ce chapitre portent sur les propriétés électriques, chimiques et mécaniques. L'objectif de la partie électrique est la mesure de la rigidité diélectrique. Pour l'analyse des propriétés physico-chimiques des matériaux composites, nous utilisons les instruments MEB, DRX et FTIR. Concernant la partie mécanique, les principales caractéristiques mesurées sont la résistance à la traction et l'allongement à la rupture des matériaux composites.

IV.2 préparations des échantillons

Les matériaux utilisés sont le PRC comme matrice d'isolation, ainsi que l'oxyde de zinc (ZnO) et le graphite naturel (C). Le PRC est fourni par la société ENICAB de Biskra, le graphite naturel par la société KPLAST de Sétif, et l'oxyde de zinc par le laboratoire croissance et caractérisation de nouveaux semiconducteurs (CCNS).

Le matériau de base utilisé est le polyéthylène réticulé chimiquement (PRC). Différents types de charges, telles que l'oxyde de zinc (ZnO), le graphite naturel (C), ont été utilisées pour préparer les composites. La concentration en charges a varié de 0 à 15 % en poids, avec un pas de 2,5 %. Les échantillons ont été obtenus en mélangeant le PRC sous forme de granulés avec les charges en poudre à l'aide d'une extrudeuse mono-vis Brabender PLE 330, dans une chambre de mélange Brabender (Figure 4.1).

Les paramètres opérationnels sont les suivants :

- ✓ Les températures dans les zones de chauffage : 125 et 130 °C ;
- ✓ La vitesse de rotation de la vis est de 40 tours par minute.

Les nouveaux matériaux composites obtenus sont des films longs de 0,5 mm d'épaisseur et de 4,5cm de largeur. Ensuite, on découpe les films en petits morceaux pour les placer dans des moules d'une presse de type Polystat 300S (380V, 50Hz, 11kW), à une température de préchauffage de 130°C pendant 15 minutes, afin d'assurer une fusion complète du composite (Figure 4.2).

Après cette fusion, une pression de 100 bars est exercée pendant 2 minutes, puis on augmente la pression à 200 bars pendant 2 minutes et enfin à 300 bars tout en augmentant la température à 180 °C (température de réticulation). Ces conditions (300 bars, 180 °C) sont maintenues pendant

6 à 8 minutes pour assurer une réticulation totale du matériau.

Enfin, la presse est refroidie avec de l'eau tout en maintenant le niveau de la pression pour permettre l'évacuation des bulles d'air et obtenir des plaques propres de 13 cm carrés de chaque composite.



Figure 4.1: Photographie numérique de l'extrudeuse mono-vis Brabender PLE 330.



Figure 4.2: Photographie numérique de la presse Polystat 300S.

IV.3 Tests de rigidité diélectrique

Lorsqu'un matériau est soumis à une contrainte électrique, la quantité de courant le traversant est inversement proportionnelle à sa résistance. Lorsque le matériau est isolant, ce courant est très faible et est nommé courant de fuite. Mais si la différence de potentiel est augmentée, on peut observer pour une valeur critique du champ appliqué une dégradation irréversible nommée « claquage » ou « perforation diélectrique ». L'isolation électrique n'est alors plus assurée. La rigidité diélectrique est alors la valeur maximale du champ qui peut être appliquée à l'échantillon polymère sans occurrence du phénomène de claquage. Le travail expérimental sur la rigidité diélectrique est effectué au laboratoire de génie électrique de l'université de Bejaia, Selon la norme CEI 60243-1 pour la rigidité diélectrique des matériaux isolants. Les échantillons ont été découpés en plaques d'environ 6 cm^2 . La figure (4.3) illustre le schéma de principe de la mesure de la tension de claquage sous tension alternative.

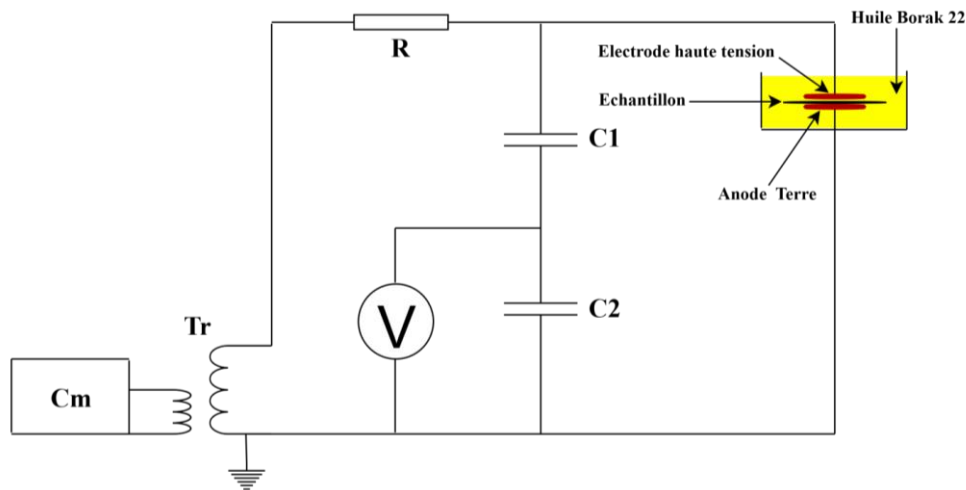


Figure 4.3: Schéma du dispositif des essais de claquage sous tension alternative [31].

Ce dispositif est composé des éléments suivants :

- Un générateur de haute tension pouvant délivrer une tension allant jusqu'à 100 kV alternative de fréquence 50 Hz ;
- Un transformateur HT (100) 0,8/135 kV ; pouvant délivrer une tension allant de 0 à 100 kV pour des essais en alternatif ;
- Un diviseur de tension capacitif ($C1 = 41,4 \mu\text{F}$ et $C2 = 0,1 \mu\text{F}$) ;
- Un voltmètre de crête (V) AC/DC de type MU11, à affichage digital permettant la mesure, selon le montage électrique, des hautes tensions alternatives, ou continues ;
- Une résistance de protection $R = 106 \text{ k}\Omega$ limitant le courant électrique ;
- Récipient contenant l'ensemble des électrodes (Figure 4.4) ;
- Une cage de protection.



Figure 4.4: Récipient contenant l'ensemble des électrodes.

Les essais consistent à immerger l'échantillon dans un récipient contenant de l'huile minérale Borak-22, pour éviter les contournements dans l'air entre l'électrode haute tension et les électrodes de terre.

L'échantillon considéré est soumis à une tension de vitesse constante jusqu'au claquage. Avec l'accroissement de la tension, nous observons au départ des décharges superficielles qui éclairent le milieu, puis des crépitements, et enfin un bruit sourd qui caractérise le claquage de l'isolant. La valeur de la tension de claquage est directement affichée sur le voltmètre de crête.

Les essais sont effectués sous forme de tension alternatif et à la vitesse 1,32 kV/s de la rampe de tension appliqué. Les conditions d'expérimentation sont : la pression de 101,6 kpa, la température de 30 °C et l'humidité de 23 g/m³.

Nous avons utilisé cinq échantillons (plaques), pour chaque concentration des différentes charges. Ce qui donne un nombre global de 80 échantillons de mesure utilisés et testés.

La mesure de l'épaisseur des plaques s'est effectuée par un palmer à plusieurs endroits d'un même échantillon. Cependant, la moyenne des résultats de mesure a été adoptée pour déterminer la valeur du champ électrique de claquage.

Le tableau (4.1), montre les résultats de champ électrique de claquage moyen mesuré en fonction de la concentration des différentes charges.

Tableau 4.1: Le champ électrique moyenne de claquage mesuré en fonction de la concentration des différentes charges.

Concentration de la charge (%)	Champ électrique de claquage mesuré (kV/mm)		
	ZnO	C	ZnO + C
0	63,20		
2,5	63,54	51,77	
5	65,57	53,05	42,41
7,5	66,90	61,44	
10	65,17	45,31	40,27
12,5	61,29	40,82	-
15	53,26	37,07	38,08

En analysant les résultats obtenus expérimentalement, on remarque que les additifs utilisés jouent un rôle très important pour la réduction du phénomène de claquage des diélectriques. En plus est une technique très utile pour la neutralisation des charges électriques piégées dans le matériau.

D'après ces résultats, on remarque que pour la charge de l'oxyde de zinc, le champ électrique de claquage augmente en fonction de la concentration de cette charge jusqu'à 7,5 %. Cette charge représente la valeur la plus grande du champ électrique de claquage, qui est environ de 66,90 kV/mm entre tous les autres types et concentration de charges. Puis, elle est suivie d'une légère diminution à 10 % de cette charge. Au-delà de cette concentration, une baisse notable du champ électrique de claquage qui continue de diminuer en fonction de la concentration, et il atteint son minimum de 53,26 kV/mm à 15 % de la charge de l'oxyde de zinc.

Pour la charge en graphite naturel, pour 0 % de charge, le champ électrique de claquage est maximum, il atteint 63,2 kV/mm. L'ajout de 2,5 % de graphite naturel entraîne une diminution significative du champ électrique de claquage (51,77 kV/mm). Cependant, à 5 % de cette charge, le champ augmente de 7,5 % pour atteindre 61,44 kV/mm. Au-delà de cette charge, une baisse notable du champ est observée, il diminue de 10 % pour atteindre 45,31 kV/mm. Puis, il continue de diminuer de 15 % en fonction de la concentration de la charge en graphite naturel, et il atteint son minimum de 37,07 kV/mm. Nous constatons que l'augmentation de la concentration de la charge hybride composée d'oxyde de zinc (ZnO) et de graphite naturel

conduit à une réduction progressive du champ électrique de claquage, atteignant une valeur minimale de 38,08 kV/mm à une concentration de 7,5% en poids.

IV.4 Les techniques de caractérisation chimique

Les analyses chimiques et physiques ont été réalisées sur des échantillons de PRC pur et de matériaux composites préparés à différentes quantités de dopants.

Les différentes techniques expérimentales utilisées pour les caractérisations chimiques sont : Diffractomètre des rayons X (DRX), Spectroscopie infrarouge à transformée de Fourier (FTIR) et le Microscope électronique à Balayage (MEB).

IV.4.1 Diffractomètre des rayons X (DRX)

La diffraction des rayons X est une technique courante pour l'étude des structures cristallines et de l'espacement entre les atomes. La diffraction des rayons X est basée sur l'interférence constructive de rayons X monochromatiques et d'un échantillon cristallin.

Les rayons sont générés par un tube cathodique, filtrés pour produire un rayonnement monochromatique, collimatés pour être concentrés et dirigés vers l'échantillon. L'interaction des rayons incidents avec l'échantillon produit une interférence constructive et un rayon diffracté lorsque les conditions satisfont à la loi de Bragg [125] :

$$n_i \lambda = 2d' \sin \theta \quad (4.1)$$

Où n_i est un nombre entier, λ est la longueur d'onde des rayons X, d' est l'espacement interplanare générant la diffraction et θ est l'angle de diffraction.

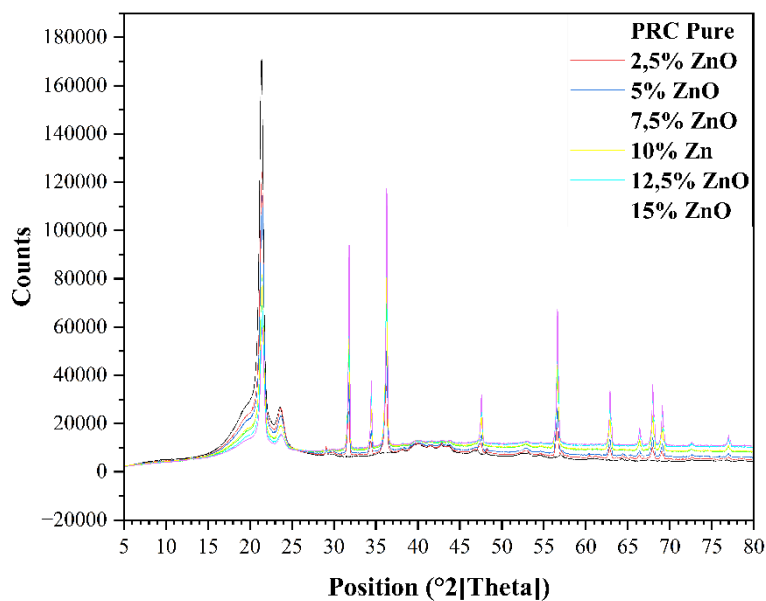
Pour nos analyses, nous avons utilisé un diffractomètre de type Malvern Panalytical installé au plateau technique d'analyses physico-chimiques de Bejaïa. Les différents éléments constituant l'installation sont représentés sur la figure (4.5).



