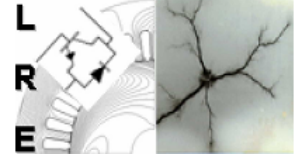


الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية
République Algérienne Démocratique et Populaire
وزارة التعليم العالي و البحث العلمي
Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique



المدرسة الوطنية المتعددة التقنيات
Ecole Nationale Polytechnique

ÉCOLE NATIONALE POLYTECHNIQUE
Département d'Électrotechnique
Laboratoire de Recherche en Electrotechnique



Projet de Fin d'Études
En vue d'obtention du diplôme
d'Ingénieur d'État en Électrotechnique

Intitulé :

Réduction du Champ Électrique au Niveau des Terminaisons d'un Câble de 20 kV Isolé au PRC

Présenté par :

Kheirreddine TAREB et Mohamed Amine HEBRI

Soutenue publiquement, le 07 Juillet 2020 devant le jury :

Président	Tahar	ZEBBADJI	MCA.	ENP, Alger, Algérie
Directeurs	Madjid	TEGUAR	Pr.	ENP, Alger, Algérie
	Omar	KHERIF	Dr.	ENP, Alger, Algérie
Examineur	Abdelouahab	MEKHALDI	Pr.	ENP, Alger, Algérie

ENP 2020

Laboratoire de Recherche en Électrotechnique (LRE) - École Nationale Polytechnique (ENP)
10, Avenue des Frères Oudek, Hassen Badi, BP. 182, 16200 El Harrach, Alger, Algérie

www.lre.enp.edu.dz

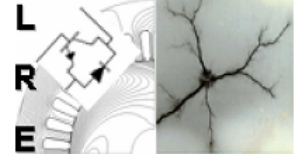
www.enp.edu.dz

الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية
République Algérienne Démocratique et Populaire
وزارة التعليم العالي و البحث العلمي
Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique



المدرسة الوطنية المتعددة التقنيات
Ecole Nationale Polytechnique

ÉCOLE NATIONALE POLYTECHNIQUE
Département d'Électrotechnique
Laboratoire de Recherche en Electrotechnique



Projet de Fin d'Études
En vue d'obtention du diplôme
d'Ingénieur d'État en Électrotechnique

Intitulé :

**Réduction du Champ Électrique au Niveau des
Terminaisons d'un Câble de 20 kV Isolé au PRC**

Présenté par :

Kheirreddine TAREB et Mohamed Amine HEBRI

Soutenue publiquement, le 07 Juillet 2020 devant le jury :

Président	Tahar	ZEBBADJI	MCA.	ENP, Alger, Algérie
Directeurs	Madjid	TEGUAR	Pr.	ENP, Alger, Algérie
	Omar	KHERIF	Dr.	ENP, Alger, Algérie
Examineur	Abdelouahab	MEKHALDI	Pr.	ENP, Alger, Algérie

ENP 2020

Laboratoire de Recherche en Électrotechnique (LRE) - École Nationale Polytechnique (ENP)
10, Avenue des Frères Oudek, Hassen Badi, BP. 182, 16200 El Harrach, Alger, Algérie

www.lre.enp.edu.dz

www.enp.edu.dz

ملخص - يكمن هذا العمل في دراسة و تحليل الحقل الكهربائي عند نهايات الكوابل الكهربائية. وقد أجريت عمليات المحاكاة ثنائية الأبعاد في بيئة COMSOL على طول واحد متر من كابل 20 كيلو فولط معزول بالبوليتيلان المعرق كيميائياً، جزؤه العاري بطول 0,25 متر. تم تسجيل تركيز محلي للحقل الكهربائي (بقيمة عظمى 117 كيلو فولط عند انقطاع الشاشة المؤرضة. ومنه إستخدام طرق تخفيض الحقل الكهربائي أمر أكثر من ضروري. لأجل ذلك، تم تطبيق مقاربات سعوية التمثلة في التحكم بالانكسار، و التحكم الهندسي (بدون و بوجود حارف)، و كذا إجراء محاكاة للطرق السالفة الذكر. إذ تم تسجيل انخفاضات الحقل الكهربائي تتراوح بين 76% و 92% على سطح الكابل. وأخيراً، تم تحليل الحقل الكهربائي داخل وصلة 20 كيلو فولط ذات طبقة تتمتع بسماحية نوعية عالية لضمان تقليل المجال الكهربائي. أظهرت النتائج المتحصل عليها فعالية التقنيات المعتمدة للتقليل من الحقل الكهربائي.

كلمات مفتاحية - كابل كهربائي، الحقل الكهربائي، التحكم بالانعكاس، التحكم الهندسي، حارف، طرق تخفيض الحقل الكهربائي، نهايات الكوابل عالية التوتر، محاكاة.

Abstract—The present project deals with the electric field study and analysis at electric cables terminations. 2D axisymmetric simulations have been carried out under COMSOL environment. 1-meter length 20 kV XLPE-cable, having 0.25-meter stripped part, has been considered. A local electric field enhancement (of which the maximum value is 117 kV/cm) has been recorded at the screen discontinuity. The recourse to the stress grading methods is mandatory. For this purpose, two capacitive techniques namely refractive control and geometric methods (with and without deflector) have been applied and simulations have been performed. Reductions of electric field from 76% to 92% have been obtained at cable surface. Finally, stress relief in 20 kV-joint with high permittivity layer has been discussed. The obtained results showed the effectiveness of the stress grading techniques so adopted.

Keywords : cable terminations, deflector, electric field, geometric control, electric cable, refraction control, simulation, stress grading method.

Résumé—Le présent travail porte sur l'étude et l'analyse du champ électrique au niveau des terminaisons de câbles électriques. Des simulations ont été effectuées en 2D axisymétrique sous environnement COMSOL. Une portion de 1 mètre de longueur d'un câble de 20 kV isolé au PRC a été considérée dont la partie dénudée est de 0,25 m. Un renforcement local du champ électrique (dont la valeur maximale est de 117 kV/cm) a été enregistré au niveau de la discontinuité de l'écran. Pour cela, deux techniques capacitatives, à savoir la méthode de contrôle par réfraction et celles géométriques (sans et avec déflecteur) ont été appliquées et des simulations ont été effectuées. Des atténuations du champ électrique allant de 76% à 92% ont été obtenues au niveau de la surface du câble. Finalement, la réduction du champ électrique à l'intérieur d'une jonction de 20 kV dotée d'une couche de haute permittivité a été discutée. Les résultats obtenus ont montré l'efficacité des techniques de réduction du champ électrique ainsi adoptées.

Mots-clés : câble électrique, champ électrique, contrôle par réfraction, contrôle géométrique, déflecteur, méthode de contrôle (réduction) du champ électrique, terminaisons de câbles, simulation.

Remerciements

Les travaux de recherche entrepris dans ce mémoire ont été effectués au Laboratoire de Recherche en Électrotechnique (LRE) de l'École Nationale Polytechnique (ENP). Ce mémoire ne serait pas ce qu'il est sans la collaboration, l'aide et le soutien de nombreuses personnes.

Nous tenons tout d'abord à remercier nos encadreurs Pr. M. TEGUAR et Dr. O. KHERIF de nous avoir proposé ce sujet et pour leurs constantes présences au sein du LRE ainsi que leurs fructueux conseils, directives et suivis dans le domaine de la recherche scientifique, leur courtoisie si raffinée et leurs qualités humaines.

Nous remercions beaucoup Dr. T. ZEBBADJI pour avoir accepté de juger ce travail et nous avoir fait l'honneur de présider le jury de soutenance.

Nos chaleureux remerciements vont également au Pr. A. MEKHALDI pour avoir accepté d'examiner ce mémoire.

Nous adressons nos sincères remerciements à H. MEHIBEL pour ses orientation et aide.

Nous remercions vivement tous les enseignants d'Electrotechnique, à leur tête Pr. R. IBTIOUEN, Chef de département.

Finalement, nous tenons à remercier toutes les personnes qui nous ont aidés, de près ou de loin, durant nos cursus.

Dédicace

Je dédie ce travail :

À mes très chers parents **HASSINA** et **OMAR**. Sans vos sacrifices et efforts, je ne serai guère là à présenter ce modeste travail et écrire ces quelques lignes pour témoigner mon profond respect et l'amour que je porte pour vous,

À ma très chère et unique sœur **Rachida**,

À mes chers frères **Abderrahim** et **Younes**,

À mes deux familles maternelle et paternelle, **BOUGHAR** et **HEBRI**,

À la famille maternelle de ma mère, **BOULEKHILET**,

Sans oublier mon enseignante et ma chère tante **Leila HAMROUR**,

À mon meilleur ami **Merouane GHEDDOUCHI**,

À tous mes camarades de classe, **AICHOUN Yousra**, **KHELFI Ikkal** et mon binôme **TAREB Kheirreddine**,

À tous ceux qui comptent pour moi.

Mohamed Amine HEBRI

Je dédie ce modeste travail et ma profonde gratitude,
À tous ceux qui ont participé à m'offrir les conditions propices à ma réussite,
À mes chers parents, **Djaffar** et **Faiza**, qui ont consacré leur vie à bâtir la mienne, pour leur patience, encouragement et pour tout ce qu'ils ont fait pour que je puisse arriver à ce stade,
À ma sœur, **Lamia**, qui m'a été à sa façon, d'un inconditionnel et précieux soutien,
Aux familles **ABBAS** et **TAREB**,
À **Mohamed OUSMAAL**, **Rachid HAMAM**, **Tarek LATRECHE**, **Yucef MAHDI** et **Younes DJABRI**, mes chers amis.
À mon ami et mon binôme **Mohamed Amine HEBRI**,
À tous mes amis et mes proches que j'ai omis de citer,
Aux enseignants du département d'électrotechnique de l'ENP pour la formation délivrée, les conseils et aussi pour les valeurs inculquées.

Kheirreddine TAREB

Table des Matières

Liste des Tableaux

Liste des Figures

Liste des Abréviations

Liste des Symboles

Introduction Générale	16
Chapitre 1: Généralités sur les Câbles Electriques	20
1.1 Introduction	20
1.2 Types de Câbles à Haute Tension	20
1.2.1 Câbles à Huile Fluide	21
1.2.2 Câbles sous Tube d'Acier, à Pression d'Huile	21
1.2.3 Câbles à Isolation Gazeuse	22
1.2.3.1 Câbles à Pression Interne de Gaz	23
1.2.3.1.1 Câbles au Papier Imprégné	23
1.2.3.1.2 Câbles au Papier Pré-imprégné	23
1.2.3.2 Câbles à Pression Externe de Gaz	23
1.2.4 Câbles à Isolation Synthétique	24
1.2.5 Câbles Supraconducteurs	25
1.3 Structure des Câbles Haute Tension à Isolation Synthétique	26
1.3.1 Ame Conductrice	27
1.3.2 Ecran Semi-conducteur	28
1.3.3 Ecran Mis à la Terre	28
1.3.4 Gaine de Protection	29
1.3.5 Isolation des Câbles Synthétiques	29
1.3.5.1 Propriétés Diélectriques des Polymères	30
1.3.5.2 Propriétés Diélectriques des Polymères	30
1.3.5.2.1 Principe de la Polarisation	30
1.3.5.2.2 Polarisation à l'Echelle Macroscopique	32
1.3.5.2.3 Polarisation à l'Echelle Microscopique	32
1.3.5.2.4 Types de Polarisation	33
1.3.5.3 Polymères Utilisés dans l'Isolation des Câbles	33
1.3.5.3.1 Polyéthylène (PE)	33
1.3.5.3.2 Polyéthylène Basse Densité (PEBD)	34
1.3.5.3.2.1 Propriétés du PEBD	34

1.3.5.3.3	Polyéthylène Haute Densité PEHD	35
1.3.5.3.4	Polyéthylène Réticulé Chimiquement PRC (XLPE)	35
1.3.5.3.4.1	Polyéthylène Réticulé Retardateur d'Arborescence d'Eau (TR-XLPE)	36
1.3.5.3.5	Copolymère Ethylène-propylène (EPR)	36
1.4	Conclusion	37
Chapitre 2: Calcul du Champ Electrique Généré par les Câbles Electriques		39
2.1	Introduction	39
2.2	Calcul Analytique du Champ Electrique	39
2.2.1	Calcul de la Composante Radiale du Champ Electrique	39
2.2.1.1	Calcul de la Composante Radiale du Champ Electrique en Courant Alternatif	39
2.2.1.2	Calcul de la Composante Radiale du Champ Electrique en Courant Continu	40
2.2.2	Calcul Analytique de la Composante Tangentielle du Champ Electrique	43
2.3	Méthodes Numériques pour le Calcul du Champ Electrique	48
2.3.1	Choix de Méthodes Numériques	48
2.3.2	Modélisation du Problème	49
2.3.2.1	Cas de Courant Alternatif	49
2.3.2.2	Cas de Courant Continu	50
2.3.3	Méthode des Différences Finies (MDF)	50
2.3.4	Méthode des Eléments Finis (MEF)	53
2.3.5	Méthode de Simulation de Charges (MSC)	56
2.4	Conclusion	58
Chapitre 3: Champ Electrique au Niveau d'une Terminaison et Méthodes de Contrôle		60
3.1	Introduction	60
3.2	Description du Problème	60
3.3	Répartition du Champ Électrique	62
3.3.1	Modèle du Câble	62
3.3.2	Formulation du Problème dans un Environnement COMSOL	63
3.3.3	Résultats et Discussions	66
3.3.3.1	Distribution du Potentiel	66
3.3.3.2	Distribution du Champ Électrique	68
3.4	Méthodes de réduction du champ aux terminaisons des câbles	72
3.4.1	Contrôle capacitif	73
3.4.1.1	Méthode de contrôle géométrique	73
3.4.1.2	Méthode de Contrôle par réfraction	74
3.4.1.3	Méthode de Contrôle Avec Brins Conducteurs	75
3.4.2	Contrôle résistif	75
3.4.2.1	Contrôle par impédance (contrôle résistif linéaire)	75
3.4.2.2	Contrôle résistif non linéaire	78
3.5	Conclusion	80

Chapitre 4: Réduction du Champ Electrique à l'aide des Méthodes Capacitives	82
4.1 Introduction	82
4.2 Méthode de Contrôle par Réfraction	82
4.2.1 Distribution du Potentiel	83
4.2.2 Distribution du Champ Electrique	85
4.2.3 Etude Paramétrique	88
4.2.3.1 Effet des Paramètres Géométriques	88
4.2.3.2 Effet de la Permittivité Relative	89
4.3 Méthode Géométrique Traditionnelle	92
4.3.1 Distribution du Potentiel	93
4.3.2 Distribution du Champ Electrique	95
4.3.3 Effet du rayon R_g du cône	99
4.4 Méthode Géométrique avec Déflecteur	102
4.4.1 Distribution du potentiel	103
4.4.2 Distribution du Champ électrique	105
4.5 Comparaison entre les méthodes de contrôle géométrique et par réfraction	111
4.6 Conclusion	112
Chapitre 5: Réduction du champ électrique par le biais d'une jonction	114
5.1 Introduction	114
5.2 Accessoires de Raccordement	114
5.2.1 Jonctions	114
5.2.2 Extrémités de câbles	116
5.2.2.1 Extrémités Extérieures	117
5.2.2.2 Extrémités Intérieures	118
5.3 Simulation d'une jonction	118
5.3.1 Description du Modèle	119
5.3.2 Résultats et Discussions	120
5.3.3 Analyse Paramétrique	124
5.4 Conclusion	127
Conclusion Générale	129
Références Bibliographiques	133

Liste des Tableaux

- Table 1.1 Principales résistivités des matériaux conducteurs à 20°C [3] 27
- Table 2.1 Comparaison entre les méthodes numériques [32] 48
- Table 3.1 Permittivités relatives des différents matériaux du câble [51] 63
- Table 4.1 Champ électrique maximal (en kV/cm) pour différentes géométries de la couche de haute permittivité ($\epsilon_r = 10$) 89
- Table 4.2 Tableau comparatif entre les deux méthodes de contrôle du champ électrique géométrique et par réfraction 111
- Table 5.1 Constantes diélectriques des différents composants de la jonction [75] 120

Liste des Figures

FIGURE 1.1	Constitution d'un câble souterrain isolé à huile fluide [7]	21
FIGURE 1.2	Câble tripolaire sous tube d'acier à pression d'huile [9]	22
FIGURE 1.3	Constitution d'un câble souterrain à isolation gazeuse [10]	22
FIGURE 1.4	Constituants d'un Câble tripolaire à pression externe de gaz [6]	24
FIGURE 1.5	Constitution d'un câble supraconducteur [14]	26
FIGURE 1.6	Structure d'un câble coaxial à isolation synthétique [4]	26
FIGURE 1.7	Structures de l'âme conductrice [15]	28
FIGURE 1.8	Diagramme de Fresnel d'un condensateur	31
FIGURE 1.9	Formule chimique du polyéthylène [5]	33
FIGURE 1.10	Structures de polyéthylène représentant sa densité en fonction des ramifications [5]	34
FIGURE 1.11	Description simplifiée du processus de réticulation : (a) polymère linéaire (b) polymère tridimensionnel [23]	35
FIGURE 1.12	Formule chimique du copolymère éthylène-propylène [5]	36
FIGURE 2.1	Coupe verticale dans un câble coaxial [1]	40
FIGURE 2.2	Répartition du champ électrique dans l'enveloppe isolante d'un câble à courant continu [2]	43
FIGURE 2.3	Terminaison d'un câble HT [30]	44
FIGURE 2.4	Circuit équivalent d'une terminaison d'un câble HT	44
FIGURE 2.5	Circuit électrique équivalent élémentaire du diélectrique pour une longueur dx	45
FIGURE 2.6	: Circuit équivalent du milieu entourant la terminaison pour une longueur dx	46
FIGURE 2.7	Maillage rectangulaire irrégulier avec abréviation des nœuds [37]	51
FIGURE 2.8	Champ bidimensionnel dans un matériau diélectrique [37]	54
FIGURE 2.9	Maillage triangulaire [37]	54
FIGURE 3.1	Lignes du champ électrique autour d'un câble (a) sans (b) avec écran conducteur [49]	61
FIGURE 3.2	Distribution du champ électrique dans un câble à terminaison coupée [3]	61
FIGURE 3.3	Distribution du champ électrique dans une terminaison de câble avec écran dénudé [3]	61
FIGURE 3.4	Modèle 2D du câble de 20 kV objet d'étude	62
FIGURE 3.5	Organigramme montrant les différentes étapes de simulation sous COMSOL	64
FIGURE 3.6	Maillage de la terminaison du câble	65
FIGURE 3.7	Distribution surfacique du potentiel	66

FIGURE 3.8	Distribution des lignes équipotentiell	67
FIGURE 3.9	Variation du potentiel le long de la longueur de la surface extérieure du câble	67
FIGURE 3.10	Distribution du champ électrique au niveau de la terminaison du câble	68
FIGURE 3.11	Variation du champ électrique le long de la longueur de la surface extérieure du câble	69
FIGURE 3.12	Distribution de la composante radiale du champ électrique	70
FIGURE 3.13	Distribution de la composante tangentielle du champ électrique	70
FIGURE 3.14	Variations des deux composantes du champ électrique le long de la longueur de la surface extérieure du câble	71
FIGURE 3.15	Chronologie du développement des méthodes de contrôle du champ [56]	73
FIGURE 3.16	Méthode de contrôle géométrique (sans déflecteur)[3]	74
FIGURE 3.17	Méthode de contrôle géométrique avec déflecteur [48]	74
FIGURE 3.18	Méthode de contrôle par réfraction [48]	74
FIGURE 3.19	Méthode de contrôle avec brins conducteurs [48]	75
FIGURE 3.20	Circuit équivalent de la méthode de contrôle résistif linéaire (par impédance) du champ électrique [48]	76
FIGURE 3.21	Distribution du champ électrique entre l'électrode haute tension et celle de terre en utilisant le contrôle résistif. Graphe (a) est relatif à un tube de contrôle isolant $z = \infty$, Graphe (b) concerne un tube de contrôle très conducteur $z = 0$, Graphe (c) pour un tube de contrôle avec une conductivité intermédiaire [56]	77
FIGURE 3.22	Circuit équivalent de la méthode de contrôle résistif non linéaire du champ électrique [48]	78
FIGURE 3.23	a) Distribution du champ électrique pour différentes valeurs de α ; b) Variations du facteur du champ f_r pour différents rapports de rayons des sphères [62]	79
FIGURE 3.24	Variation de la densité de courant en fonction du champ électrique pour ZnO et SiC [57]	80
FIGURE 4.1	Géométrie d'une terminaison de câble avec contrôle de champ électrique par réfraction	83
FIGURE 4.2	Distribution surfacique du potentiel	84
FIGURE 4.3	Distribution des lignes équipotentiell	84
FIGURE 4.4	Variation du potentiel électrique tout au long de la longueur de la surface extérieur du câble avant et après l'application de la méthode de contrôle par réfraction	85
FIGURE 4.5	Distribution surfacique du champ électrique	86
FIGURE 4.6	Variation du champ électrique tout au long de la longueur de la surface extérieur du câble avant et après l'application de la méthode de contrôle par réfraction	86
FIGURE 4.7	Variation de la composante radiale du champ électrique tout au long de la longueur de la surface extérieur du câble avant et après l'application de la méthode de contrôle par réfraction	87
FIGURE 4.8	Variation de la composante tangentielle du champ électrique tout au long de la longueur de la surface extérieur du câble avant et après l'application de la méthode de contrôle par réfraction	88

FIGURE 4.9	Variation du champ électrique à la surface du câble en fonction de la permittivité relative de la couche additive	90
FIGURE 4.10	Géométrie de la terminaison du câble	92
FIGURE 4.11	Distribution surfacique du potentiel lors de l'application de la méthode géométrique traditionnelle	93
FIGURE 4.12	Distribution des lignes équipotentielles lors de l'application de la méthode géométrique traditionnelle	94
FIGURE 4.13	Variation du potentiel électrique le long de la longueur de la surface extérieure du câble avant et après l'application de la méthode géométrique traditionnelle	94
FIGURE 4.14	Distribution surfacique du champ électrique lors de l'application de la méthode géométrique traditionnelle	96
FIGURE 4.15	Variation du champ électrique le long de la longueur de la surface extérieure du câble avant et après l'application de la méthode géométrique traditionnelle	96
FIGURE 4.16	Distribution surfacique du champ électrique au niveau du sommet du cône	97
FIGURE 4.17	Variation de la composante radiale du champ électrique le long de la longueur de la surface extérieure du câble avant et après l'application de la méthode géométrique traditionnelle	98
FIGURE 4.18	Variation de la composante tangentielle du champ électrique le long de la longueur de la surface extérieure du câble avant et après l'application de la méthode géométrique traditionnelle	98
FIGURE 4.19	Variation du champ électrique le long de la longueur de la surface extérieure du câble pour différents rayons R_g	100
FIGURE 4.20	Variation du champ électrique au sommet du cône pour différents rayons R_g	100
FIGURE 4.21	Géométrie et dimensions (en mm) du déflecteur	102
FIGURE 4.22	Géométries et dimensions de la terminaison du câble contenant le déflecteur	103
FIGURE 4.23	Distribution surfacique de potentiel lors de l'application de la méthode de contrôle géométrique avec déflecteur	104
FIGURE 4.24	Distribution des lignes équipotentielles lors de l'application de la méthode de contrôle géométrique avec déflecteur	104
FIGURE 4.25	Variation du potentiel électrique le long de la longueur de la surface extérieure du câble avant et après l'application de la méthode géométrique avec déflecteur	105
FIGURE 4.26	Distribution surfacique du champ électrique lors de l'application de la méthode géométrique avec déflecteur	106
FIGURE 4.27	Distribution du champ électrique en 3D lors de l'application de la méthode géométrique avec déflecteur	106
FIGURE 4.28	Variation du champ électrique le long de la longueur la surface extérieure du câble avant et après l'application de la méthode géométrique avec déflecteur	107
FIGURE 4.29	Variation de la composante radiale du champ électrique le long de la longueur la surface extérieure du câble avant et après l'application de la méthode géométrique avec déflecteur	108