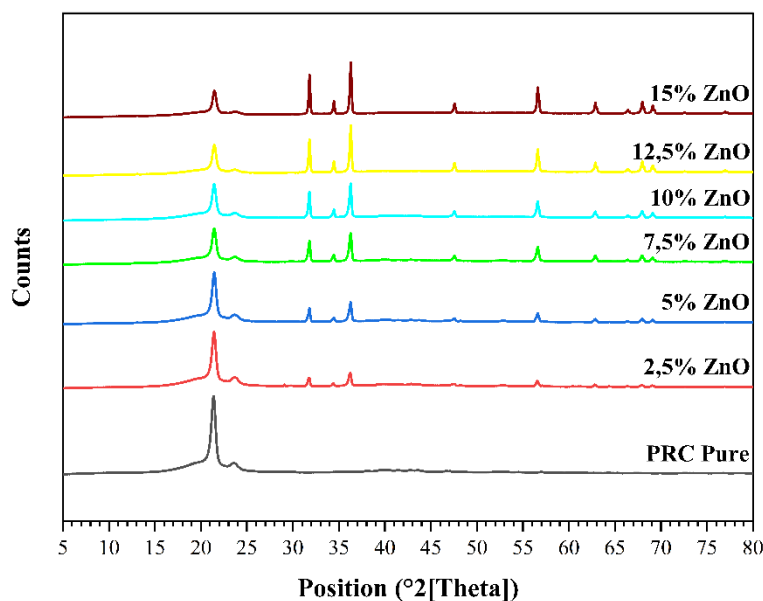
Figure 4.5: Image du diffractomètre de type Malvern Panalytical.

La source de rayons X est un tube muni d'une anode en cuivre, qui correspond à une longueur d'onde $K\alpha_1 = 1,540598 \text{ \AA}$ et $K\alpha_2 = 1,544426 \text{ \AA}$. Ce tube est alimenté par une tension de 45 kV et un courant de 40 mA. Le spectre est obtenu en réalisant un balayage sur un intervalle de 5° à 90° , avec un pas de $0,02^\circ$ et un temps de 27,54 ms/pas.

Les diagrammes de diffraction des rayons X obtenus sur les composites PRC dopé avec l'oxyde de zinc, le graphite naturel sont présentées dans les figures (4.6 – 4.8).

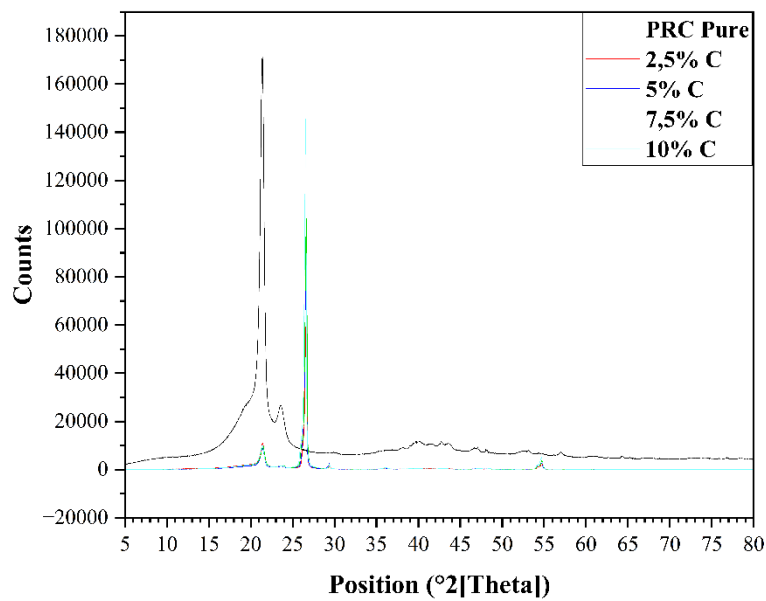


(a)

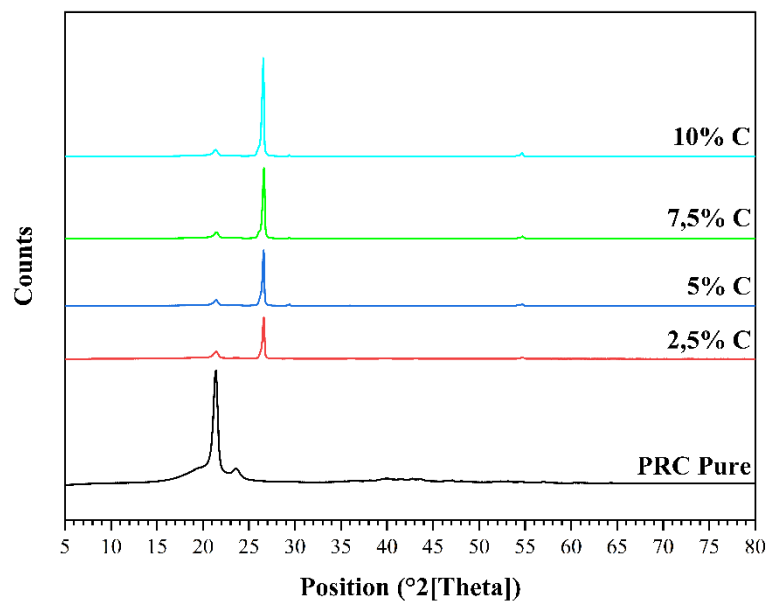


(b)

Figure 4.6: Spectres de diffraction de rayons X du PRC pur et PRC dopé du l'oxyde de zinc : a) 1^{er} représentation, b) 2^{ème} représentation.



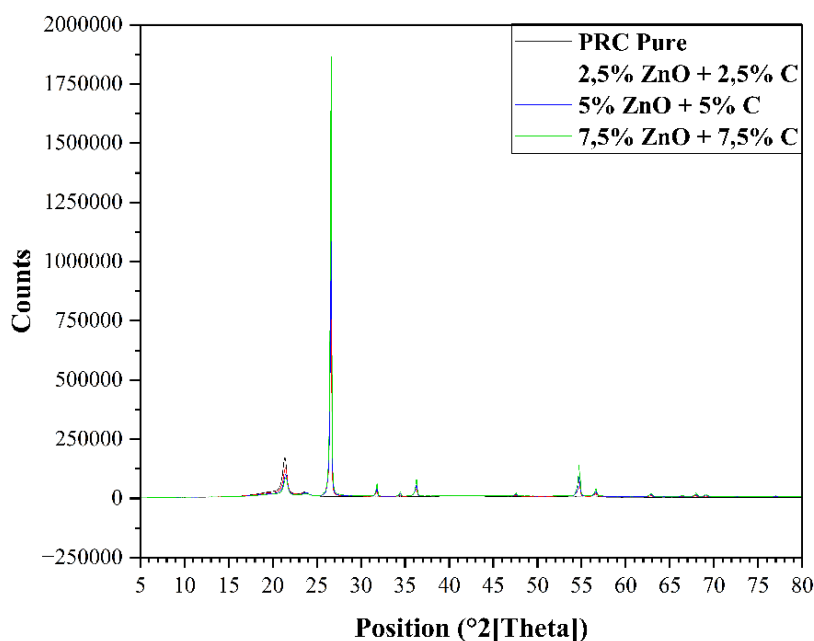
(a)



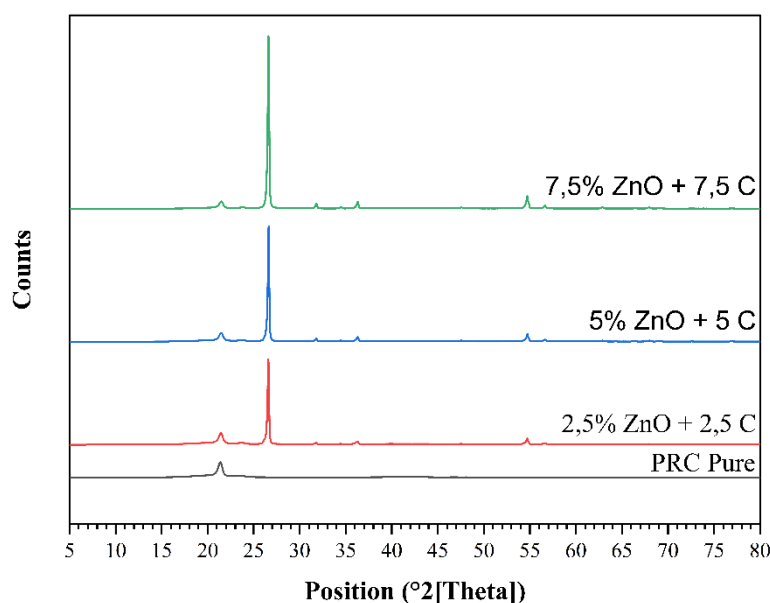
(b)

Figure 4.7: Spectres de diffraction de rayons X du PRC pur et PRC dopé du graphite naturel : a) 1^{er} représentation, b) 2^{ème} représentation.

Nous avons utilisé un diffractomètre haute performance, polyvalent et intelligent, capable d'analyser divers types d'échantillons, des poudres aux couches minces. Il peut déterminer la structure cristalline, la composition et la qualité cristalline du matériau avec une grande précision.



(a)



(b)

Figure 4.8: Spectres de diffraction de rayons X du PRC pur et PRC dopé du l'ensemble l'oxyde de zinc et le graphite naturel : a) 1^{er} représentation, b) 2^{ème} représentation.

Les angles de diffraction d'environ $21,37^\circ$ et $23,76^\circ$ représentent les pics de diffraction cristalline, correspondant aux plans cristallins (110) et (200) du PRC respectivement [126, 127]. Avec l'augmentation de la concentration des matériaux additifs, ces deux pics deviennent plus petits. Nous pouvons observer l'effet de l'ajout de l'oxyde de zinc comme charge sur les échantillons PRC à partir de la figure (4.6) : les pics indexés aux angles de Bragg $31,77^\circ$, $34,43^\circ$,

36,17°, 47,64°, 56,71°, 62,84°, 66,30°, 67,98°, 69,12°, 72,58° et 76,97° correspondent aux plans (100), (002), (101), (102), (110), (103), (200), (112), (201), (004) et (202), respectivement. La position de ces pics est identique à celle reportée sur la fiche JCPDS (Joint Commity Powder Diffraction System, Carte No : 36-1451) et correspond à la structure hexagonale wurtzite de ZnO [128, 129].

La figure (4.7) montre les spectres de diffraction de rayons X du PRC pur et du PRC dopé du graphite naturel. Les pics indexés aux angles de Bragg 26,53°, 54,68° correspondent bien aux plans (002), (004), respectivement, qui sont des réflexions des couches de polyarène [130].

La figure (4.8) montre les spectres de diffraction de rayons X du PRC pur et du PRC dopé de l'ensemble oxyde de zinc et le graphite naturel. Les pics indexés aux angles de Bragg 31,82°, 34,47°, 36,28°, 47,58°, 56,64°, 62,89°, 66,35°, 67,98°, 69,11° correspondent aux plans (100), (002), (101), (102), (110), (103), (200), (112), (201) de l'oxyde de zinc, respectivement. Les angles 26,59° et 54,72° correspondent aux plans (002), (004) de graphite naturel, respectivement.

IV.4.2 Analyse par spectroscopie Infra Rouge

L'analyse des composites préparés a été effectuée en utilisant un spectrophotomètre Infrarouge FTIR (QUATR-S SHIMADZU), Au niveau de Laboratoire croissance et caractérisation de nouveaux semiconducteurs (Figure 4.9).



Figure 4.9: Image Spectromètre Infrarouge FTIR SHIMADZU QUATR-S.

La spectroscopie infrarouge se base sur l'analyse des interactions entre la matière et un rayonnement électromagnétique. Une molécule présente plusieurs fréquences de vibrations fondamentales. Chaque fréquence est associée à l'absorption d'un rayonnement de même fréquence, conformément au principe d'un oscillateur harmonique. Les fréquences se situent

dans la plage de 100 à 4000 cm^{-1} , avec des bandes d'absorption observées dans la région infrarouge. Le spectre infrarouge d'une molécule complexe peut exhiber de nombreuses bandes d'absorption à intensités variables, localisées à différentes fréquences.

L'ensemble des fréquences d'absorption, également appelé spectre, constitue une caractéristique intrinsèque d'une molécule. Deux molécules distinctes présentent des spectres différents, ce qui permet d'utiliser un spectre infrarouge comme un outil d'identification [35].

Les spectres FTIR enregistrés dans la gamme 4000 – 400 cm^{-1} sur les composites PRC dopé avec l'oxyde de zinc, graphite naturel sont montrées dans les figures (4.10 – 4.12).

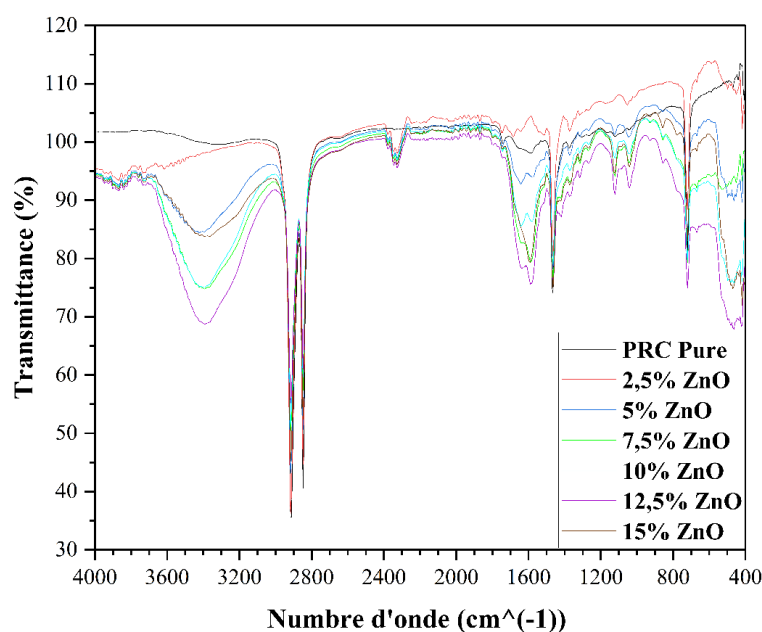


Figure 4.10: Spectres FTIR de PRC pur et PRC dopé du l'oxyde de zinc.

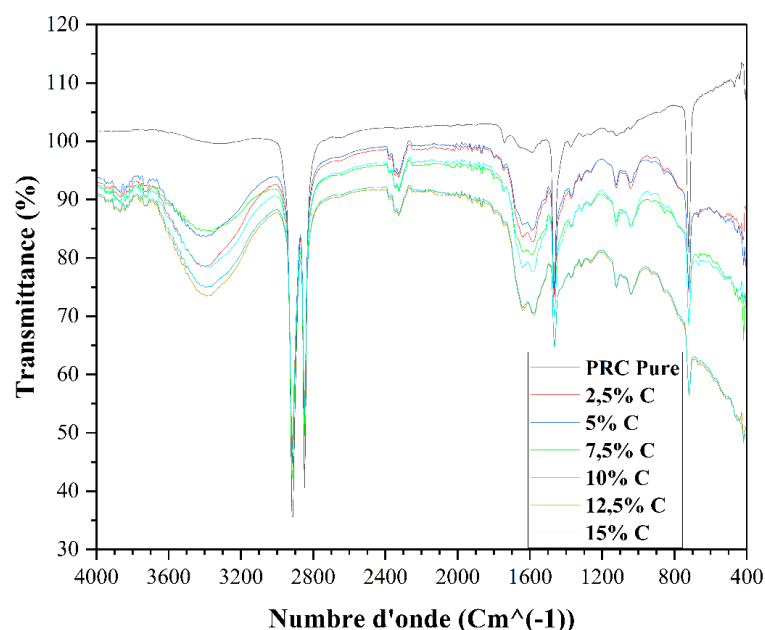


Figure 4.11: Spectres FTIR de PRC pur et PRC dopé du graphite naturel.

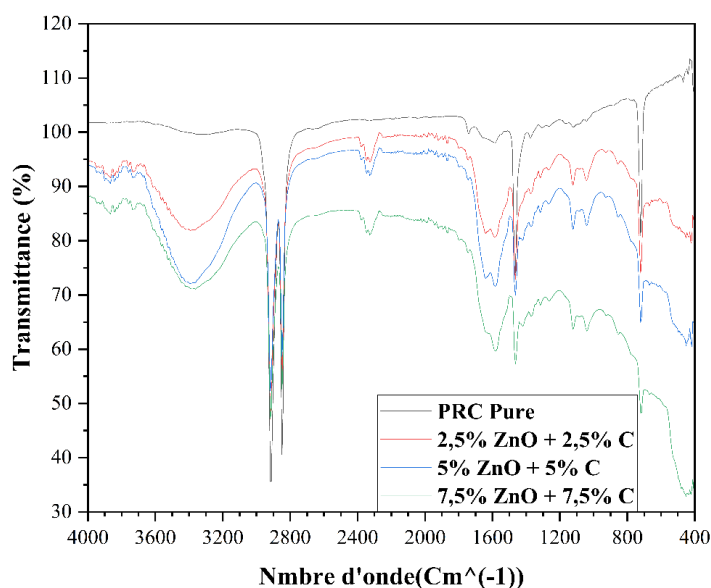


Figure 4.12: Spectres FTIR de PRC pur et PRC dopé de l'ensemble l'oxyde de zinc et le graphite naturel.

Nous constatons que les spectres FTIR des échantillons PRC pur et des composites du PRC présentent plusieurs pics d'absorption. Les pics situés à environ 720 cm^{-1} et à 1464 cm^{-1} correspondent aux vibrations de flexion -CH_2 , tandis que ceux à 2848 cm^{-1} et 2917 cm^{-1} représentent les vibrations d'étirement -CH_2 [131].

Des bandes autour de 1635 cm^{-1} et 2328 cm^{-1} indiquent la présence de C=O et de CO_2 , [132]. Aussi, le pic vers 1590 cm^{-1} correspond à l'étirement symétrique et asymétrique du C=O [133].

Le pic à 1121 cm^{-1} est associé à la déformation -CH , indiquant la flexion -CH_2 et -CH_3 [134]. La région entre 3300 cm^{-1} et 3700 cm^{-1} présente une zone d'absorption de la fonction (-OH) des groupes hydroxyles, cette bande est confirmée par un large pic autour 3669 cm^{-1} qui correspond aux vibrations d'élongation du groupe O-H [135], et un pic à environ 3400 cm^{-1} qui est attribué aux vibrations d'élongation du groupe hydroxyle [136, 137]. Toutes ces pics sont présentés dans les trois composites étudiés (figures 4.10 – 4.12).

Les pics situés autour de 463 cm^{-1} [138] et 898 cm^{-1} [139] correspondent à ZnO , montrant la vibration d'étirement de Zn-O . Ces pics sont présentés dans les spectres FT-IR de PRC dopé de l'oxyde de zinc et l'ensemble l'oxyde de zinc et le graphite naturel. Alors qu'aucun pic significatif à la liaison spécifiés du graphite naturel (C-C), n'a été observé dans les spectres correspondants au PRC dopé du graphite naturel et l'ensemble l'oxyde de zinc et le graphite naturel [140].

IV.4.3 Caractérisation par microscopie électronique à balayage

Un faisceau d'électrons est formé par la source d'électrons et accéléré vers l'échantillon à l'aide d'un potentiel électrique positif. Le faisceau d'électrons est confiné et focalisé à l'aide d'ouvertures métalliques et de lentilles magnétiques en un faisceau mince, focalisé et monochromatique. Les électrons du faisceau interagissent avec les atomes de l'échantillon, produisant des signaux qui contiennent des informations sur la topographie de la surface et la composition. Ces interactions et effets sont détectés et transformés en image [141].

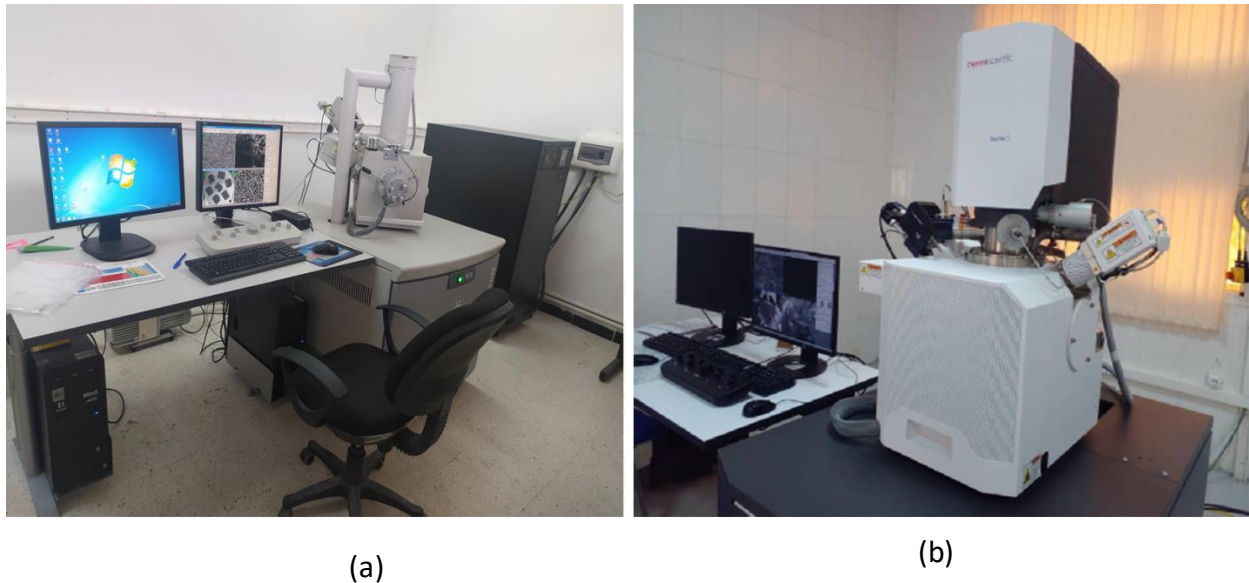


Figure 4.13: Microscope électronique à balayage de type : a) FEI Quanta 250, b) Thermos Scientific TM Quatro.

La morphologie de surface du PRC pur ainsi que des composites PRC dopé avec l'oxyde de zinc, le graphite naturel et l'ensemble de ces deux charges a été étudiée par microscopie électronique à balayage. L'image MEB de la surface observée est représentée sur la figure (4.14).

La figure (4.14.a) montre l'image claire d'un PRC pur en absence de la charge.

En incorporant la charge dans la matrice PRC, la morphologie de la surface du composite a été modifiée, (Figures 4.14.b, c, d).

Les agrégats de ZnO apparaissent comme des points blancs dans la surface, (Figures 4.14.b, d)). Une dispersion homogène des particules de ZnO dans le PRC peut être observée au PRC chargé à 2,5 % d'oxyde de zinc et 2,5 % de graphite naturel (figure 4.14.d). Par contre, la dispersion des particules de ZnO dans le PRC devient un peu moins homogène de 7,5 % d'oxyde de zinc.