FIGURE 4.30	Variation de la composante tangentielle du champ électrique le long de la longueur la surface extérieure du câble avant et après l'application de la méthode géométrique avec déflecteur	108
FIGURE 4.31	Champ électrique au sommet du cône lors de l'application des deux méthodes géométriques, pour différents rayons du cône	110
FIGURE 5.1	Disposition d'une jonction monophasée et ses composants [70] . . .	115
FIGURE 5.2	Disposition d'une extrémité monophasée et ses composants [71] . .	116
FIGURE 5.3	Vue schématique d'une extrémité avec méthode capacitive de contrôle du champ [48]	117
FIGURE 5.4	Extrémités extérieures : (a) en porcelaine [72] ; (b) composites [73] .	118
FIGURE 5.5	Extrémités intérieures : (a) Dans un boîtier [74] ; (b) Dans un Hangar [29]	118
FIGURE 5.6	Modèle en 2D axisymétrique de la jonction de 20 kV	119
FIGURE 5.7	Distribution surfacique du potentiel électrique	121
FIGURE 5.8	Distribution du potentiel en 3D	121
FIGURE 5.9	Distribution surfacique du champ électrique en 2D	122
FIGURE 5.10	Distribution du champ électrique en 3D	122
FIGURE 5.11	Variation du champ électrique à travers la largeur de la jonction . .	123
FIGURE 5.12	Variation du champ électrique en fonction de la constante diélectrique de la couche de haute permittivité	125
FIGURE 5.13	Variation du champ électrique en fonction de la constante diélectrique de l'isolation en caoutchouc	125
FIGURE 5.14	Variation du champ électrique en fonction de la constante diélectrique de la couche semi-conductrice	126

Liste des Abréviations

AWG	American Wire Gauge
BT, MT, HT	Basse, Moyenne, Haute Tension
CIG	Câbles à Isolation Gazeuse
EPDM	Terpolymère Élastomère d'Éthylène-propylène
EPR	Copolymère Éthylène-propylène
MDF	Méthode des Différences Finies
MEF	Méthode des Éléments Finis
MSC	Méthode de Simulation de Charges
PE	Polyéthylène
PEBD	Polyéthylène Basse Densité
PEHD	Polyéthylène Haute Densité
PRC/XLPE	Polyéthylène Réticulé Chimiquement
TR-XLPE	Polyéthylène Réticulé Chimiquement Retardateur d'Arborescence

Liste des Symboles

Y	Admittance	Ω^{-1}
β	Angle de départ	$^{\circ}$
δ	Angle de pertes diélectriques	rad
C	Capacité	F
\vec{E}	Champ électrique	$V \cdot m^{-1}$
\bar{E}	Champ électrique moyen	$V \cdot m^{-1}$
β_E	Coefficient de champ électrique	$mm \cdot kV$
γ	Coefficient de propagation	$.$
α_T	Coefficient de température	K^{-1}
σ	Conductivité électrique	$S \cdot m^{-1}$
A_1, A_2	Constante	$.$
I	Courant électrique	A
ρ	Densité de charge électrique	$C \cdot m^{-3}$
\vec{J}	Densité de courant électrique	$A \cdot m^{-2}$
d, D	Diamètre	m
h	Distance	m
e, h_n	Épaisseur	m
dr	Épaisseur élémentaire	m
$\tan \delta$	Facteur de pertes diélectriques	$.$
f	Fréquence	Hz
Z	Impédance	Ω
\vec{D}	Induction électrique	$C \cdot m^{-2}$
L	Longueur	m
\vec{p}	Moments dipolaires	D
M	Nœud	$.$
j	Unité imaginaire	$.$
N	Nombre de dipôles	$.$
ε''	Partie imaginaire de la permittivité relative	$.$
ε'	Partie réelle de la permittivité relative	$.$
ε_0	Permittivité électrique du vide	$F \cdot m^{-1}$
ε_r	Permittivité relative	$.$
ε^*	Permittivité relative complexe	$.$
α_p	Polarisabilité	$C \cdot m^2 \cdot V^{-1}$
\vec{P}	Polarisation	$C \cdot m^{-2}$
V	Potentiel électrique	V
ω	Pulsation	$rad \cdot s^{-1}$
R_g	Rayon de Cône	mm
r	Rayon	m
R	Résistance	ω
dR	Résistance élémentaire	Ω
ρ	Résistivité électrique	$\Omega \cdot m$
ρ_{th}	résistivité thermique	$m^2 \cdot K \cdot W^{-1}$
A	Surface	m^2
χ	Susceptibilité électrique	$.$
θ	Température	K
T_c	Température critique	K
V	Volume	m^3
x, y, z	Variables d'espace	$.$

Introduction Générale

Introduction Générale

LE transport d'énergie entre les centrales de production et les centres de consommation est assuré non seulement par les lignes électriques aériennes, mais également par les câbles souterrains. Ces derniers sont principalement employés pour le transport et la distribution d'énergie électrique dans les zones fortement urbanisées aux bords ou à l'intérieur des grandes villes, parfois pour résoudre des problèmes locaux particuliers, techniques ou environnementaux [1-3]. En effet, les câbles souterrains constituent la seule solution possible dans les agglomérations denses. En outre, ils sont considérés comme l'unique issue permettant de traverser de larges fleuves ou des bras de mer lorsque la distance à franchir dépasse 3 km. Ils ne causent pas d'interférences avec les circuits de télécommunications et les réceptions de radiodiffusion et télévision [2].

Par rapport à l'aérien, le coût des câbles souterrains est beaucoup plus élevé ; la différence est d'autant plus grande que la tension est plus élevée. Il est donc nécessaire d'optimiser le dimensionnement des liaisons en câbles isolés afin de diminuer significativement le surcoût du souterrain [1]. En outre, différentes investigations ont été entreprises afin de remédier aux autres inconvénients que possèdent ces câbles tels que, le repérage délicat et lent des défauts, les réparations coûteuses et parfois malaisées, la protection de leurs armures et gaines contre les effets de corrosion, le risquent d'être détériorés en cas de mouvements de terrains (particulièrement à craindre dans les régions minières), détérioration de leur isolement par élévation de température des conducteurs en cas de surcharge, . . . [4-6].

Les technologies d'isolation des câbles de transport électrique souterrains n'ont cessé d'évoluer depuis la fin des années 30 [3]. En effet, l'histoire des câbles isolés de transport d'énergie est aujourd'hui plus que centenaire. Trois principaux courants technologiques se sont développés depuis l'origine à savoir, les câbles isolés au papier imprégné, les câbles à isolation synthétique extrudée et les câbles à isolation gazeuse. Depuis le début du XXe siècle, l'isolation au papier imprégné d'huile-résine ou simplement d'huile a dominé l'industrie des câbles [2]. L'abandon de ces câbles à isolation traditionnelle au profit des câbles à isolation synthétique, du polyéthylène (PE) jusqu'au polyéthylène réticulé chimiquement (PRC ou XLPE en littérature anglo-saxonne), qui offrent de nombreux avantages. De tels câbles à isolation synthétique sont moins polluants, plus facilement recyclables, offrent une plus grande capacité de transport par rapport aux papiers imprégnés, et moins de maintenance. C'est pour ces raisons qu'ils sont de plus en plus employés dans l'isolation des câbles électriques [3]. Cependant, l'inconvénient de l'utilisation de matières synthétiques pour le transport électrique reste le risque de dégradation de ceux-ci, lorsqu'ils sont soumis, pendant une longue période, à des contraintes électriques, chimiques, ou provenir de l'environnement extérieur au câble, comme l'humidité, la présence d'oxygène, sans compter les défauts de fabrication de l'isolant polymère. Le vieillissement prématuré du matériau peut diminuer la durée de vie de la liaison électrique par rupture diélectrique [4].

Parmi les différentes contraintes susmentionnées auxquelles les câbles électriques sont soumis, nous nous sommes intéressés, dans notre présente étude, à celle électrique. Cette dernière est décrite par des lignes de champ, distribuées tout au long de la section du câble. Au sein de ce dernier, le champ électrique est purement radial. Un calcul analytique a montré que l'amplitude du champ électrique diminue en allant du conducteur vers l'écran mis à la terre [1].

Par ailleurs, un renforcement du champ électrique est enregistré au niveau des raccordements (câble étant coupé) entre différents tronçons de câbles ou avec les équipements et les installations de haute tension [5]. Au fait, ce renforcement est dû à la discontinuité de l'écran mis à la terre, appelée également terminaison du câble. Le renforcement du champ au niveau de cette terminaison provoque un échauffement excessif. Ce dernier peut engendrer une augmentation des pertes par effet joule, accélérer le vieillissement des isolants solides, et mener à la rupture thermique de l'isolant [1]. Par ailleurs, le renforcement du champ pourrait également être à l'origine de l'amorçage de décharges partielles dont la propagation peut mener à la rupture du diélectrique [3-4].

En effet, des mesures et méthodes de réduction du champ électrique doivent être prises [1, 4]. Le contrôle du champ électrique au niveau des terminaisons de câbles MT et HT se fait par (i) des méthodes capacitives, à savoir le contrôle géométrique, le contrôle par réfraction et le contrôle avec brins conducteurs ou bien par (ii) des méthodes résistives, à savoir contrôles résistifs linéaire et non linéaire. Ces méthodes de contrôle du champ électrique sont principalement utilisées dans les accessoires de raccordement, tels que les jonctions et les extrémités de câbles.

Intitulé "Réduction du champ électrique au niveau des terminaisons d'un câble de 20 kV isolé au PRC", ce mémoire tend à exposer le problème de la contrainte électrique (champ électrique) au niveau des terminaisons de câbles et à présenter les différentes techniques permettant d'y réduire cette contrainte. Dans notre investigation, nous nous sommes intéressés aux câbles coaxiaux de 20 kV isolés au PRC. Nous montrons, à travers nos simulations sous environnement COMSOL, que le champ électrique aux terminaisons du câble est intense, pouvant mener à la rupture diélectrique de l'isolation de ce câble. Afin d'échapper à ce danger, diverses méthodes de contrôle du champ électrique sont présentées et certaines sont simulées. Nous menons, par la suite, une étude paramétrique permettant d'analyser l'effet des différents paramètres de ces méthodes sur la répartition du champ électrique, à savoir la permittivité relative, la longueur et l'épaisseur de la couche de haute permittivité pour la méthode de contrôle par réfraction et la forme géométrique de l'écran mis à la terre ainsi que le rayon du cône pour la méthode de contrôle géométrique. En outre, nous avons étudié la distribution du champ électrique à l'intérieur d'une jonction de 20 kV munie d'une couche de haute permittivité assurant le contrôle et la réduction du champ électrique. Nous nous sommes aussi intéressés aux variations du champ électrique à l'intérieur de cette jonction en fonction des différentes valeurs de la constante diélectrique de la couche de haute permittivité, de celle de l'isolant en caoutchouc et finalement de celle de la couche semi-conductrice. Les résultats que nous avons obtenus sont confrontés à ceux trouvés par d'autres chercheurs dans le domaine.

Ainsi, ce mémoire est structuré en cinq chapitres distincts. Le premier chapitre présente des généralités sur les câbles électriques. Nous y évoquons la constitution d'un câble électrique, le rôle de chaque élément, ainsi que les différentes technologies d'isolation utilisées.

Dans le deuxième chapitre, nous illustrons la répartition (distribution) du champ électrique le long des câbles, ainsi que la modélisation du problème sous formes analytique (basée sur un circuit électrique équivalent) et numérique reportées dans la littérature. Le but principal de telles modélisations est de calculer le champ électrique tout au long des câbles ainsi qu'au niveau des terminaisons de ces derniers.

Nous commençons, le troisième chapitre, par une description du problème de la concentration du champ au niveau de la discontinuité de l'écran de câbles. Par la suite, nous simulons, sous environnement COMSOL, un modèle de câble de 20 kV isolé au PRC en vue de calculer les distributions du potentiel et du champ électriques au niveau de la terminaison de ce câble. Nous évoquons, enfin, les différentes techniques capacitatives et résistives suscitées permettant la réduction du champ électrique aux terminaisons de câbles MT et HT.

Dans le quatrième chapitre, nous simulons certaines techniques capacitatives de réduction du champ électrique au niveau de la terminaison du câble de 20 kV, à savoir le contrôle par réfraction, le contrôle géométrique traditionnel et le contrôle géométrique avec déflecteur. Nous menons aussi une étude paramétrique dans le but d'analyser l'effet des différents paramètres électro-géométriques sur la distribution du champ électrique au niveau de la terminaison du câble.

Nous présentons, dans le cinquième et dernier chapitre, les accessoires de raccordement, à savoir les jonctions et les extrémités de câbles. Dans les simulations, nous nous intéressons plus particulièrement, aux distributions du champ et du potentiel électriques d'un modèle de jonction de 20 kV. Nous analysons, finalement, l'effet des permittivités relatives des principaux milieux constituant la jonction, à savoir la couche de haute permittivité, l'isolant en caoutchouc et la couche semi-conductrice.

Nous terminons par une conclusion générale représentant une synthèse globale de notre étude.

Chapitre 1 :

Généralités sur les Câbles Electriques

Chapitre 1

Généralités sur les Câbles Electriques

1.1 Introduction

LE nom de câbles est donné aux longs dispositifs porteurs de courant qui portent leur propre isolation et présentent une surface extérieure mise à la terre. En se basant sur cette définition, les lignes aériennes, par exemple, ne sont pas considérées comme étant des câbles [4]. Les câbles de haute tension sont principalement employés dans les zones fortement urbanisées, aux abords ou à l'intérieur des grandes villes [2]. Les câbles se composent généralement d'un conducteur porteur de courant à faible résistance afin de minimiser les pertes par effet de Joule, d'une isolation entourant le conducteur et d'un conducteur métallique extérieur mis à la terre, appelé écran mis à la terre [1]. Dans ce chapitre, les différents types de câbles à haute tension ont été d'abord présentés, tels que, les câbles à huile fluide, à isolation gazeuse, à isolation synthétique et les supraconducteurs. La structure des câbles à isolation synthétique a été évoquée, en s'intéressant beaucoup plus aux différents types de polymères utilisés dans ce type de câble, leur développement dans le temps ainsi que leurs caractéristiques physico-chimiques, électriques et mécaniques.

1.2 Types de Câbles à Haute Tension

Un câble électrique à haute tension est un conducteur utilisé pour le transport d'électricité. Il doit supporter les contraintes imposées à la fois par le transport de puissance électrique importante, ainsi que par les conditions physiques et environnementales [1]. Au-delà de 80 kV entre phases pour les câbles monopolaires et de 50 kV pour les câbles tripolaire, il est important et nécessaire d'améliorer la rigidité diélectrique des câbles afin d'empêcher la formation de vacuoles susceptible d'ionisation. Pour cela, on utilise des techniques de contrôle de l'isolation qui assure l'opposition à la création de vacuoles, soit leur remplissage permanent par un diélectrique. De telles techniques impliquent généralement la mise sous pression de l'isolation [6]. La technologie historiquement utilisée pour les câbles enfouis est l'isolation à l'huile (papier imprégné d'huile). Des technologies alternatives sont depuis apparues : les câbles à isolation synthétique (LIS), les câbles à isolation gazeuse (LIG ou CIG), les câbles supraconducteurs ou câble supraconducteur à haute température [2].

1.2.1 Câbles à Huile Fluide

La solution proposée en 1917 par l'ingénieur italien Luigi Emanuelli de la société Pirelli à Milan, s'agit d'un câble à conducteur creux, dans lequel l'huile maintenue sous pression (1 à 3 bars), peut circuler à l'intérieur d'un canal. La figure 1.1 présente les différentes parties de ce type de câble [7]. Des réservoirs extérieurs, appelés « poumons », sont placés le long de la liaison. Ils maintiennent une pression constante à l'intérieur du câble, tout en permettant les mouvements de dilatation et décompression au fil des cycles de fonctionnement. En cas d'échauffement, la dilatation de l'huile à l'intérieur du câble implique un excès d'huile dans le conducteur qui quitte automatiquement le câble en rejoignant et en augmentant le niveau d'huile du réservoir. Similairement, en cas de compression de l'huile par refroidissement, l'huile du réservoir se retrouve à l'intérieur du câble. Dans ce but, l'huile utilisée est de faible viscosité. De tels câbles doivent être équipés d'une gaine parfaitement étanche. La résistance de la gaine est augmentée au moyen de feillard métallique enroulés à pas courts afin d'empêcher sa déformation sous l'effet des pressions internes. La protection extérieure des câbles à huile fluide contre les détériorations extérieures relève de techniques analogues à celles utilisées pour les autres câbles. Ils peuvent être revêtus d'une armure double en feillards d'acier ou simple en fils d'acier galvanisés [6]. Le choix de la section du câble nécessite un test axé sur l'étude du régime thermique du câble. Grâce à l'évolution technologique, la pression de l'huile est de 10 à 15 bars, ce qui permet d'augmenter la rigidité diélectrique et ainsi de réaliser des câbles jusqu'à 500 kV [2].

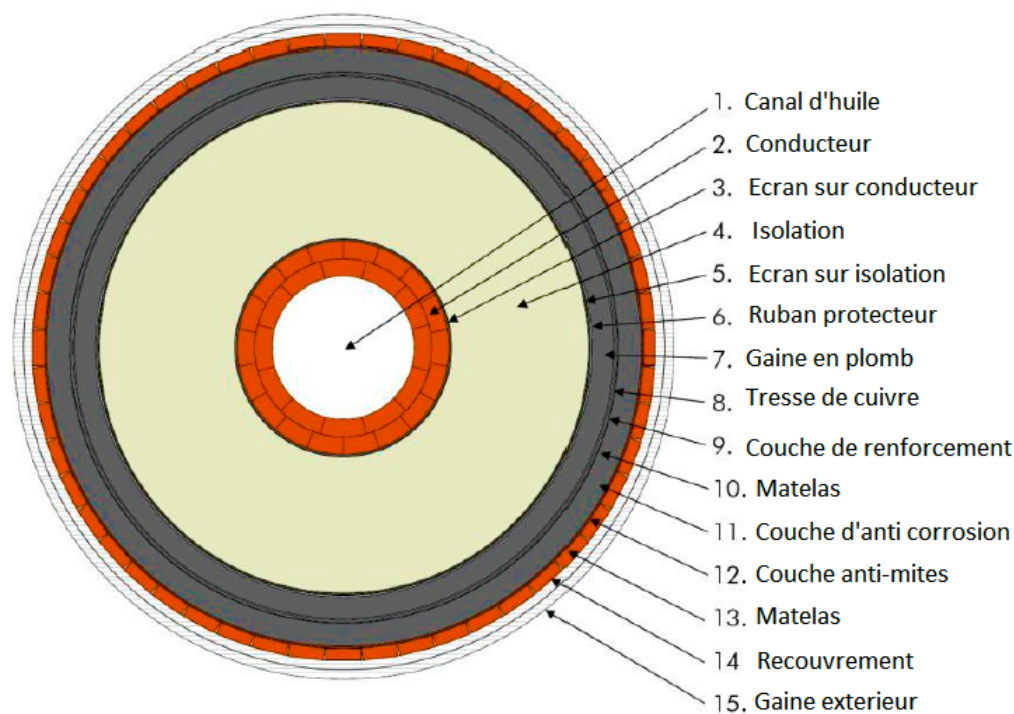


Figure 1.1 – Constitution d'un câble souterrain isolé à huile fluide [7]

1.2.2 Câbles sous Tube d'Acier, à Pression d'Huile

Dans cette technique trois conducteurs élémentaires isolés au papier imprégné sont tirés dans un tuyau d'acier maintenu sous pression d'huile (environ 15 bars) [2]. L'isolation est recouverte d'un écran métallique qui fixe le potentiel, ainsi que d'un rubanage de

protection contre l'humidité (généralement rubans en polyéthylène). Des fils métalliques (en cuivre, bronze, etc.) de glissement sont enroulés à pas long sur chacun des câbles élémentaires et en facilitent le tirage dans le tube d'acier [6, 8]. La figure suivante illustre un câble tripolaire sous tube d'acier à pression d'huile [9].

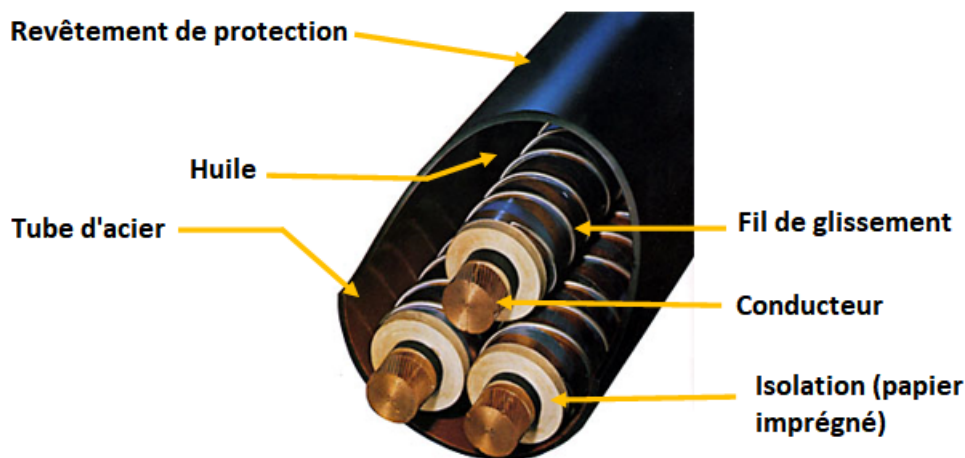


Figure 1.2 – Câble tripolaire sous tube d'acier à pression d'huile [9]

1.2.3 Câbles à Isolation Gazeuse

Les câbles à isolation gazeuse (LIG ou CIG) sont constitués de tubes métalliques contenant un ou plusieurs conducteurs (figure 1.3) [10]. Ces câbles ont une isolation électrique assurée par un gaz sous pression de 8 à 15 bars. Le meilleur gaz isolant est un mélange à base d'azote ($N_2 - SF_6$), qui permet d'éliminer l'inconvénient majeur de l'hexafluorure de soufre (SF_6) d'être un gaz à effet de serre. Avec un mélange comprenant 10% de SF_6 , la fiabilité des liaisons est même accrue par rapport au SF_6 pur, la qualité diélectrique étant prise en compte. La grande difficulté actuelle semble la pose industrielle de ces câbles [2, 6].

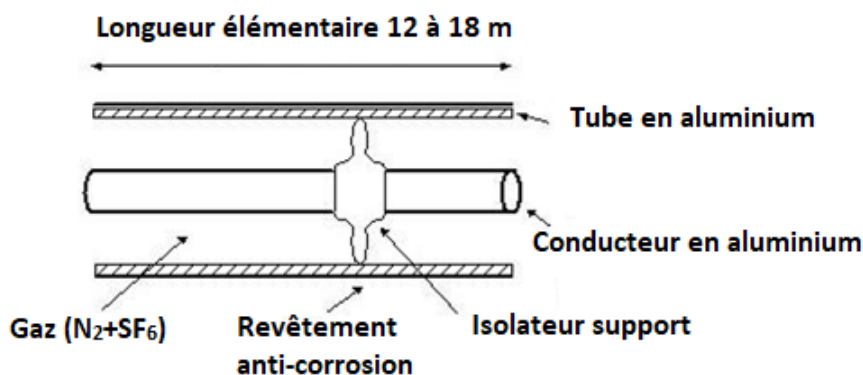


Figure 1.3 – Constitution d'un câble souterrain à isolation gazeuse [10]

1.2.3.1 Câbles à Pression Interne de Gaz

1.2.3.1.1 Câbles au Papier Imprégné

Ces câbles sont en général constitués par des conducteurs isolés au papier imprégné, placés sous une gaine de plomb renforcée pour la mise sous pression de gaz (15 bars). Les extrémités sont généralement remplies d'huile, avec matelas de gaz au sommet [6]. Ce type d'isolation est aussi associé à la technique des câbles sous tube d'acier similaire à celle des câbles à pression d'huile sous tube d'acier, dont la différence réside dans le fluide isolant. Le gaz employé est souvent un mélange d'azote sec (N_2) et hexafluorure de soufre (SF_6) [2]. L'inconvénient de cette technique consiste en le risque d'obstruction du canal de passage longitudinal de gaz dans les câbles unipolaire, par migration de la matière d'imprégnation vers les points bas. Au-delà de 63 kV, cette technique s'avère non compétitive du point de vue économique avec les solutions en câble sous pression d'huile. Des réalisations industrielles existent jusqu'à 138 kV [6].

1.2.3.1.2 Câbles au Papier Pré-imprégné

L'isolation des câbles est réalisée par rubanage (sous atmosphère conditionnée pour éviter une reprise d'humidité excessive), de rubans de papier préalablement imprégnés en galette. De cette manière, les phénomènes de migration sont éliminés du fait qu'il n'existe pas de matière d'imprégnation libre entre les couches de papier. L'absence de telle matière constitue l'avantage le plus marqué de cette technique. La fabrication du câble au papier pré-imprégné peut s'effectuer en longueurs très importantes, puisque le conducteur n'a pas à être séché et imprégné en cuve avant la mise sous plomb. Cette possibilité de production a été mise à profit dans la technique des câbles sous-marins de grandes longueurs. Des réalisations industrielles existent jusqu'à 138 kV en courant alternatif et 250 kV en courant continu [6].