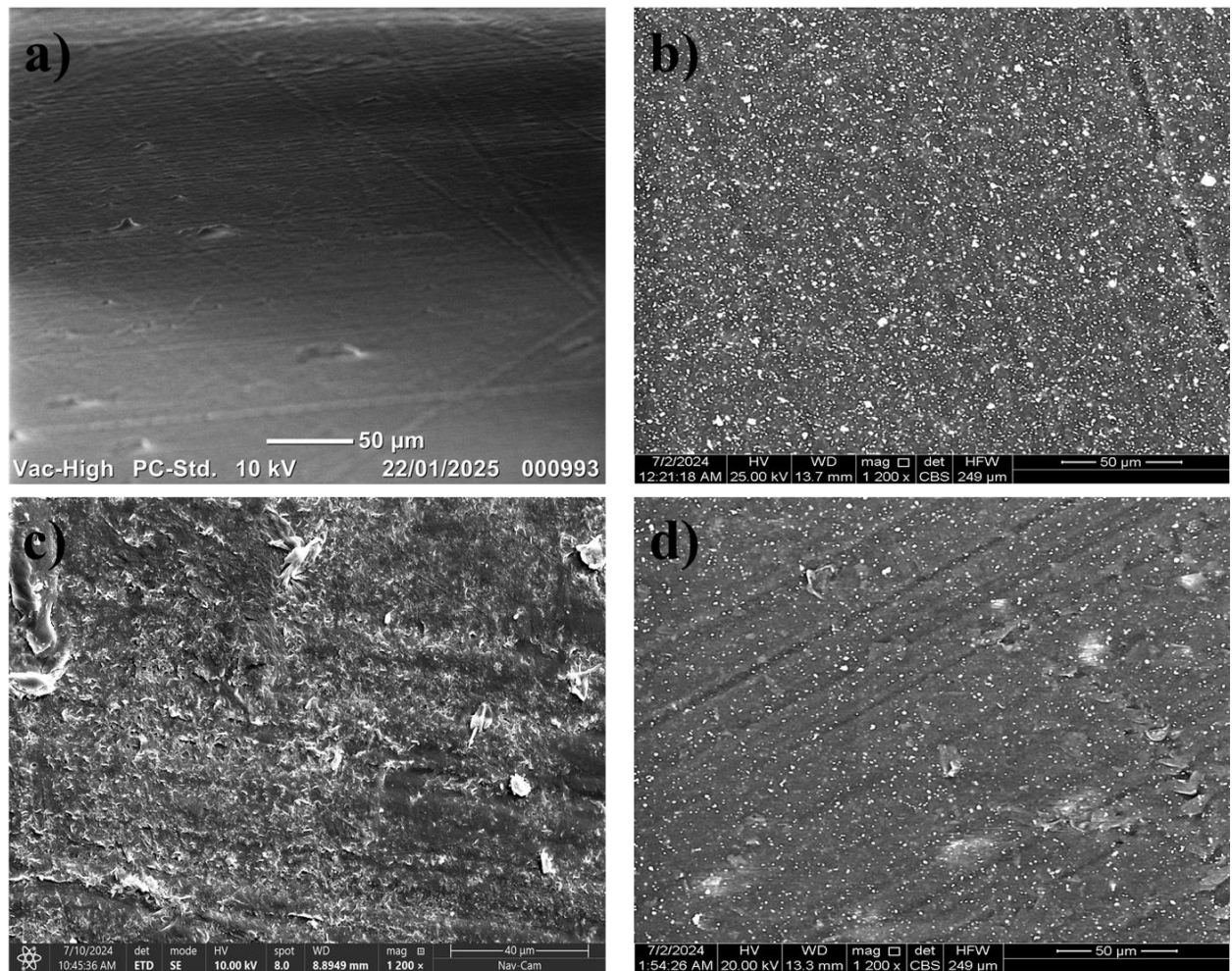


Figure 4.14: Image MEB de (a) PRC pur, (b) PRC chargé à 7,5% oxyde de zinc, (c) PRC chargé à 7,5% graphite naturel, (d) PRC chargé à 2,5 % oxyde de zinc et 2,5 % graphite naturel.

IV.5 Analyse expérimentale de la caractérisation mécanique

La caractérisation mécanique est réalisée au laboratoire des essais mécaniques de la société KPLAST Sétif. L'essai de traction et de l'allongement à la rupture, sont des essais mécaniques les plus étudiés, implique l'application progressive d'une force ou d'une déformation constante sur un échantillon, entraînant ainsi sa déformation progressive jusqu'à la rupture.

Les éprouvettes ont été préparées pour le PRC pur et les matériaux composites élaborées afin d'effectuer simultanément l'allongement à la rupture et la résistance à la traction sur une même éprouvette, conformément à la norme internationale de la commission d'électrotechnique IEC 540, comme le montre la figure (4.15).

Les échantillons ont été découpés à l'aide d'une poinçonneuse métallique appartenant à la société KPLAST de Sétif.

L'instrument employé pour les essais de traction est une machine de traction nommée zwick-R

oell Z050 (figure 4.16). Elle est supervisée par ordinateur à l'aide du logiciel de traction PE ZPV testXpert. La charge initiale appliquée est de 0,5 N avec une vitesse de traverse de 25 mm/min. Ce dispositif est équipé d'un capteur de force qui convertit la force appliquée sur un échantillon en déformation en un signal électrique. L'échantillon est fixé entre deux mâchoires, l'un étant fixe et l'autre mobile. Ce dernier est relié à une traverse qui se déplace le long de deux vis sans fin à une vitesse prédéfinie (25 - 250 mm/min) grâce à un mécanisme d'engrenage.

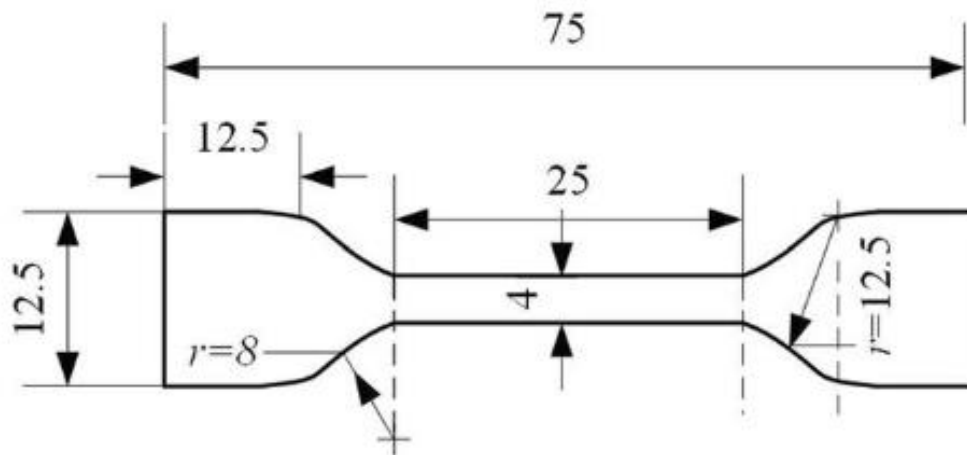


Figure 4.15: Géométrie et dimensions des éprouvettes de traction [142].



Figure 4.16: Machine de traction Zwick/Roell Z050.

Notons que trois essais de traction ont été réalisés sur chaque prélèvement afin de tenir compte de la dispersion des résultats.

Les figures (4.17, 4.18) montrent la résistance à la traction du PRC pur et des matériaux composites préparés à différentes quantités de dopants.

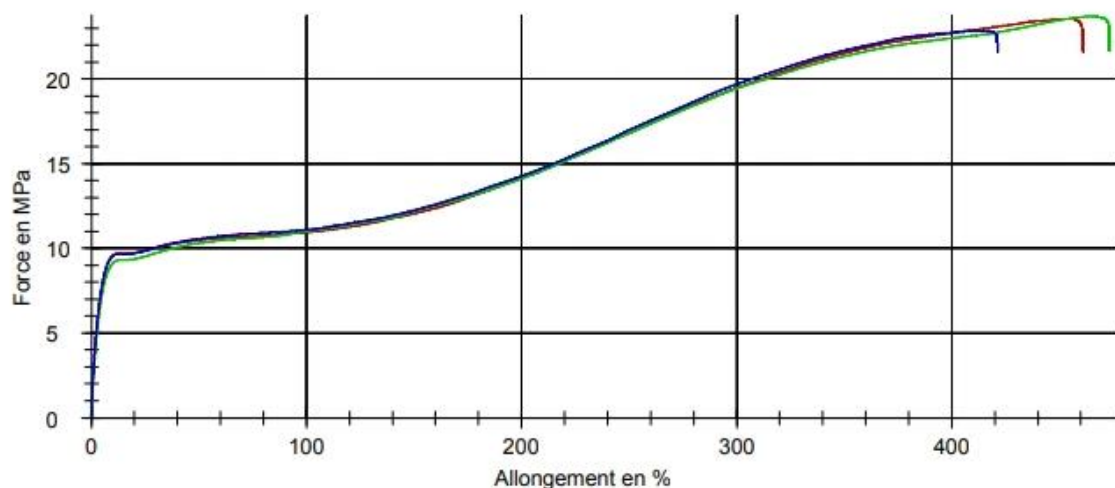


Figure 4.17: Courbe de traction du PRC pur.

La figure (4.17) met en évidence le comportement ductile du PRC pur : une phase élastique suivie d'un écoulement plastique stable, puis un durcissement par orientation moléculaire jusqu'à une rupture au-delà de 467,1 % d'allongement. La force maximale atteint autour de 23,6 MPa.

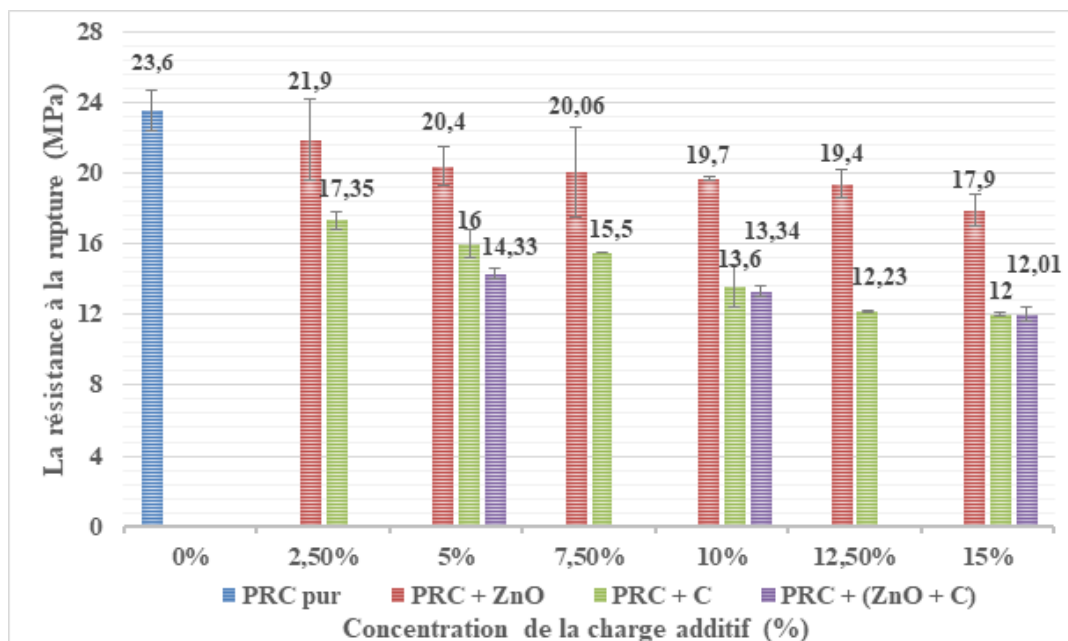


Figure 4.18: La résistance à la traction en fonction de la concentration de la charge additif.

D'après la figure (4.18), on observe que la résistance à la traction diminue avec l'augmentation de la concentration du matériau additif individuel et multiple. Sachant que la résistance à la traction est maximum dans le cas de PRC pur qui atteint 23,33 MPa. La diminution de cette contrainte en fonction de la charge de graphite naturel et de l'ensemble de l'oxyde de zinc et du graphite naturel est plus significative par rapport à la charge d'oxyde de zinc.

Elle atteint son minimum de 17,9 Mpa, 12 MPa, 12,01 MPa à 15 % de la charge de l'oxyde de zinc, graphite naturel et l'ensemble de celle-ci, respectivement.

La figure (4.19) montre l'évolution de l'allongement à la rupture du PRC pur et des matériaux composites préparés à différentes quantités de dopants.

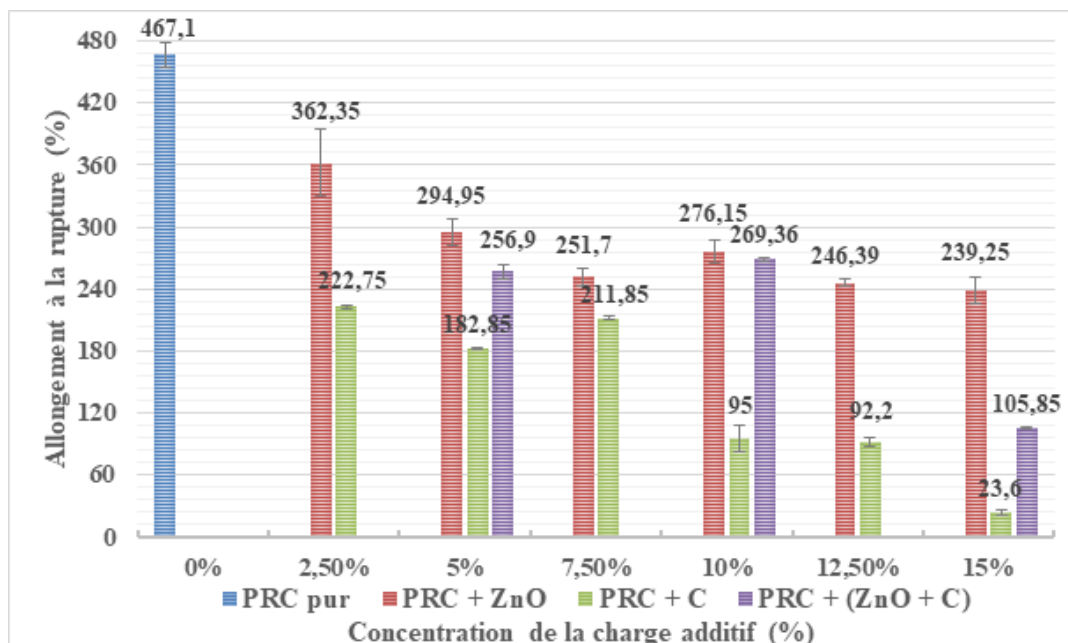


Figure 4.19: L'allongement à la rupture en fonction de la concentration de la charge additif.