1.2.3.2 Câbles à Pression Externe de Gaz

L'action mécanique externe de la compression de gaz de 15 bars doit s'exercer sur câble qui puisse se déformer d'une façon réversible sous l'effet des cycles de chauffage et de la pression externe [2]. C'est pourquoi ces câbles comportent un conducteur ovale. L'isolant est recouvert d'un diaphragme (gaine de plomb) renforcé par un frettage élastique (rubans en bronze). Les câbles unipolaires sont recouverts d'une seconde gaine de plomb à section circulaire, renforcée afin de tenir la pression du gaz appliquée à l'intérieur. Pour le câble tripolaire (figure 1.4) [6], 3 conducteurs isolés sont assemblés entre eux avant la mise sous deuxième gaine de plomb. Des fils de glissement sont utilisés en vue du tirage des câbles isolés dans des tubes d'acier. Actuellement, une tendance tend à remplacer le diaphragme de plomb par un diaphragme de polyéthylène. Des réalisations industrielles existent jusqu'à une tension de 138 kV [6].

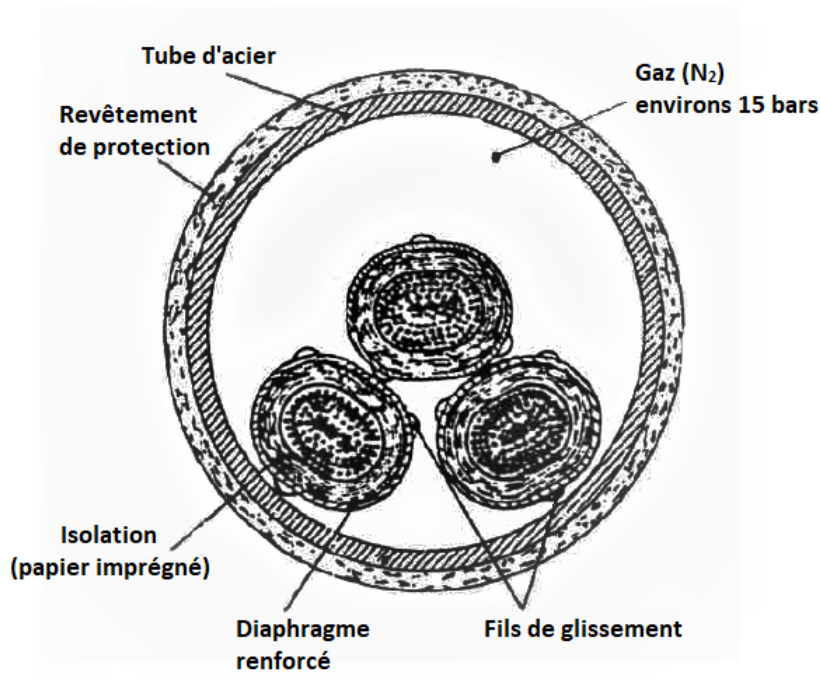


Figure 1.4 – Constituants d'un Câble tripolaire à pression externe de gaz [6]

1.2.4 Câbles à Isolation Synthétique

Par opposition aux anciens câbles à huile, ces câbles sont aussi appelés câbles secs. Ils sont en fait destinés à remplacer les câbles isolés à l'huile [1,2].

L'isolation synthétique, dont l'utilisation s'est beaucoup développée en basse et moyenne tensions (BT, MT), présente également en haute tension HT les mêmes attraits : homogénéité de l'isolant, absence de migration de la matière, suppression de la gaine de plomb, léger [2,4]. Parmi les matériaux diélectriques, le polyéthylène semblait le mieux adapté aux applications à haute tension, car il présente de très faibles pertes diélectriques ($5 \cdot 10^{-4}$), une faible permittivité relative ($\epsilon_r = 2,3$), relativement une bonne conductivité thermique ($400^\circ\text{C}\cdot\text{cm}/\text{W}$) et une rigidité diélectrique élevée [1]. Sa tenue sous contrainte électrique peut être améliorée par l'addition de certains adjuvants chimiques. L'extraction de ce matériau en fortes épaisseurs est une opération assez délicate. L'isolant doit être exempt de bulles et d'impuretés qui provoquent une concentration du champ et peuvent mener à des décharges partielles auxquelles le polyéthylène est très sensible. Le relativement bas point de ramollissement du polyéthylène pose vraiment problème pour ce type d'isolant. Le polyéthylène réticulé chimiquement (PRC ou XLPE en anglais) représente l'une des innovations majeures en termes de type d'isolant. Le polyéthylène réticulé chimiquement (PRC) ne présente pas les inconvénients du polyéthylène, d'où une amélioration de certaines de ses propriétés et notamment sa résistance aux hautes températures. Ainsi, sa température de fonctionnement atteint 90°C . Les câbles à isolation extrudée nécessitent des accessoires de jonction et d'extrémité spéciaux [6].

1.2.5 Câbles Supraconducteurs

La supraconductivité (supraconduction) a été découverte en 1911. L'état supraconducteur désigne la disparition brutale et complète de la résistance électrique observée dans un matériau, dit supraconducteur, lorsque sa température est abaissée en dessous d'une certaine valeur, dite température critique (T_c), celle-ci dépend de la nature et de la structure du matériau. Depuis 1986, la découverte d'une nouvelle famille de supraconducteurs, les cuprates, dont la température critique pourrait atteindre la température ambiante, permet d'entrevoir une multitude d'applications électrotechniques à grande échelle telles que le transport de fortes puissances, le stockage d'énergie, les champs magnétiques intenses permettant la mise en œuvre de trains à lévitation magnétique, etc. Ces applications nécessitent la fabrication de câbles supraconducteurs [11].

Les câbles supraconducteurs comportent en générale [12] :

- Un conducteur supraconducteur refroidi à la température cryogénique, actuellement de l'azote liquide à -196 °C ;
- Un isolant électrique ;
- une enveloppe extérieure.

Le matériau supraconducteur, constituant de base d'un câble supraconducteur, se présente généralement sous la forme d'un ruban de quelques millimètres de large sur quelques centaines de microns d'épaisseur. Ces rubans sont ensuite enroulés sur un support pour pouvoir constituer l'âme supraconductrice de câble [12 ,13].

Il existe 2 types principaux de câbles de transport d'énergie supraconducteurs [13] :

- Le « diélectrique chaud », dans lequel seul le conducteur est en matériau supraconducteur enveloppé d'une enveloppe cryostatique et refroidi à la température cryogénique, les autres composants du câble étant identiques à ceux des câbles classiques ;
- Le « diélectrique froid », dans lequel tous les composants du câble sont enveloppés dans un cryostat et refroidi à la température cryogénique. Plus performant, il est aussi plus cher et plus compliqué à fabriquer.

La figure 1.5 représente les constituants d'un câble supraconducteur tripolaire [14].

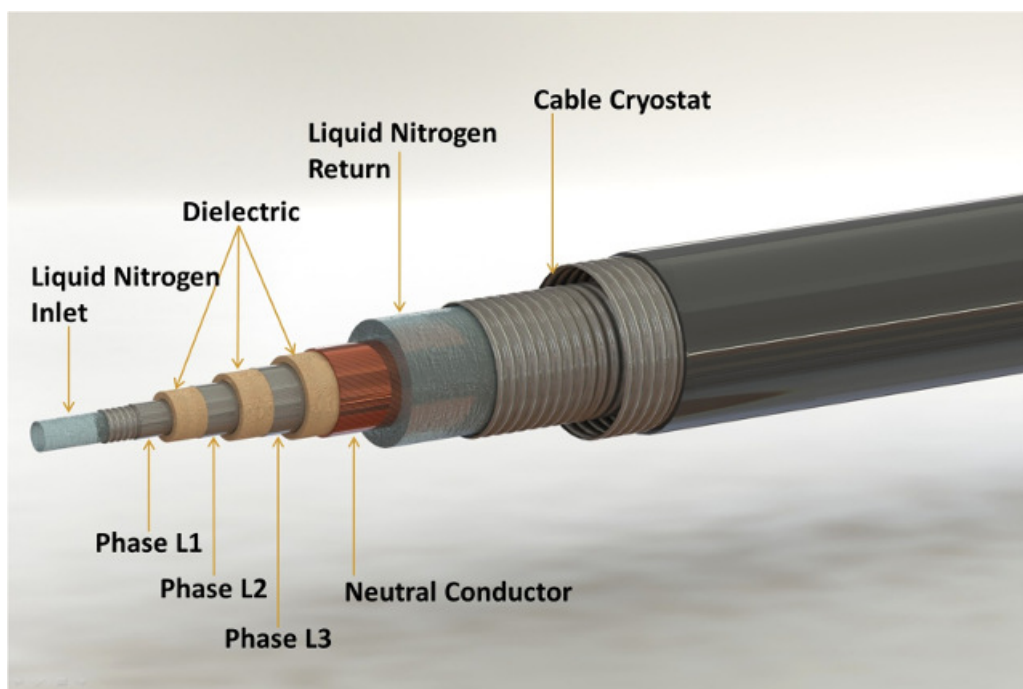


Figure 1.5 – Constitution d'un câble supraconducteur [14]

1.3 Structure des Câbles Haute Tension à Isolation Synthétique

La structure d'un câble de haute tension influe grandement sur son rendement. Les câbles à isolation synthétique ont vu un grand succès à cause des grands avantages qu'ils présentent, par rapport aux autres types de câbles à isolation traditionnelle [3,4]. La figure 1.6 présente la structure générale d'un câble coaxial à haute tension à isolation synthétique [4].

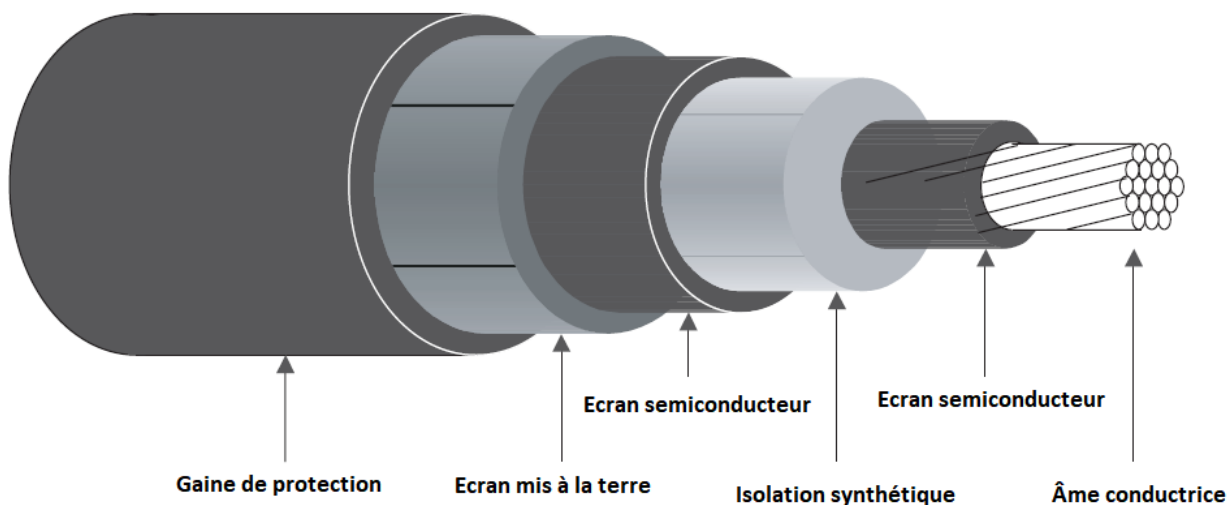


Figure 1.6 – Structure d'un câble coaxial à isolation synthétique [4]

1.3.1 Ame Conductrice

L'âme conductrice, ou tout simplement le conducteur, est la partie principale d'un câble. Elle a comme objectif la transmission d'énergie avec les plus faibles pertes. Elle est construite d'une façon à garantir le câble le plus économique tout en répondant aux exigences demandées (électrique, diélectrique et mécanique). Le choix du matériau, de la taille et de la conception du conducteur doit tenir compte d'éléments tels que, la valeur maximale admissible de courant électrique (Ampacity), la contrainte de tension sur le conducteur, les pertes du conducteur, la flexibilité, les considérations matérielles, les propriétés mécaniques, le coût, etc. Aux États-Unis et au Canada, les conducteurs sont généralement basés sur L'American Wire Gauge (AWG), qui est une unité de mesure permettant de définir le diamètre d'un câble électrique. Pour le reste du monde, les conducteurs sont basés sur la norme CEI228 et sont donc métriques [1, 4].