L'allongement à la rupture est maximum dans le cas où le PRC est pur : il atteint 451,7 %. Dans le composite PRC dopé du l'oxyde de zinc, l'allongement à la rupture diminue jusqu'à 7,5 % de cette charge, atteint 251,7 %, puis est suivi d'une légère augmentation à 10 %. Au-delà de cette concentration, il y'a une baisse notable de cette grandeur qui continue de se diminuer en fonction de la concentration de cette charge et il atteint son minimum de 239,25 % à 15 % de la charge de l'oxyde de zinc.

Dans le composite PRC dopé du graphite naturel, l'allongement à la rupture diminue jusqu'à 5 %. Il atteint 175,7 %. Cependant, à 7,5 %, l'allongement à la rupture augmente légèrement pour atteindre 211,85 %. Au-delà de cette charge, une baisse notable de cette caractérisation se produit

et elle atteint son minimum de 29 % à 15 %.

L'allongement à la rupture atteint 256,9 % à 5 % de l'ensemble de l'oxyde de zinc et du graphite naturel, puis il suit une légère augmentation pour atteindre 282,5 % à 10 %. Il atteint son minimum de 105,85 % à 15 % de cette charge.

IV.6 Conclusion

Dans ce chapitre, des mesures expérimentales sont réalisées afin d'étudier les propriétés électriques, chimiques et mécaniques des composites à base de PRC. Différentes particules inorganiques sont incorporées, notamment du graphite naturel, de l'oxyde de zinc ainsi que l'ensemble de l'oxyde de zinc et du graphite naturel.

Les résultats montrent que l'incorporation de particules de ZnO dans la matrice PRC améliore la rigidité diélectrique du composite. Cette amélioration est plus marquée pour toutes les charges testées. En revanche, l'ajout de graphite naturel et l'ensemble de l'oxyde de zinc et du graphite naturel entraîne une diminution de la rigidité diélectrique. Ce phénomène pourrait s'expliquer par les limitations du graphite naturel, notamment sa faible adhésion à la matrice polymère.

Les résultats obtenus indiquent qu'une faible concentration de particules de ZnO, jusqu'à 7,5 %, améliore significativement la rigidité diélectrique, un paramètre clé pour évaluer l'aptitude des composites développés à être utilisés comme isolants haute tension. La rigidité diélectrique atteint un maximum de 66,9 kV/mm, soit une augmentation d'environ 5,85 %, à une concentration de 7,5 % de ZnO.

Nous constatons que, une concentration plus élevée entraîne une agglomération des particules, ce qui réduit considérablement la rigidité diélectrique.

L'ajout d'oxyde de zinc, de graphite naturel et l'ensemble de l'oxyde de zinc et du graphite naturel détériore les propriétés mécaniques du matériau, notamment la résistance à la traction et l'allongement à la rupture. Les meilleures performances mécaniques sont obtenues avec le PRC pur, qui présente une résistance à la traction de 23,6 MPa et un allongement à la rupture de 467,1 %.

CONCLUSION

GENERALE

Les câbles à très haute tension sont de plus en plus utilisés pour transporter de l'électricité sur de longues distances. Cependant, plus la tension augmente, moins l'isolation des câbles est efficace. Actuellement, le matériau utilisé pour l'isolation des câbles HVDC est principalement le polyéthylène basse densité. Pour diminuer la conductivité de ce dernier, des additifs sont incorporés dans le plastique, tels que polyéthylène haute densité, des particules d'oxydes métalliques, des allotropies du carbone ou diverses molécules aromatiques. Ces additifs piègent les charges électriques et réduisent leur mobilité, ce qui permet de diminuer la conductivité électrique.

Des nombreux facteurs environnementaux et opérationnels susceptibles influencent la longévité des câbles électriques en service. Les matériaux utilisés dans l'isolation et la gaine extérieure des câbles se dégradent avec le temps lorsqu'ils sont exposés à la chaleur, aux rayons UV, à l'ozone, à divers produits chimiques, à une flexion excessive ou à une action mécanique.

Lorsqu'un courant traverse le conducteur du câble, il génère de la chaleur : plus le courant est élevé, plus la chaleur produite est importante. Cela peut avoir un impact significatif si le conducteur est sous-dimensionné ou s'il fonctionne en continu à l'intensité maximale.

Pour que les gestionnaires de réseau de distribution puissent exploiter les câbles le plus longtemps possible sans compromettre la sécurité d'approvisionnement, il est essentiel de connaître précisément leur état. De nombreux exploitants ont recours à la mesure de décharges partielles et l'angle de perte afin de détecter les points faibles et prévenir les pannes.

Le présent travail s'inscrit dans le cadre d'une thématique de recherche vise à étudier de nouveaux matériaux composites utilisés dans la technologie des câbles souterrain à haute tension. Pour atteindre cet objectif, nous menons des études théorique, numérique et expérimentale des différentes caractéristiques des nouveaux matériaux élaborés.

Notre contribution significative consiste à prédire la performance des matériaux en service et à proposer des améliorations aux formulations existantes. Ensuite, nous développons un matériau qui présente des propriétés électriques adéquates aux différentes couches du câble souterrain à haute tension, en utilisant le concept de composite avec diverses charges telles que le graphite naturel, le germanium et l'oxyde de zinc, et différents pourcentages de concentration de la charge.

Nous élaborons ainsi plusieurs matériaux composites dont les matrices sont à base des polymères PRC, intégrant différentes charges de ZnO et de graphite naturel, avec des concentrations variant de 2,5% à 15%, avec un pas de 2,5%.

Les résultats indiquent que :

- L'intensité du champ électrique se contrôle en modifiant la permittivité relative des diélectriques par l'ajout de particules simples ou multiples ;
- La réduction de la distribution du champ électrique en fonction de la concentration des matériaux additifs, individuelles ou multiples, dans la couche isolante est la plus significatives comparées aux autres couches du câble électrique souterrain à haute tension ;
- Le champ électrique augmente dans les couches semi conductrices interne et externe des matériaux composites ;
- Le claquage électrique reste l'un des majeurs problèmes et inconvénients de ce genre d'isolation ;
- Les matériaux additifs améliorent ou dégradent la rigidité diélectrique.
- L'ajout de 7,5% de la charge ZnO induit à une meilleure tenue de claquage qui est environ de 66,90 kV/mm entre toutes autres types et concentration de charges avec une amélioration d'environ 6,85% ;
- La mise sous champ électrique intense provoque des micros arborescences dans le matériau, qui conduisent au claquage électrique de l'isolant.
- La distribution du potentiel et du champ électrique se détermine en résolvant l'équation de Poisson à l'aide de la méthode des différences finies.
- Les propriétés électriques essentielles qui influencent le fonctionnement optimal des câbles à haute tension en courant continu (HVDC) sont étudiées et analysées numériquement.
- Les résultats de la simulation numérique pour les différentes parties du câble en présence de décharges partielles sont présentés et interprétés.
- L'intégration de particules de ZnO dans la matrice de PRC améliore la rigidité diélectrique du polymère, tandis que l'ajout de graphite naturel ainsi que l'effet hybride la diminue.
- La rigidité diélectrique en courant alternatif (AC) atteint une valeur maximale de 66,9 kV/mm, soit une amélioration d'environ 5,85 % pour une concentration de 7,5 % en particules de ZnO.
- Des concentrations plus élevées en ZnO entraîne une diminution de la rigidité diélectrique en courant alternatif (AC).

- Par ailleurs, l'ajout de ces particules dégrade les propriétés mécaniques du PRC et les meilleures performances mécaniques, notamment en termes de résistance à la traction et d'allongement à la rupture, sont obtenues avec le PRC pure.

Ces travaux ouvrent de nombreuses perspectives. Pour les systèmes de transport d'énergie électriques, les axes de recherche dans les prochaines années devraient porter sur l'augmentation de leur disponibilité. Nous retenons les axes de recherches essentiels suivants :

- ✓ L'analyse des produits de dégradation du matériau étudié, à l'aide de méthodes physico-chimiques, est à envisager dans le cadre de la suite à donner à ce travail ;
- ✓ La mesure des paramètres diélectriques en fonction de la température et en fonction de la fréquence par la spectroscopie d'impédance-mètre ;
- ✓ La mesure de la charge d'espace dans les nouveaux matériaux composites élaborés, à l'aide de la méthode électro-acoustique à impulsions ;
- ✓ L'étude approfondie de l'effet de la température sur les décharges partielles sous contrainte de tension continue et alternatif ;
- ✓ L'ouverture d'un nouveau champ de recherche sur la conception et l'optimisation de plastique aux propriétés électriques avancées, destinés au transport et au stockage de l'énergie.

REFERENCES

BIBLIOGRAPHIQUES

-
- [1] P. Ocloń, M. Bittelli, P. Cisek, E. Kroener, M. Pilarczyk, D. Taler, R. V. Rao, and A. Vallati, 'The performance analysis of a new thermal backfill material for underground power cable system', *Applied Thermal Engineering*, vol. 108, pp. 233-250, 2016.
<https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2016.07.102>
- [2] M. Santos and M. A. Calafat, 'Dynamic simulation of induced voltages in high voltage cable sheaths: Steady state approach', *International Journal of Electrical Power & Energy*, vol. 105, pp. 1-16, 2019.
<https://doi.org/10.1016/j.ijepes.2018.08.003>
- [3] M. Shafiq, I. Kiitam, P. Taklaja, L. Kütt, K. Kauhaniemi, and I. Palu, 'Identification and location of PD defects in medium voltage underground power cables using high frequency current transformer', *IEEE Access*, vol. 7, pp. 103608-103618, 2019.
<https://doi.org/10.1109/ACCESS.2019.2930704>
- [4] C. F. Jensen, *Online location of faults on AC cables in underground transmission systems*, First edition, Springer International Publishing, 2014.
ISBN: 978-3-319-05398-1
- [5] Y. Zhou, S. Peng, J. Hu, and J. He, 'Polymeric insulation materials for HVDC cables: Development, challenges and future perspective', *IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation*, vol. 24, no. 3, pp. 1308-1318, 2017.
<https://doi.org/10.1109/TDEI.2017.006205>
- [6] J. O. Bostrom, E. Marsden, R. N. Hampton, and U. Nilsson, 'Electrical stress enhancement of contaminants in XLPE insulation used for power cables', *IEEE Electrical Insulation Magazine*, vol. 19, no. 4, pp. 6-12, 2003.
<https://doi.org/10.1109/MEI.2003.1226729>
- [7] P. Argaut, *Accessories for HV and EHV extruded cables*, First edition, Springer Nature Switzerland AG, 2021. ISBN: 978-3-030-39465-3
- [8] Y. Liu and X. Cao, 'Insulation performance evaluation of HV AC/DC XLPE cables by 0.1 Hz $\tan\delta$ test on circumferentially peeled samples', *IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation*, vol. 24, no. 6, pp. 3941-3950, 2017.
<https://doi.org/10.1109/TDEI.2017.006618>
- [9] A. Thabet, 'effect of nanoparticles on water treeing characteristics in XLPE industrial insulating materials', *Journal of Engineering Sciences*, vol. 40, no. 1, pp. 191-208, 2012.
- [10] S. J. Kim, K. H. Ji, and S. H. Paik, 'Numerical simulation of mechanical behavior of composite structures by supercomputing technology', *Advanced Composite Materials*, vol. 17, no. 4, pp. 373-407, 2008.
<https://doi.org/10.1163/156855108X385339>

- [11] I. Pleşa, P. V. Noñinger, C. Stancu, F. Wiesbrock, and S. Schlögl, 'Polyethylene nanocomposites for power cable insulations', *Polymers (Basel)*, vol. 11, no. 1, pp. 24-85, 2018.
<https://doi.org/10.3390/polym11010024>
- [12] R. Hsissou, R. Seghiri, Z. Benzekri, M. Hilali, M. Rafik, and A. Elharfi, 'Polymer composite materials: A comprehensive review', *Composite Structures*, vol. 262, pp. 113640-113655, 2021.
<https://doi.org/10.1016/j.compstruct.2021.113640>
- [13] RTE, 100 ans de haute tension à Paris, sous les pavés les câbles, France, 2011.
- [14] L. Millière, 'Maîtrise des interfaces pour le contrôle de l'injection de charges dans les polymères isolants électriques', Thèse de doctorat, Université Paul Sabatier–Toulouse III, France, 2015.
- [15] G. Chen, M. Hao, Z. Xu, A. Vaughan, J. Cao, and H. Wang, 'Review of high voltage direct current cables', *CSEE Journal of Power and Energy Systems*, vol. 1, no. 2, pp. 9-21, 2015.
<https://doi.org/10.17775/CSEEJPES.2015.00015>.
- [16] Y. Murata., 'Development of high voltage DC-XLPE cable system', *SEI Tech. Rev*, vol. 101, pp. 55–62, 2013.
- [17] D. Kavitha, and M. Balachandran, 'XLPE-layered silicate nanocomposites for high voltage insulation applications: Dielectric characteristics, treeing behaviour and mechanical properties', *IET Science, Measurement & Technology*, vol. 13, no. 7, pp. 1019-1025, 2019.
<https://doi.org/10.1049/iet-smt.2018.5417>
- [18] M. Andersson, 'polyethylene blends, a material concept for future hvdc-cable insulation', Chalmers TekniskaHogskola, Sweden, 2017.
- [19] R. Fang, 'Optimisation de l'insertion des liaisons souterraines dans le réseau électrique', Thèse de doctorat, Institut National Polytechnique de Grenoble (INPG), France, 1995.
- [20] C. T. Choo, 'Space charge determination in HVDC power cable and its influence on electric field', University of Southampton, England, 2010.
- [21] T. Worzyk, *Submarine Power Cables: Design, Installation, Repair, Environmental Aspects*, First edition, Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 2009.
ISBN: 978-3-642-01270-9

- [22] P. Gill, Electrical power equipment maintenance and testing, CRC press, second edition, 2016.
[ISBN: 978157444-656-2](#)
- [23] G. Mazzanti, and M. Marzinotto, Extruded cables for high-voltage direct-current transmission: advances in research and development, IEEE Press, First edition, 2013.
[ISBN 978-1-118-09666-6](#)
- [24] E. Ouatah, 'Etude du signal de décharge partielle dans les câbles de transmission', Thèse de doctorat, Université de Bejaïa, 2015.
- [25] G. Chen, and Z. Xu, 'Polypropylene laminated paper (PPLP) insulation for HVDC power cables', 12th International Conference on the Properties and Applications of Dielectric Materials (ICPADM), IEEE. pp. 28-32, 2018.
<https://doi.org/10.1109/ICPADM.2018.8401279>
- [26] D. Bouguedad, 'Influence du vieillissement thermique sur les propriétés de l'éthylène propylène diène monomère (EPDM) ', Thèse de doctorat, Université de Tizi Ouzou, 2010.
- [27] J. W. Summers, 'A review of vinyl technology', Journal of Vinyl and Additive Technology, vol. 3, no. 2, pp. 130-139, 1997.
<https://doi.org/10.1002/vnl.10179>
- [28] N. A. Mohamed, and M. W. Sabaa, 'Thermal degradation behaviour of poly (vinylchloride)- poly (vinyl butyral) blends', European Polymer Journal, vol. 35, no. 9, pp. 1731-1737, 1999.
[https://doi.org/10.1016/S0014-3057\(98\)00257-2](https://doi.org/10.1016/S0014-3057(98)00257-2)
- [29] B. Colin, B, and H. Brian, Transmission and distribution electrical engineering, Fourth edition, Elsevier, 2012.
[ISBN: 978-0-08-096912-1](#)
- [30] L. Madani, 'Etude du comportement diélectrique des isolateurs en composite', Thèse de doctorat, Université de Sétif, 2018.
- [31] A. Laifaoui, 'Etude de la tenue diélectrique des gaines en polychlorure de vinyle sous tension alternative et continue', Thèse de doctorat, Université de Bejaia, 2016.
- [32] Z. Hruska, P. Guesnet, C. Salin, and J. -J. Couchoud, Poly (chlorure de vinyle) ou PVC, Techniques Ingénieur. vol. AM3325, 2007.
- [33] Q. Pelzer, 'Étude du vieillissement des isolants synthétiques des câbles moyenne tension" HTA', Thèse de doctorat, Université Grenoble Alpes, France, 2019.

- [34] T. Seghier, 'Etude des décharges partielles et leurs influences sur l'apparition des arborescences dans la couche isolante des câbles haute tension', Thèse de doctorat, Université de Biskra, 2011.
- [35] L. Boukezzi, 'Influence du vieillissement thermique sur les propriétés du polyéthylène réticulé chimiquement utilisé dans l'isolation des câbles de haute tension', Thèse de doctorat, Ecole Nationale Polytechnique, 2007.
- [36] A. Hedir, F. Slimani, M. Moudoud, F. Bellabas, and A. Loucif, 'Impact of thermal constraint on the low-density polyethylene (LDPE) properties', Proceedings of the 21st International Symposium on High Voltage Engineering, Springer, Cham, vol. 2, pp. 952-960, 2020.
https://doi.org/10.1007/978-3-030-31680-8_92
- [37] P. Maréchal, Polyéthylènes basse densité PE-BD et PE-BDL, Techniques de l'ingénieur, vol. AM3310, 2011.
- [38] C. Penu, Polyéthylène haute densité PE-HD, Techniques de l'ingénieur, vol. AM3315, 2011.
- [39] V. Vahedy, 'Polymer insulated high voltage cables', IEEE Electrical Insulation Magazine, vol. 22, no. 3, pp. 13-08, 2006.
<https://doi.org/10.1109/MEL.2006.1639025>
- [40] A. Bhattacharya, 'Radiation and industrial polymers', Progress in Polymer Science, vol. 25, no. 3, pp. 371-401, 2000.
[https://doi.org/10.1016/S0079-6700\(00\)00009-5](https://doi.org/10.1016/S0079-6700(00)00009-5)
- [41] M. Lazar, R. Rado, and J. Rychly, 'Crosslinking of polyolefins', Polymer Physics. Advances in Polymer Science, Springer, Berlin, Heidelberg, vol. 95, pp. 149-197, 1990.
<https://doi.org/10.1007/3-540-52159-3-8>
- [42] M. Shan-jun, Z. Jun, L. Dong, and C. Hong-yin, 'Study on pyrolysis characteristics of cross-linked polyethylene material cable', Procedia Engineering, vol. 52, pp. 588-592, 2013.
<https://doi.org/10.1016/j.proeng.2013.02.190>
- [43] M. A. Habib, L. S. Nasart, and R. M. Sharkawy, 'Improvement the electrical performance of cross-linked polyethylene high voltage cables', Eighteenth International Middle East Power Systems Conference (MEPCON), IEEE, pp. 21-25, 2016.
<https://doi.org/10.1109/MEPCON.2016.7836866>.
- [44] W. A. Thue, Electrical power cable engineering. third edition, CRC Press, 2017.
ISBN: 13:978-1 4398-5645-1

- [45] S. Abdelkader, ‘ Analyse des Terminaisons d’Eau’, Thèse de doctorat, Université d’Oran, 2017.
- [46] Q. Wang, C. Tang, G. Wu, and G. Chen, ‘Fault location in the outer sheath of power cables’, Journal of Power Technologies, vol. 94, no. 4, 250-258. 2014.
[ISSN: 2083-4187](#)
- [47] T. Wildi, and G. Sybille, Electrotechnique, Fourth edition, de boeck, 2005.
[ISBN: PUL 2-7637-8185-3](#)
- [48] P. Robert, Matériaux de l’électrotechnique, Ed Dunod, Lausanne : P.P.U.R. Volume 2 : 1989.
[ISBN: 978-2-88074-419-9](#)
- [49] P. Quennehen, ‘ Etude de la dégradation de la fonction isolation de câbles HT isolés au PVC’, Thèse de doctorat, Université de Grenoble, France, 2014.
- [50] K. Benhabiles, ‘ Evolution de la résistivité électrique des isolations PVC des câbles de centrales en fonction du vieillissement thermique et de la diffusion des plastifiants des différents constituants’, Thèse de doctorat, Ecole nationale supérieure d’arts et métiers, France, 1994.
- [51] A. V. Hippel, Dielectrics and waves, Second edition, Artech House Publishers, 1994.
[ISBN-10: 0890068038](#)
- [52] S. Orłowska, ‘ Conception et prédiction des caractéristiques diélectriques des matériaux composites à deux et trois phases par la modélisation et la validation expérimentale’, Thèse de doctorat, Ecole Centrale de Lyon, France, 2003.
- [53] N. Guettaf, H. Ait Said, M. Aissou, T. Zeghloul, and H. Nouri, ‘Modeling a corona discharge separation of fine particles for different materials used in electrical engineering’, Advanced Engineering Forum, Trans Tech Publications, Ltd., vol. 54, pp. 77-90, 2025.
<https://doi.org/10.4028/p-U8GCnx>
- [54] J. Paletto, R. Goutte, and L. Eyraud, ‘Theorie approchée de la permittivité diélectrique d’un mélange’, Journal of Solid State Chemistry, vol. 6, no. 1, pp. 58-66, 1973.
[https://doi.org/10.1016/0022-4596\(73\)90204-1](https://doi.org/10.1016/0022-4596(73)90204-1)
- [55] N. Berrabah, ‘ Problèmes inverses pour le diagnostic de câbles électriques à partir de mesures de réflectométrie’, Thèse de doctorat, Université de Rennes 1, France, 2017.

- [56] O. Ghermoul, 'Contribution à l'étude du comportement des isolateurs de haute tension pollués par différentes méthodes', Thèse de Doctorat, Université de M'sila, 2024.
- [57] F. Hassaine, L. Madani, N. Guettaf, S. Boumous, and H. Nouri, 'Influence of composite materials on the electric field distribution of a high voltage cable', *Diagnostyka*, vol. 25, no. 3, pp. 1-10, 2024.
<https://doi.org/10.29354/diag/192412>
- [58] H. O. Pierson, *Handbook of carbon, graphite, diamonds and fullerenes: processing, properties and applications*, First edition, William Andrew, 2012.
ISBN: 0-8155-1339-9
- [59] J.-L. Tsai, and J. F. Tu, 'Characterizing mechanical properties of graphite using molecular dynamics simulation', *Materials & Design*, vol. 31, no. 1, pp. 194-199, 2010.
<https://doi.org/10.1016/j.matdes.2009.06.032>
- [60] T. D. Burchell, and T. R. Pavlov, 'Graphite: properties and characteristics', *Comprehensive Nuclear Materials: Second Edition*: Elsevier, pp. 355-381. 2020
<https://doi.org/10.1016/B978-0-12-803581-8.11777-1>
- [61] B. McEnaney, 'Carbons and Graphites, Mechanical Properties of', *Encyclopedia of Materials: Science and Technology*, pp. 967-975, 2001.
<https://doi.org/10.1016/B0-08-043152-6/00181-9>
- [62] I. Roy, R. Lewis, M. P. Marya, and P. Ganguly, 'Evaluation of Low Resistivity Low Contrast Productive Formations', United States patent Application, No 13/796,727. 2014.
- [63] D. D. L. Chung, 'Review graphite', *Journal of materials science*, vol. 37, pp. 1475-1489, 2002.
<https://doi.org/10.1023/A:1014915307738>
- [64] R. Ghomri, 'Étude des propriétés de l'oxyde de zinc non dopé et dopé', Thèse de Doctorat, Université de Annaba, 2017.
- [65] Y. Bakha, 'Propriétés optoélectroniques de l 'oxyde de zinc préparé chimiquement, phénomènes d'adsorption et application à la détection des gaz', Thèse de Doctorat, Université de Oran, 2013.
- [66] R. Ghomri, M. N. Shaikh, M. I. Ahmed, M. Bououdina, and M. Ghers, '(Al, Er) co-doped ZnO nanoparticles for photodegradation of rhodamine blue', *Applied Physics A*, vol. 122, pp. 1-9, 2016.
<https://doi.org/10.1007/s00339-016-0417-9>