Il existe plusieurs métaux à faible résistivité (donc à haute conductivité) qui peuvent être utilisés comme conducteurs pour les câbles d'alimentation. Des exemples de métaux sont présentés dans le tableau (1.1) [3].

Table 1.1 – Principales résistivités des matériaux conducteurs à 20°C [3]

Métaux	Argent	Cuivre	Aluminium	Sodium	Nickel
Résistivité ($\Omega.m \times 10^{-8}$)	1,612	1,724-1,814	2,803-2,828	4,3	7,8

Pour deux âmes de même résistance et de même longueur, le rapport des sections d'aluminium et de cuivre est de 1,64; et le rapport des masses est de 1/2. L'aluminium paraît donc préférable tant que son prix n'est pas le double de celui du cuivre. L'aluminium demeure généralement le plus économique pour toutes les sections d'âmes et pour des tensions élevées [2].

Les différents types de conception du conducteur sont présentés sur la figure 1.7. Des conducteurs creux sont généralement utilisés afin de permettre la circulation de l'huile pour refroidir le conducteur. Pour les très fortes sections de conducteur et en courant alternatif, l'âme conductrice est généralement segmentée, ce qui offre plus de flexibilité et la réduction des pertes par effet de peau [1].

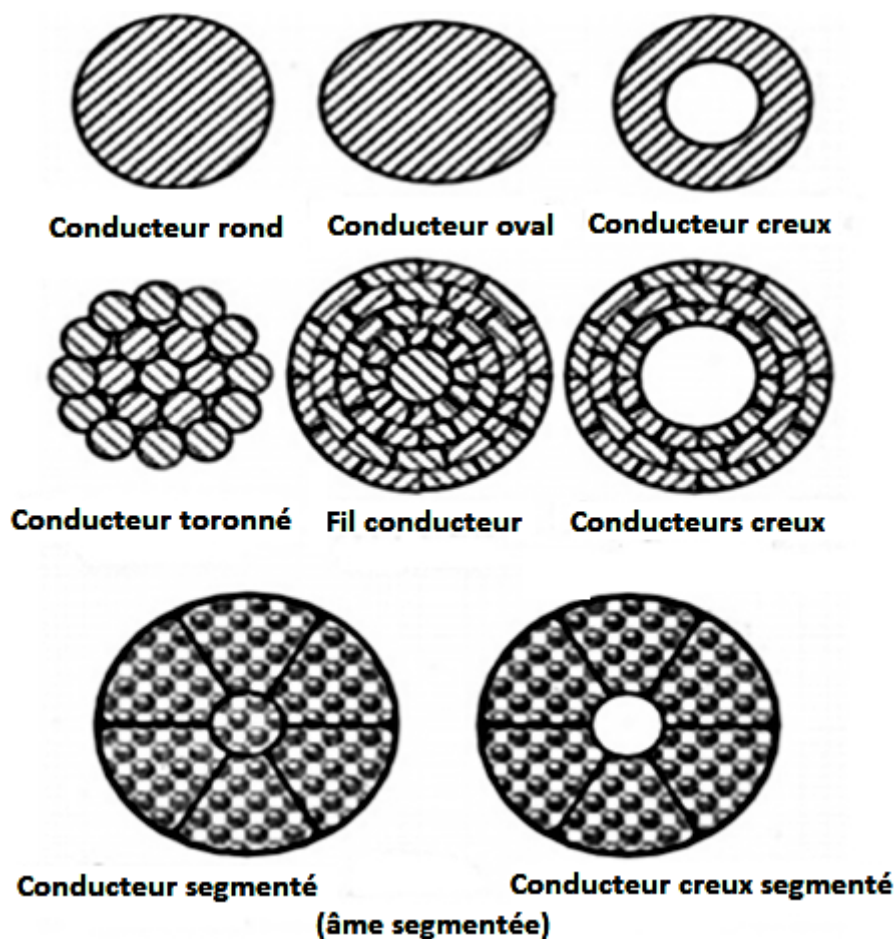


Figure 1.7 – Structures de l'âme conductrice [15]

1.3.2 Ecran Semi-conducteur

Dans les câbles de plus de 2 kV, un écran est requis par les normes de l'industrie sur les deux couches de l'isolation (interne et externe). Les matériaux utilisés sont soit des semi-conducteurs, soit des matériaux ayant une constante diélectrique élevée, appelés matériaux de contrôle des contraintes. Les deux permettent l'atténuation du champ électrique [3]. Les couches semi-conductrices sont faites de matériaux propres (un minimum d'impuretés indésirables) et sont extrudées pour être très lisses et rondes. Ces écrans conducteurs permettent de lisser le plus possible les irrégularités géométriques des conducteurs et d'éviter ainsi des amplifications locales du champ électrique qui seraient contraignantes pour la durée de vie des câbles haute tension. L'écran semi-conducteur permet de fluidifier le champ électrique radial et d'éviter les décharges partielles qui pourraient endommager l'isolation [1, 2]. Les normes de l'industrie exigent que les matériaux semi-conducteurs aient une résistivité maximale de $1000 \Omega.m$ [3].

1.3.3 Ecran Mis à la Terre

L'écran mis à la terre, ou écran métallique, est nécessaire pour fournir un chemin de faible résistance permettant au courant de défaut de s'écouler vers la terre [2]. Contrairement aux isolants et aux écrans semi-conducteurs qui ne survivront pas à un courant de plus de quelques milliampères (ils sont donc capables de gérer seulement les faibles quantités de courant de charge) et ne peuvent pas tolérer des courants asymétriques ou

de défaut, l'écran métallique est indispensable et doit impérativement pouvoir supporter des courants plus élevés. En revanche, une quantité excessive de métal dans cet écran du câble est coûteuse. En effet, un supplément de métal par rapport à la quantité réellement nécessaire augmente le coût initial du câble. Par ailleurs, plus la conductivité de l'écran est élevée, plus les pertes résultantes de la circulation du courant dans le conducteur central sont élevées. Une quantité suffisante de métal doit être fournie dans la conception du câble pour garantir que le câble activera la protection de secours en cas de sa défaillance en exploitation [3, 4].

1.3.4 Gaine de Protection

L'écran mis à la terre (écran métallique) est un élément clé pour une longue durée de vie des câbles. La couche métallique est elle-même protégée par une gaine extérieure en polymère. En raison des performances critiques requises de la gaine extérieure, un certain nombre de propriétés sont requises à savoir, une bonne résistance à l'abrasion, un bon traitement, de bonnes propriétés de barrière et une bonne résistance à la fissuration sous contrainte. L'expérience a montré que le matériau offrant les meilleures performances composites est une gaine extérieure à base de polyéthylène haute densité (HDPE). Ce matériau est couramment utilisé pour former la gaine de protection, du fait qu'il offre une bonne protection mécanique, une excellente résistance à l'abrasion et une faible pénétration de l'humidité [1, 3].

1.3.5 Isolation des Câbles Synthétiques

Les câbles traditionnels fonctionnant au-dessus de 46 kV, avaient utilisé du papier imprégné d'huile comme isolant. Cette isolation en papier est appliquée sous forme de couches minces enroulées sur l'âme du câble et est ensuite imprégnée d'un fluide diélectrique. Au cours des années et à cause du progrès des recherches dans le domaine d'isolation des câbles, l'isolation avec du papier imprégné dans l'huile a cédé sa place à des isolations faisant appel à des polymères [5].

Par rapport aux câbles traditionnels isolés au papier imprégné, les câbles isolés en polymères synthétiques présentent des avantages majeurs résident dans des meilleures propriétés diélectriques, des limites thermiques plus élevées, une résistance à l'humidité plus élevée ainsi qu'une résistance aux produits chimiques et aux solvants [16, 17]. Le polyéthylène (PE), le polyéthylène réticulé (PRC ou XLPE en littérature anglo-saxonne) et l'élastomère d'éthylène propylène (EPR) sont les matériaux les plus couramment utilisés pour l'isolation des câbles synthétiques [18].

Le polyéthylène (PE) est caractérisé par une très bonne rigidité diélectrique et de faibles pertes diélectriques. Il est utilisé depuis 1940 à cause de sa facilité de mise en œuvre et de son faible coût. Cependant, son utilisation en haute tension est très limitée par son comportement thermique, du fait qu'il se déforme à 80°C et il fond à 110°C. Le problème de sa tenue en température s'avère plus aigu avec l'augmentation des tensions de service au fil du temps [5, 19]. En raison de défaillances de service causées par le problème de tenue en température ainsi que le problème arborescence, le polyéthylène (PE) a été remplacé par le polyéthylène réticulé chimiquement (PRC) entre la fin des années 1970 et le début des années 1980. En effet, et en vue d'améliorer d'avantage les performances du polyéthylène, la méthode de réticulation a été introduite pour former le polyéthylène réticulé chimiquement (PRC) [5, 20]. Par ailleurs, les câbles isolés en PE installés sont

progressivement remplacés (ou rajeunis) [5, 20]. Des copolymères (EPR) ou terpolymères élastomères d'éthylène propylène (EPDM) ont également été utilisés pour l'isolation des câbles moyenne tension. Bien que les câbles EPR ont été disponibles depuis les années 1960, leur utilisation était toujours moins courante que celle du PRC, en raison de leurs coûts plus élevés et de pertes d'exploitation [17, 5].

Contrairement au PRC qui est un polymère semi-cristallin, l'EPR est un élastomère (caoutchouc) et nécessite donc l'incorporation de charges minérales inorganiques afin de servir une isolation satisfaisante. À partir du milieu des années 1980, le PRC a été progressivement remplacé par le PRC « retardateur d'arborescence » (TR-XLPE) [17, 5].

Depuis le début des années 1980 et jusqu'à la fin des années 1990, une seule qualité de TR-XLPE a été utilisée commercialement en Amérique du Nord. Plus récemment, plusieurs autres qualités de TR-XLPE sont devenues disponibles [5].

1.3.5.1 Propriétés Diélectriques des Polymères

Un polymère est un système formé par un ensemble de macromolécules issu de l'assemblage covalent d'un grand nombre d'unités répétitives plus communément appelées unités monomères (des molécules comprenant un nombre élevé de motifs de répétition de faible masse moléculaire) [8].

Le degré de polymérisation, la nature chimique des monomères et la nature et le taux des constituants ajoutés (antioxydant, durcisseur, déshydratant, ...) sont les facteurs principaux qui déterminent les propriétés des polymères [21].

Selon leurs propriétés thermomécaniques, les polymères sont classés en trois types [22] :

- Les polymères thermoplastiques qui sont constitués de macromolécules de taille limitée et structure linéaire. Ces polymères perdent leurs formes à haute température ;
- Les polymères thermodurcissables qui ne fondent pas mais se décomposent à température élevée ;
- Les polymères élastomères présentant des propriétés « élastiques ».

1.3.5.2 Propriétés Diélectriques des Polymères

1.3.5.2.1 Principe de la Polarisation

La polarisation des diélectriques dépend principalement de leurs propriétés moléculaires et structures. Les polymères possèdent plusieurs modes de polarisation qui sont dus à la déformation de la répartition des charges électriques sous l'influence du champ électrique [23, 24].

Lorsqu'un champ électrique alternatif est appliqué, il y'aura un déphasage entre ce champ et l'apparition du dipôle, cette polarisation est due au déplacement des charges positives et négatives. Cette relaxation diélectrique induit une perte d'énergie responsable des pertes diélectriques [20].