- [67] V. A. Coleman, J. E. Bradby, C. Jagadish, P. Munroe, Y. W. Heo, S. J. Pearton, D. P. Norton, M. Inoue, and M. Yano, 'Mechanical properties of ZnO epitaxial layers grown on a-and c-axis sapphire', *Applied Physics Letters*, vol. 86, no. 20, pp. 203105-203108 2005. <https://doi.org/10.1063/1.1929874>
- [68] M. Caglar, S. Ilican, Y. Caglar, and F. Yakuphanoglu, 'Electrical conductivity and optical properties of ZnO nanostructured thin film', *Applied surface science*, vol. 255, no. 8, pp. 4491-4496, 2009. <https://doi.org/10.1016/j.apsusc.2008.11.055>
- [69] S. J. Chen, Y. C. Liu, H. Jiang, Y. M. Lu, J. Y. Zhang, D. Z. Shen, and X. W. Fan, 'Raman and photoluminescence studies on nanocrystalline ZnO grown on GaInPAs substrates', *Journal of crystal growth*, vol. 285, no. 1-2, pp. 24-30, 2005. <https://doi.org/10.1016/j.jcrysgro.2005.07.036>
- [70] S. O. Kucheyev, J. E. Bradby, J. S. Williams, C. Jagadish, and M. Swain, 'Mechanical deformation of single-crystal ZnO', *Applied Physics Letters*, vol. 80, no. 6, pp. 956-958, 2002. <https://doi.org/10.1063/1.1448175>
- [71] Y. G. Habba, 'Étude des nanostructures de ZnO pour leur application dans l'environnement : détection de gaz et dépollution de l'eau', Thèse de Doctorat, Université Paris-Est, France, 2017.
- [72] J. K. Nayak, P. R. Chaudhuri, S. Ratha, and M. R. Sahoo, 'A comprehensive review on effective medium theories to find effective dielectric constant of composites', *Journal of Electromagnetic Waves and Applications*, vol. 37, no 2, pp. 282-322, 2023. <https://doi.org/10.1080/09205071.2022.2135029>
- [73] V. D. Bruggeman, 'Berechnung verschiedener physikalischer Konstanten von heterogenen Substanzen. I. Dielektrizitätskonstanten und Leitfähigkeiten der Mischkörper aus isotropen Substanzen', *Annalen der Physik*, vol. 416, no. 7, pp. 636-664, 1935. <https://doi.org/10.1002/andp.19354160705>
- [74] C. Pecharrromán, and J. Iglesias, 'Effective dielectric properties of packed mixtures of insulator particles', *Physical Review B*, vol. 49, no. 11, pp. 7137-7147, 1994. <https://doi.org/10.1103/PhysRevB.49.7137>
- [75] J. P. Calame, A. Birman, Y. Carmel, D. Gershon, B. Levush, A. A. Sorokin, V. E. Semenov, D. Dadon, L. P. Martin, and M. Rosen, 'A dielectric mixing law for porous ceramics based on fractal boundaries', *Journal of applied physics*, vol. 80, no. 7, pp. 3992-4000, 1996. <https://doi.org/10.1063/1.363357>

- [76] E. Tuncer, Y. V. Serdyuk, and S. M. Gubanski, 'Dielectric mixtures: electrical properties and modeling', IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, vol. 9, no. 5, pp. 809-828, 2002.
<https://doi.org/10.1109/TDEI.2002.1038664>
- [77] K. K. Karkkainen, A. H. Sihvola, and K. I. Nikoskinen, 'Effective permittivity of mixtures: numerical validation by the FDTD method', IEEE transactions on geoscience and remote sensing, vol. 38, no. 3, pp. 1303-1308, 2002.
<https://doi.org/10.1109/36.843023>
- [78] H. Khouni, 'Modélisation et simulation numérique de mélanges de matériaux diélectriques binaire et ternaire', Thèse de Doctorat, Université de M'sila, 2017.
- [79] Y. Wu, X. Zhao, F. Li, and Z. Fan, 'Evaluation of mixing rules for dielectric constants of composite dielectrics by MC-FEM calculation on 3D cubic lattice', Journal of Electroceramics, vol. 11, pp. 227-239, 2003.
<https://doi.org/10.1023/B:JECR.0000026377.48598.4d>
- [80] H. Looyenga, 'Dielectric constants of heterogeneous mixtures', Physica, vol. 31, no. 3, pp. 401-406, 1965.
[https://doi.org/10.1016/0031-8914\(65\)90045-5](https://doi.org/10.1016/0031-8914(65)90045-5)
- [81] N. Maron, and O. Maron, 'Criteria for mixing rules application for inhomogeneous astrophysical grains', Monthly Notices of the Royal Astronomical Society, vol. 391, no. 2, pp. 738-764, 2008.
<https://doi.org/10.1111/j.1365-2966.2008.13908.x>
- [82] J. Widjajakusuma, B. Biswal, and R. Hilfer, 'Quantitative comparison of mean field mixing laws for conductivity and dielectric constants of porous media', Physica A: Statistical Mechanics and its Applications, vol. 318, no. 3-4, pp. 319-333, 2003.
[https://doi.org/10.1016/S0378-4371\(02\)01197-4](https://doi.org/10.1016/S0378-4371(02)01197-4)
- [83] H. Bakhti, 'Caractérisation diélectrique d'un mélange de Titanate et d'oxyde (Résine époxyde, BaTiO₃, Cu₂O) fritté en fonction de la fréquence', Thèse de Doctorat, Université de Sétif, 2018.
- [84] L. Bouledjib, 'Investigations sur l'évolution de la constante diélectrique dans les matériaux hétérogènes. Applications aux couches minces déposées par plasma à partir de vapeurs de DPMS', Thèse de Doctorat, Université de Constantine, 2012.
- [85] Shanghai Shenghua Cable (Group) Co., Ltd; High voltage three phase XLPE insulated steel wire armoured electrical cable CU/ XLPE/SWA/PVC power cable 33 kV, 1997.

-
- [86] D. Abarna, B. Vigneshwaran, and M. W. I. R. Maheswari, 'Influence The Effect Of Cavity Size And Position In High Voltage Cable By Using Finite Element Method', vol. 9, no. 2, pp. 2706-2710, 2020.
- [87] G. Eranna, *Crystal Growth and Evaluation of Silicon for VLSI and ULSI*, First edition, CRC Press, 2015.
[ISBN: 978-1-4822-3282-0](#)
- [88] G. F. Moore, *Electric cables handbook*, Third edition, Blackwell Science, 1997.
[ISBN: 9780632040759](#)
- [89] J. Kruželák, A. Kvasničáková, K. Hložeková, and I. Hudec, 'Progress in polymers and polymer composites used as efficient materials for EMI shielding', *Nanoscale Advances*, vol. 3, no. 1, pp. 123-172, 2021.
<https://doi.org/10.1039/D0NA00760A>
- [90] K. Chung, A. Sabo, and A. Pica, 'Electrical permittivity and conductivity of carbon black-polyvinyl chloride composites', *Journal of Applied Physics*, vol. 53, no. 10, pp. 6867-6879, 1982.
<https://doi.org/10.1063/1.330027>
- [91] B. Alemour, M. Yaacob, H. Lim, and M. R. Hassan, 'Review of Electrical Properties of Graphene Conductive Composites', *International Journal of Nanoelectronics & Materials*, vol. 11, no. 4, 2018.
- [92] E. Khouildi, R. Attia, and N. Chtourou, 'Numerical modeling of the electric field and the potential distributions in heterogeneous cavities inside XLPE power cable insulation', *Journal of electrical and electronics engineering*, vol. 9, no. 2, pp. 37-42, 2016.
- [93] T. Zakri, J. P. Laurent, and M. Vauclin, 'Theoretical evidence for Lichtenecker's mixture formulae based on the effective medium theory', *Journal of Physics D: Applied Physics*, vol. 31, no. 13, pp. 1589-1594, 1998.
<https://doi.org/10.1088/0022-3727/31/13/013>
- [94] F. Hassaine, H. Nouri, H. Ait Said, K. Meziane, and M. Aissou, 'Modeling and simulation of the influence of dielectric cavity on the HVDC transmission cable', *Acta Physica Polonica A*, vol. 147, no. 2, pp. 116-123, 2025.
<https://doi.org/10.12693/APhysPolA.147.116>
- [95] M. H. Rashid, *Power electronics handbook*, Fourth Edition, Elsevier, 2017.
[ISBN: 978-0-12-811407-0](#)

- [96] H. Ghorbani, M. Jeroense, C. Olsson, M. Saltzer, 'HVDC Cable Systems - Highlighting extruded technology', IEEE Transactions on Power Delivery, vol. 29, no. 1, pp. 414-421, 2014.
<https://doi.org/10.1109/TPWRD.2013.2278717>
- [97] Y. Späck-Leigsnering, G. Ruppert, E. Gjonaj, H. De Gersem, and M. Koch, 'Towards electrothermal optimization of a hvdc cable joint based on field simulation', Energies, vol. 14, no. 10, pp. 2848-2861, 2021.
<https://doi.org/10.3390/en14102848>
- [98] S. J. Frobin, C. F. Niedik, C. Freye, F. Jenau, D. Häring, and G. Schröder, 'A Generic Approach for HVDC Cable Accessories Modelling', 2nd International conference on dielectrics (ICD), IEEE, pp. 1-6, 2018.
<https://doi.org/10.1109/ICD.2018.8514703>
- [99] H. Nouri, A. Tabbel, N. Douib, H. Aitsaid, and Y. Zebboudj, 'Numerical analyze of coronadischarge on HVDC transmission lines', World Academy of Science, Engineering and Technology Electrical and Computer Engineering, vol. 2, no. 5, pp. 1565-1569, 2015.
- [100] A. S. Bhangaonkar, and S. V. Kulkarni, 'Approaches for Numerical Simulation of Partial Discharges', IEEE International Power Modulators and High-Voltage Conference, pp. 572-575, 2008.
<https://doi.org/10.1109/IPMC.2008.4743723>
- [101] J. Wang, R. Guo, A. Ping, T. Liu, S. Han, and Q. Li, 'Research on numerical simulation for partial discharge of epoxy interface excited by high-frequency sinusoidal voltage', IET, High Voltage, vol. 7, no. 3, pp. 1-13, 2021.
<https://doi.org/10.1049/hve2.12156>
- [102] E. Ouatah, S. Megherfi, K. Haroun, and Y. Zebboudj, 'Characteristics of Partial Discharge Pulses Propagation in Shielded Power Cable', Electric Power Systems Research, vol. 99, pp 38-44, 2013.
<https://doi.org/10.1016/j.epsr.2013.01.012>
- [103] J. M. Rodríguez-Serna, R. Albarracín-Sánchez, A. A. Mas'ud, 'Finite-element-analysis models for numerical simulation of partial discharges in spherical cavities within solid dielectrics, A review and a novel method', IET, High voltage, vol. 5, no. 5, pp. 556-568, 2020.
<https://doi.org/10.1049/hve.2019.0392>
- [104] N. Oussalah, Y. Zebboudj and S. A. Boggs, 'Analytic Solutions for Pulse Propagation in Shielded Power Cable for Symmetric and Asymmetric PD Pulses', IEEE Transactions on

- Dielectrics and Electrical Insulation, vol. 14, no. 5, pp. 1264-1270, 2007.
<https://doi.org/10.1109/TDEI.2007.4339487>
- [105] D. Pommerenke, R. Jobava, and R. Heinrich, 'Numerical simulation of partial discharge propagation in cable joints using the finite difference time domain method', IEEE Electrical Insulation Magazine, vol. 18, no. 6, pp. 6-11, 2002.
<https://doi.org/10.1109/MEI.2002.1161454>
- [106] A. Toureille, J.-P. Reboul, and P. Merle, 'Détermination des densités de charge d'espace dans les isolants solides par la méthode de l'onde thermique', Journal de Physique III France, vol. 1, no. 1, pp. 111-123, 1991.
<https://doi.org/10.1051/jp3:1991254>
- [107] H. Nouri, H. Ait Said, Y. Zebboudj, N. Zouzou, and L. Dascalescu, 'Analysis of Electric Field and Current density in an Electrostatic Precipitator', IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, vol. 23, no. 2, pp. 665-670, 2016.
<https://doi.org/10.1109/TDEI.2015.005324>
- [108] H. Nouri, M. Aissou, H. Ait Said, Y. Zebboudj, 'Finite Element Method Investigation of Electrostatic Precipitator Performance', International Journal of Numerical Modelling: Electronic Networks, Devices and Fields, John & Wiley, vol. 28, no. 2, pp. 138-154, 2015.
<https://doi.org/10.1002/jnm.1992>
- [109] L. M. Dumitran, L. Dascalescu, P. Nothinger, and P. Atten, 'Modelling of corona discharge in cylinder wire plate electrode configuration', Journal of Electrostatics, Elsevier, vol. 65, no. 12, pp. 758-763, 2007.
<https://doi.org/10.1016/j.elstat.2007.05.011>
- [110] M. S. Mokrov, and Y. P. Raizer, 'Simulation of a positive corona discharge from a plane-parallel system of horizontal grounded wires in the electric field of a thundercloud', Plasma Physics Reports, vol. 47, pp. 568-587, 2021.
<https://doi.org/10.1134/S1063780X2106012X>
- [111] K. Adamiak, and P. Atten, 'Simulation of corona discharge in point-plane configuration', Journal Electrostatics, vol. 61, no. 2, pp. 85-98, 2004.
<https://doi.org/10.1016/j.elstat.2004.01.021>
- [112] H. Nouri, and Y. Zebboudj, 'Analysis of positive corona in wire-to-plate electrostatic precipitator', The European Physical Journal-Applied Physics, vol. 49, no. 1, pp. 11001-p1 11001-p9, 2010.
<https://doi.org/10.1051/epjap/2009181>