Lors de l'application d'une tension alternative complexe \bar{U} aux bornes d'un condensateur plan contenant un diélectrique, un courant alternatif complexe \bar{I} en résulte et possède deux

composantes comme il est représenté sur le diagramme de Fresnel de la figure 1.8 [23] :

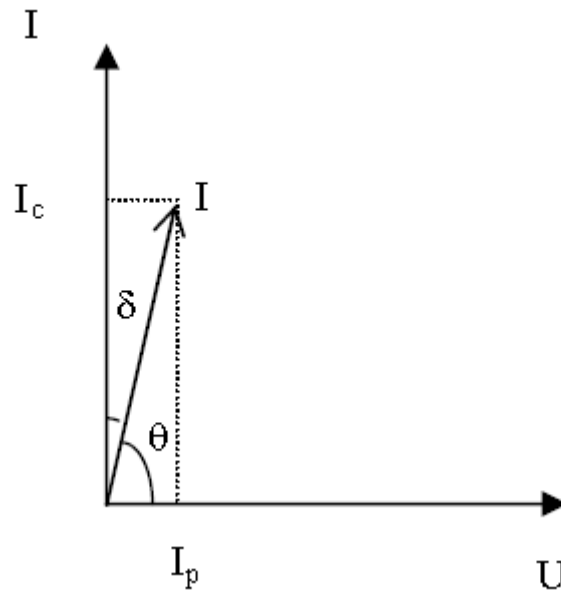


Figure 1.8 – Diagramme de Fresnel d'un condensateur

Ainsi,

$$\bar{I} = \bar{I}_c + \bar{I}_p \quad (1.1)$$

Tel que :

$$\bar{I}_c = j C_s \omega \bar{U} \quad (1.2)$$

$$\bar{I}_p = \frac{\bar{U}}{R} \quad (1.3)$$

\bar{I}_c : Courant de charge;

\bar{I}_p : Courant de perte d'énergie dans le diélectrique (due à la polarisation);

ω : Pulsation du courant alternatif;

C_s : Capacité du condensateur parfait;

R : Résistance du diélectrique réel.

L'angle δ est appelé angle de pertes diélectriques. En pratique, \bar{I} est proportionnel à $C_0 \bar{U}$ et peut être écrit :

$$\bar{I} = j \omega (\epsilon' - j \epsilon'') C_0 \bar{U} \quad (1.4)$$

On définit aussi la permittivité relative complexe par :

$$\epsilon^* = (\epsilon' - j \epsilon'') \quad (1.5)$$

La partie réelle ϵ' est la permittivité relative en courant alternatif à une fréquence et une température donnée. Elle présente l'aptitude d'un matériau à stocker de l'énergie électrique. La partie imaginaire ϵ'' est l'indice de pertes diélectriques. La tangente de l'angle de pertes, facteur de pertes diélectriques, est donnée par la relation [20, 23] :

$$\tan(\delta) = \frac{I_p}{I_c} = \frac{\epsilon''}{\epsilon'} \quad (1.6)$$

1.3.5.2.2 Polarisation à l'Echelle Macroscopique

Dans un vide contenant des charges libres, le champ électrique \vec{E} et l'induction \vec{D} sont liés par la relation [20, 23] :

$$\vec{D} = \varepsilon_0 \vec{E} \quad (1.7)$$

ε_0 : est la permittivité du vide.

Dans le cas d'un diélectrique, les charges dues au phénomène de polarisation \vec{P} sont tenues en compte. L'induction dans le diélectrique devient :

$$\vec{D} = \varepsilon_0 \vec{E} + \vec{P} \quad (1.8)$$

La polarisation \vec{P} dans un milieu linéaire homogène et isotrope est égale à :

$$\vec{P} = \varepsilon_0 \chi \vec{E} \quad (1.9)$$

χ : est la susceptibilité électrique.

L'induction s'écrit donc :

$$\vec{D} = \varepsilon_0(1 + \chi) \vec{E} \quad (1.10)$$

En posant $1 + \chi = \varepsilon_r$ et $\varepsilon_0 \varepsilon_r = \varepsilon$ on obtient :

$$\vec{D} = \varepsilon_0 \varepsilon_r \vec{E} \quad (1.11)$$

La polarisation \vec{P} s'écrit aussi :

$$\vec{P} = \varepsilon_0(\varepsilon_r - 1) \vec{E} \quad (1.12)$$

1.3.5.2.3 Polarisation à l'Echelle Microscopique

Dans le cas d'un diélectrique polarisé, un moment dipolaire \vec{p} s'impose au niveau de chaque molécule induit par un champ local \vec{E}_L [20,23]. Vu que la polarisation globale \vec{P} se définit comme la somme de n moments dipolaires \vec{p} par unité de volume, soit :

$$\vec{P} = n \vec{p} \quad (1.13)$$

La polarisation s'écrit donc comme suit :

$$\vec{P} = n \alpha_T \vec{E}_L \quad (1.14)$$

α_T : Constante de la polarisabilité de la molécule ;

n : Nombre de dipôles par unité de volume.

Le champ local \vec{E}_L est la somme du champ imposé par le champ \vec{E} de source et le champ \vec{E}_d résultant de la présence de dipôles dans tout le volume du diélectrique.

$$\vec{E}_L = \vec{E} + \vec{E}_d \quad (1.15)$$

Le champ local qui agit sur le dipôle s'écrit donc :

$$\vec{E}_L = \vec{E} + \frac{\vec{P}}{3\epsilon_0} \quad (1.16)$$

En remplaçant avec l'équation (1.1) :

$$\vec{E}_L = \frac{\epsilon_r + 2}{3} \vec{E} \quad (1.17)$$

On obtient la relation de Clausius-Mossotti :

$$\frac{\epsilon_r - 1}{\epsilon_r + 2} = \frac{\chi}{\epsilon_r + 2} = \frac{n \alpha_T}{3\epsilon_0} \quad (1.18)$$

Dans le cas où plusieurs mécanismes de polarisation interviennent :

$$\frac{\epsilon_r - 1}{\epsilon_r + 2} = \frac{1}{3\epsilon_0} \sum_{i=1}^n n_i \alpha_i \quad (1.19)$$

1.3.5.2.4 Types de Polarisation

Dans les polymères les plus utilisés (Polyéthylène (PE), Polyéthylène réticulé chimiquement (PRC)...), chaque polarisation induit une relaxation et contribue à la valeur de la permittivité relative, ce qui induit une augmentation du facteur des pertes diélectriques.

De ce fait, on distingue quatre types de polarisation [20, 23] :

- Polarisation électronique ;
- Polarisation ionique ;
- Polarisation dipolaire ;
- Polarisation par charge d'espace.

1.3.5.3 Polymères Utilisés dans l'Isolation des Câbles

1.3.5.3.1 Polyéthylène (PE)

Le polyéthylène est un polymère hydrocarboné composé exclusivement de carbone et d'hydrogène. C'est un matériau thermoplastique de la famille de polyoléfines. Il est fabriqué à partir du monomère éthylène [5, 20, 23]. Sa molécule se présente sous forme de chaînes contenant 1000 à 2000 monomères. Sa formule chimique du polyéthylène est représentée dans la figure 1.9 ci-dessous [5].

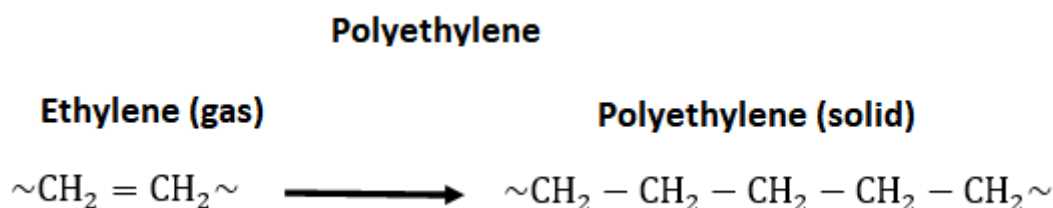


Figure 1.9 – Formule chimique du polyéthylène [5]

Les molécules de polyéthylène peuvent présenter des ramifications qui influencent la cristallinité et la densité du matériau à cause de la nature volumineuse de la structure chimique des chaînes polymères [5, 20, 23]. La figure 1.10 représente les structures de polyéthylènes représentant sa densité en fonction des ramifications [5].

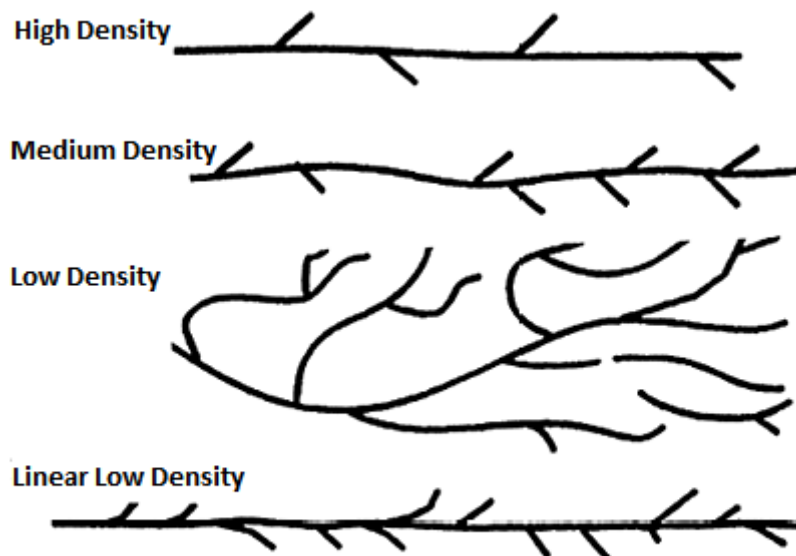


Figure 1.10 – Structures de polyéthylène représentant sa densité en fonction des ramifications [5]

Selon les conditions de polymérisation (pression, température, catalyseurs, ...), on distingue deux grandes variétés de polyéthylène : le polyéthylène à basse densité (PEBD) et le polyéthylène à haute densité (PEHD). Ajouté à ces deux types, il y a le polyéthylène réticulé chimiquement dit PRC qui peut être obtenu par réticulation [23].

1.3.5.3.2 Polyéthylène Basse Densité (PEBD)

Le polyéthylène basse densité est constitué de chaînes macromoléculaires principales éloignées les unes des autres par des chaînes latérales comprenant des ramifications latérales de longueurs variables. Il est fabriqué à haute pression entre 1000 et 5000 bars et une température entre 150°C et 400°C [23, 25].

1.3.5.3.2.1 Propriétés du PEBD

a) Propriétés physico-chimiques

Le PEBD est un polymère semi-cristallin. Sa densité est entre 0,91 et 0,92 son taux de cristallinité est d'environ 43% à 50% et sa température de fusion cristalline est située entre 105°C et 115°C [25].

Le PEBD présente une bonne résistance chimique, il est donc [23, 25] :

- Très résistant aux acides faibles ;
- Résistant aux acides forts non oxydants ;
- Très résistant aux bases faibles et fortes.

b) Propriétés mécaniques

Les propriétés mécaniques du PEBD dépendent essentiellement de sa masse molaire et de sa cristallinité. Les principales propriétés consistent en [20, 23, 25] :

- La résistance à la traction variant de 9 à 23 MPa ;
- L'allongement à la rupture variant de 150% à 1000% ;
- Le module d'élasticité en traction variant de 200 à 500 MPa.

c) Propriétés électriques

Le PEBD est une substance non polaire, caractérisée par [23] :

- Une permittivité relative faible (~ 2 à 3) limitant ainsi le courant de déplacement ;
- Un facteur de pertes diélectriques relativement faible ;
- Une rigidité diélectrique élevée.

1.3.5.3.3 Polyéthylène Haute Densité PEHD

La densité du PEHD comme son nom l'indique est plus élevée que celle du PEBD à cause de ses chaînes qui sont plus alignées que celles de PEBD. Il est fabriqué à basse pression de polymérisation inférieure à 50 bars et la température est voisine de 100°C . Sa densité est de 0,96 et son taux de cristallinité de 93%. Sa température de fusion est comprise entre 130°C et 145°C [24].

1.3.5.3.4 Polyéthylène Réticulé Chimiquement PRC (XLPE)

La réticulation est le processus consistant à assembler différentes chaînes de polyéthylène par réaction chimique. Le PRC est un polymère thermodurcissable. Il maintient sa stabilité de forme à des températures élevées contrairement au polyéthylène [17, 5, 26]. La figure 1.11 représente une description simplifiée du processus de réticulation [23].

Le PRC peut être considéré comme un polyéthylène ramifié où l'extrémité de la ramification est connectée à une chaîne PE différente au lieu de simplement se suspendre [5].

D'autres avantages, les polyéthylènes réticulés incluent la résistance à la déformation et à la fissuration sous contrainte. Il est à noter que les propriétés électriques du polyéthylène ne sont pas nécessairement améliorées par réticulation [20].