- [113] W. Deutsh, 'Bewegung und ladung der elektizitätsträgerimzylinderkondensator', Annalen der Physik, vol. 68, pp. 335-344, 1922.
<https://doi.org/10.1002/andp.19223731203>
- [114] N. A. Kaptzov, 'Elekricheskieinvlentia v gazakhivakuumme', OGIZ, Moscow, pp. 587–630, 1947.
- [115] V. I. Popkov, 'Elektrichestvo', vol. 1, pp. 33–48, 1949.
- [116] M. P. Sarma, and W. Janischewskyj, 'Analysis of corona losses on DC transmission lines Pt. I: Unipolar', IEEE Transactions on Power Systems, vol. PAS 88, no. 5, pp. 718-731, 1969.
<https://doi.org/10.1109/TPAS.1969.292362>
- [117] J. M. Townsend, 'Electricity in gases', Oxford university press, 1915.
- [118] L. A. Dissado, and J. C. Fothergill, Electrical Degradation and Breakdown in Polymers, First edition, IEE Materials and Devices Series 9, Peter Peregrinus Ltd., London, U.K., 1992.
ISBN 0-86341-196-7
- [119] A. Küchler, High Voltage Engineering, Fundamentals – Technology – Applications, First edition, VDI-Buch, Springer-Verlag GmbH Germany, 2017.
ISBN: 978-3-642-11993-4
- [120] F. Gutfleisch, and L. Niemeyer, 'Measurement and Simulation of PD in Epoxy Voids', IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, vol. 2, no. 5, pp 729-743, 1995.
<https://doi.org/10.1109/94.469970>
- [121] J. Sun, S. Pan, J. Deng, 'Research status of partial discharge detection of power transformer based on pulse current method', Journal of Physics: Conference Series, vol. 2195, no. 1, pp. 012024-012033, 2022.
<https://doi.org/10.1088/1742-6596/2195/1/012024>
- [122] E. Kuffel, W.S. Zaengl, and J. Kuffel, High Voltage Engineering Fundamentals, Second Edition, Butterworth-Heinemann, 2000.
ISBN: 9780750636346
- [123] A. Bossavit, C. Emson, and D. Mayergoyz, Méthodes numériques en électromagnétisme, Editions Eyrolles, 1991.
ISBN: 978-2-212-01625-3

- [124] H. J. Lee, and W. E. Schiesser, Ordinary and partial differential equation routines in C, C++, Fortran, Java, Maple and Matlab, Chapman & Hall/CRC press company, 2004.
[ISBN: 9780429214707](#)
- [125] A. A. Bunaciu, E. G. Udrişţioiu, and H. Y. Aboul-Enein, 'X-ray diffraction: instrumentation and applications', Critical reviews in analytical chemistry, vol. 45, no. 4, pp. 289-299, 2015.
<https://doi.org/10.1080/10408347.2014.949616>
- [126] B. S. Kwak, T. Jeon, A. R. Kim, E. Kim, J. K. Kim, Y. Min, and H. Park, 'Chemical Property Evaluation and Tensile Strength Correlation of XLPE Insulators Based on Accelerated Thermal Aging', Applied Sciences, vol. 13, no. 18, pp. 10516-10534, 2023.
<https://doi.org/10.3390/app13181051>
- [127] S. Qin, R. Liu, Q. Wang, X. Chen, Z. Shen, Z. Hou, and Z. Ju, 'Study on the molecular structure evolution of long-term-operation XLPE cable insulation materials', Energy Reports, vol. 8, pp. 1249-1256, 2022.
<https://doi.org/10.1016/j.egyr.2021.11.212>
- [128] H. F. McMurdie, M. C. Morris, E. H. Evans, B. Paretzkin, W. Wong-Ng, L. Ettlinger, and C. R. Hubbard, 'Standard X-ray diffraction powder patterns from the JCPDS research associateship', Powder diffraction, vol. 1, no. 2, pp. 64-77, 1986.
<https://doi.org/10.1017/S0885715600011593>
- [129] P. P. Mahamuni, P. M. Patil, M. J. Dhanavade, M. V. Badiger, P. G. Shadija, A. C. Lokhande, and R. A. Bohara, 'Synthesis and characterization of zinc oxide nanoparticles by using polyol chemistry for their antimicrobial and antibiofilm activity', Biochemistry and biophysics reports, vol. 17, pp. 71-80, 2019.
<https://doi.org/10.1016/j.bbrep.2018.11.007>
- [130] A. Popova, 'Crystallographic analysis of graphite by X-Ray diffraction', Coke and Chemistry vol. 60, pp. 361-365. 2017.
<https://doi.org/10.3103/S1068364X17090058>
- [131] M. Ding, W. He, J. Wang, and J. Wang, 'Performance evaluation of cross-linked polyethylene insulation of operating 110 kV power cables', Polymers, vol. 14, no. 11, pp. 2282-2297, 2022.
<https://doi.org/10.3390/polym14112282>
- [132] M. Farhadi-Khouzani, Z. Fereshteh, M. R. Loghman-Estarki, and R. S. Razavi, 'Different morphologies of ZnO nanostructures via polymeric complex sol-gel method: synthesis and characterization', Journal of sol-gel science and technology, vol. 64, pp. 193-199, 2012.
<https://doi.org/10.1007/s10971-012-2847-y>

- [133] M. Anandan, S. Dinesh, N. Krishnakumar, and K. Balamurugan, 'Improved photocatalytic properties and anti-bacterial activity of size reduced ZnO nanoparticles via PEG-assisted precipitation route', *Journal of Materials Science: Materials in Electronics*, vol. 27, pp. 12517-12526, 2016.
<https://doi.org/10.1007/s10854-016-5764-y>
- [134] A. C. Janaki, E. Sailatha, and S. Gunasekaran, 'Synthesis, characteristics and antimicrobial activity of ZnO nanoparticles', *SpectrochimicaActa Part A: Molecular and Biomolecular Spectroscopy*, vol. 144, pp. 17-22, 2015.
<https://doi.org/10.1016/j.saa.2015.02.041>
- [135] V. Hoseinpour, M. Souri, N. Ghaemi, and A. Shakeri, 'Optimization of green synthesis of ZnO nanoparticles by *Dittrichiagraveolens* (L.) aqueous extract', *Health Biotechnol. Biopharma*, vol. 1, no. 2, pp. 39-49, 2017.
<https://doi.org/10.22034/HBB.2017.10>
- [136] J. Meshram, V. Koli, M. R. Phadatare, and S. Pawar, 'Anti-microbial surfaces: An approach for deposition of ZnO nanoparticles on PVA-Gelatin composite film by screen printing technique', *Materials Science and Engineering: C*, vol. 73, pp. 257-266, 2017.
<https://doi.org/10.1016/j.msec.2016.12.043>
- [137] N. Gavade, A. Kadam, Y. Gaikwad, M. Dhanavade, and K. Garadkar, 'Decoration of biogenic AgNPs on template free ZnO nanorods for sunlight driven photocatalytic detoxification of dyes and inhibition of bacteria', *Journal of Materials Science: Materials in Electronics*, vol. 27, pp. 11080-11091, 2016.
<https://doi.org/10.1007/s10854-016-5225-7>
- [138] A. Anžlovar, Z. Crnjak Orel, K. Kogej, and M. Žigon, 'Polyol-mediated synthesis of zinc oxide nanorods and nanocomposites with poly (methyl methacrylate)', *Journal of Nanomaterials*, vol. 2012, no. 1, pp. 760872-760881, 2012.
<https://doi.org/10.1155/2012/760872>
- [139] A. Batool, F. Kanwal, M. Imran, T. Jamil, and S. A. Siddiqi, 'Synthesis of polypyrrole/zinc oxide composites and study of their structural, thermal and electrical properties', *Synthetic Metals*, vol. 161, no. 23-24, pp. 2753-2758, 2012.
<https://doi.org/10.1016/j.synthmet.2011.10.016>
- [140] L. L. Tan, W.-J. Ong, S.-P. Chai, and A. R. Mohamed, 'Reduced graphene oxide-TiO₂ nanocomposite as a promising visible-light-active photocatalyst for the conversion of carbon dioxide', *Nanoscale research letters*, vol. 8, pp. 1-9, 2013.
<https://doi.org/10.1186/1556-276X-8-465>

- [141] K.S. Subramanian, G. J. Janavi, S. Marimuthu, M. Kannan, K. Raja, S. Haripriya, D. J. Sharmila, and P. S. Moorthy, A textbook on fundamentals and applications of nanotechnology, First edition, Daya Publishing House, 2018.
[ISBN: 978-9390384600](#)
- [142] T. Zhang, G. Shi, N. Zhang, A. Du, and Q. Wu, "Analysis and aging evaluation method of frequency domain dielectric spectroscopy for high-voltage XLPE submarine cables," *Electrical Engineering*, vol. 106, no. 3, pp. 3403-3413, 2024.
<https://doi.org/10.1007/s00202-023-02160-3>

ملخص:

التطوير الموثوق للكابلات ذات الجهد العالي جدًا مع العزل الاصطناعي تطلب فهمًا عميقًا للمواد الأساسية، وتوافقها، وقوانين شيخوختها. تطلبت خصائص العوازل الاصطناعية، التي تختلف عن تلك الخاصة بالعوازل الورقية المشبعة، بحثًا مكثفًا لتحديد الاختبارات الأساسية للتحقق من ملائمتها وتطوير المواصفات المناسبة. يتركز هذا العمل البحثي على دراسة تحسين أداء الكابلات عالية الجهد المدفونة تحت الأرض بواسطة إدخال مفهوم المواد المركبة. إن التوصيف الفيزيائي الكيميائي الجديد للعوازل يتطلب بلا شك تطوير دراسات عديدة وتجريبية لتقدم الكابلات الجديدة. لأن المواد المستخدمة حاليًا تقدم بعض العيوب مثل فقدان الكبير في العزل الكهربائي بدءًا من قيمة معينة لجهد التشغيل، ويمكن أن يحدث الفشل تحت الحقول القوية في التجاويف في أوقات قصيرة جدًا.

الكلمات المفتاحية : كابل نقل الطاقة الكهربائية، البولي إيثيلين المتصلب كيميائيًا، المواد المركبة العازلة، صلابة العوازل، موثوقية، تقريغ جزئي؛ شيخوخة.

Abstract:

The reliable development of very high voltage cables with synthetic insulation required an in-depth understanding of the base materials, their compatibilities, and their aging laws. The characteristics of synthetic insulators, different from those of impregnated paper insulations, required extensive research to define the essential tests for verifying their suitability and to develop appropriate specifications.

This thesis work focuses on the study of improving the performance of underground high-voltage cables through the introduction of the composite materials concept. The new physico-chemical characterization of dielectrics undoubtedly requires the development of numerical and experimental studies for the advancement of new cables. Because the materials currently used present certain disadvantages such as significant dielectric losses starting from a certain value of the operating voltage, and failure can occur under strong fields in cavities in very short times.

Keywords: Electric power transmission cable, Chemically cross-linked polyethylene, Dielectric composite materials, Dielectric strength, Reliability, Partial discharges, Aging.

Résumé:

Le développement fiable des câbles très hautes tensions à isolation synthétique nécessitait une connaissance approfondie des matériaux de base, de leurs compatibilités et de leurs lois de vieillissement. Les caractéristiques des isolants synthétiques, différentes de celles des isolations en papier imprégné, ont nécessité des recherches approfondies pour la définition des essais indispensables à la vérification de leur aptitude et pour la mise au point de spécifications adaptées.

Ce travail de thèse porte sur l'étude de l'amélioration des performances des câbles haute tension souterrains par l'introduction du concept des matériaux composites. La caractérisation physico-chimique nouvelle des diélectriques nécessite la mise au point des études numérique et expérimentale incontestablement pour le développement des nouveaux câbles. Car, les matériaux utilisés actuellement présentent certains inconvénients tels que les pertes diélectriques importantes à partir d'une certaine valeur de la tension d'utilisation et la rupture peut apparaître sous champ fort dans les cavités en des temps très courts.

Mots-clés : Câble de transmission d'énergie électrique, Polyéthylène réticulé chimiquement, Matériaux composites diélectriques, Rigidité diélectriques, Fiabilité, Décharges partielles, Vieillessement.