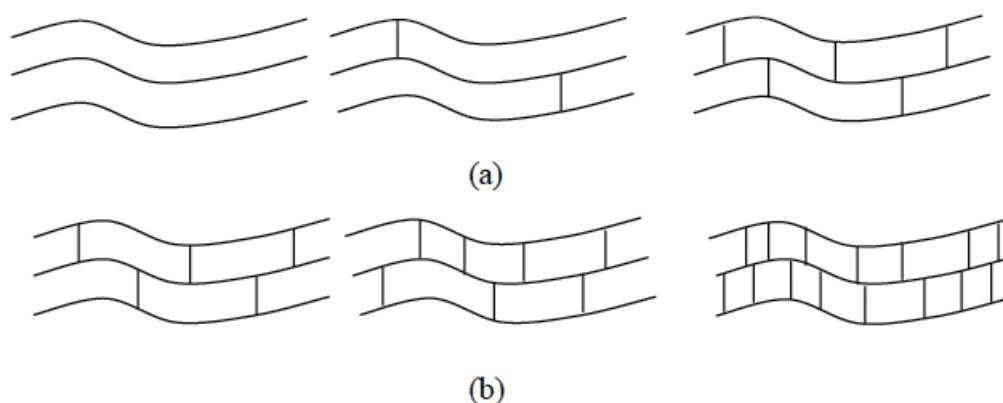


Figure 1.11 – Description simplifiée du processus de réticulation : (a) polymère linéaire (b) polymère tridimensionnel [23]

Il existe trois méthodes industrielles pour la réticulation du polyéthylène, à savoir par irradiation, la réticulation avec le peroxyde et la réticulation au silane [23].

1.3.5.3.4.1 Polyéthylène Réticulé Retardateur d'Arborescence d'Eau (TR-XLPE)

Pour améliorer les performances et la durée de vie des polymères conventionnels, polyéthylène ou le polyéthylène réticulé chimiquement PRC (XLPE), plusieurs tentatives ont été faites pour retarder les arborescences d'eau. Il existe trois approches fondamentales pour parvenir à un retard de telles arborescences [5] :

- Utilisation d'un copolymère (polymère issu de la copolymérisation d'au moins deux types de monomère) polaire à la place d'un homopolymère de polyéthylène ;
- Utilisation d'un ou plusieurs additifs placés dans l'homopolymère (ou copolymère) ;
- Utilisation les deux approches précédentes à la fois.

1.3.5.3.5 Copolymère Ethylène-propylène (EPR)

Le copolymère éthylène-propylène aussi appelé élastomère résulte de la polymérisation d'un monomère d'éthylène avec du propylène. Le rapport de l'éthylène au propylène peut varier sur une large plage. Ce copolymère a des propriétés significativement différentes de celles du PE, PRC (XLPE) ou TR-XLPE tout en fournissant les caractéristiques diélectriques nécessaire pour les câbles moyenne et haute tension [5, 27].

Les caractéristiques de la structure du copolymère éthylène-propylène sont les suivantes [5] :

- Branches à chaîne courte ;
- Structure non cristalline-amorphe ;
- Nécessite des charges de renforcement ;
- Doit être réticulé.

La formule chimique du copolymère éthylène-propylène est représenté sur la figure 1.12 suivante [5] :

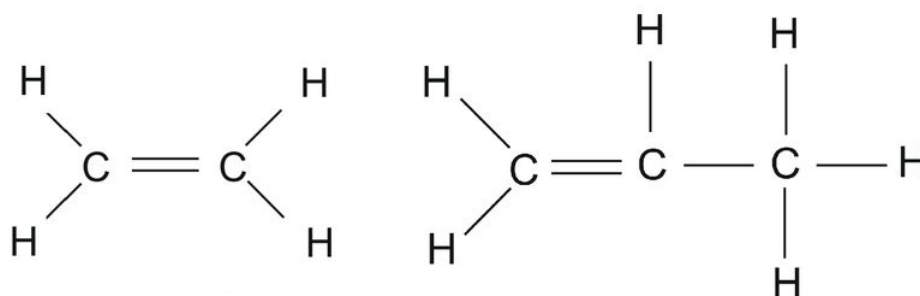


Figure 1.12 – Formule chimique du copolymère éthylène-propylène [5]

1.4 Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons d'abord présenté les différents câbles haute tension, et leur évolution au cours du temps, en allant des câbles à isolation au papier imprégné jusqu'aux câbles supraconducteurs. Durant ces dernières années, les isolants synthétiques, sous forme de polyéthylène (PE), de polyéthylène réticulé (XLPE), Polyéthylène réticulé retardateur d'arborescence d'eau (TR-XLPE) ou de caoutchouc éthylène-propylène (EPR), ont remplacé les isolations au papier imprégné. Le PE est un excellent isolant. Toutefois, il a une limitation de la température de fonctionnement et des réserves thermiques dans le cas des courts-circuits. L'EPR fonctionne également comme un excellent isolant. Cependant, il est limité en tension; une augmentation de celle-ci exige une élévation considérable du coût de l'EPR et engendre des pertes diélectriques comparativement élevées. L'utilisation du XLPE est réalisée par réticulation de la chaîne du polymère PE pour former du polyéthylène réticulé et la limite de température est augmentée. Les isolants XLPE et TR-XLPE sont principalement utilisés dans les câbles haute tension à isolation extrudée installés dans la plupart des pays en raison de leurs nombreux avantages.

Chapitre 2 :

Calcul du Champ Electrique Généré par les Câbles Electriques

Chapitre 2

Calcul du Champ Electrique Généré par les Câbles Electriques

2.1 Introduction

LE calcul du champ électrique est une étape primordiale lors de la conception des câbles haute tension. Une mauvaise estimation du champ peut mener à un surdimensionnement qui peut causer des pertes économiques énormes, ou un sous-dimensionnement qui cause des dégâts humains et matériels [1, 3]. Pour une bonne estimation de ce champ en courants alternatif et continu, plusieurs approches de calcul analytiques et numériques sont évoquées dans ce chapitre. Ce calcul se fait par la détermination des deux composantes, radiale et tangentielle, du champ et du potentiel électrique [4]. Les équations du Maxwell offrent une base mathématique pour l'analyse rigoureuse des problèmes électromagnétiques [1]. En prenant en compte la différence entre le modèle alternatif et celui continu, la combinaison entre les différentes équations de Maxwell mène à la résolution des équations aux dérivées partielles de Laplace et Poisson, respectivement [3, 4].

2.2 Calcul Analytique du Champ Electrique

2.2.1 Calcul de la Composante Radiale du Champ Electrique

2.2.1.1 Calcul de la Composante Radiale du Champ Electrique en Courant Alternatif

La figure 2.1 représente une coupe verticale d'un câble coaxial, de rayon interne r_1 et de rayon externe r_2 .

La capacité du câble coaxial mentionné précédent est donnée par la formule suivante [1] :

$$C = \frac{2\pi\epsilon_0\epsilon_r}{\ln\left(\frac{r_2}{r_1}\right)} \quad (2.1)$$

r_1 : Le rayon interne du diélectrique ;

r_2 : Le rayon externe du diélectrique ;

ϵ_0 ($\approx 8,854.10^{-12}$ [F/m]) : La permittivité du vide ;

ϵ_r : La permittivité relative du diélectrique ;

En appliquant le théorème de Gauss dans l'enveloppe isolante, l'intensité du champ

électrique E dans l'isolation du câble coaxial à une distance r du centre du câble comme montré sur la figure 2.1 est donnée par [1] :

$$E = \frac{U}{r \ln \left(\frac{r_2}{r_1} \right)} \quad (2.2)$$

U : La différence de potentiel totale à travers l'isolation.

Le champ maximal est à une distance $r = r_1$ du centre de l'âme conductrice :

$$E_{max} = \frac{U}{r_1 \ln \left(\frac{r_2}{r_1} \right)} \quad (2.3)$$

Le champ minimal est à une distance $r = r_2$ du centre de l'âme conductrice :

$$E_{min} = \frac{U}{r_2 \ln \left(\frac{r_2}{r_1} \right)} \quad (2.4)$$

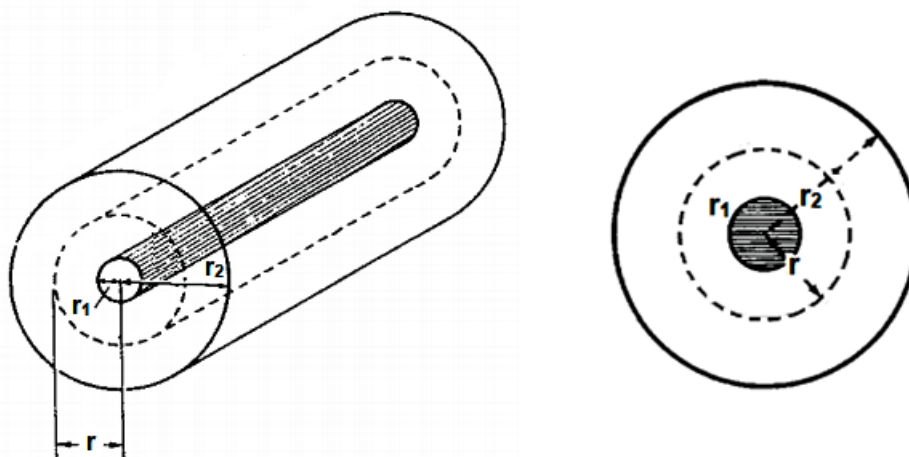


Figure 2.1 – Coupe verticale dans un câble coaxial [1]

2.2.1.2 Calcul de la Composante Radiale du Champ Electrique en Courant Continu

Les isolations synthétiques utilisées dans les câbles de transport d'énergie électrique en courant alternatif en haute tension (HTCA) ne sont généralement pas utilisées dans les câbles à courant continu, pour des raisons techniques et industrielles. Pour ce type de câbles, trois types de technologies d'isolation sont employés [2] :

- Câbles de type solide : câbles à isolation au papier imprégné de matière visqueuse;
- Câbles à gaz : câbles à isolation au papier pré-imprégné à pression interne de gaz;
- Câbles à huile (Oil Filled) : câbles isolés au papier imprégné à pression interne d'huile.

A cause de ces types d'isolation à papier imprégné, le champ électrique dans les câbles à courant continu ne dépend pas seulement de la géométrie du câble, mais aussi de la température locale. Autrement dit, c'est la conductivité électrique de l'enveloppe isolante qui gouverne la distribution du champ électrique [28].

Cette conductivité s'écrit sous la forme [28, 29] :

$$\sigma(r) = \sigma_0 \exp(\alpha_T \theta(r) + \beta_E E(r)) \quad (2.5)$$

σ_0 : La conductivité électrique de l'isolation à température ambiante (dite asymptotique);

$\theta(r)$: La température en un point r de l'enveloppe isolante;

$E(r)$: Le champ électrique au même point r ;

α_T : Le coefficient de température ($\approx 0,1K^{-1}$);

β_E : Le coefficient de champ électrique ($\approx 0,033 \text{ mm/kV}$).

Le champ électrique en un point r de l'isolant est calculé par étape. On commence par déterminer le potentiel U . En effet, par application de la loi d'Ohm sur une couronne d'épaisseur dr , on peut écrire [2] :

$$dU = I.dR \quad (2.6)$$

I : Le courant traversant l'isolant;

dR : La résistance de la couronne, $dR = \frac{dr}{\sigma 2\pi r}$;

dU : La différence de potentiel appliquée sur la couronne dr .

En remplaçant (2.5) dans (2.6) :

$$dU = \frac{I dr}{\sigma_0 2\pi r} \exp(-\alpha_T \theta(r) - \beta_E E(r)) \quad (2.7)$$

$\theta(r)$ est obtenu en considérant d'une part, le flux thermique entre le conducteur à la température θ_1 et la surface cylindrique de rayon r dans l'isolant et, d'autre part, la chute de température $\Delta\theta$ entre le conducteur (r_1) et l'isolant (r_2), ρ_{th} étant la résistivité thermique de l'isolant [2, 28] :

$$\theta(r) - \theta(r_1) = \frac{\rho_{th}}{2\pi} \ln\left(\frac{r}{r_1}\right) \quad (2.8)$$

$$\Delta\theta = \theta(r_2) - \theta(r_1) = \frac{\rho_{th}}{2\pi} \ln\left(\frac{r_2}{r_1}\right) \quad (2.9)$$

$$\theta(r) - \theta(r_1) = \frac{\Delta\theta \ln\left(\frac{r}{r_1}\right)}{\ln\left(\frac{r_2}{r_1}\right)} \quad (2.10)$$

Comme on a :

$$E(r) = -\frac{dU}{dr} \quad (2.11)$$

La relation (2.7) peut s'écrire comme suit :

$$\left. \begin{aligned} E(r) \exp(\beta_E E(r)) &= -\frac{I}{\sigma_0 2\pi r} \exp(-\alpha_T E(r)) \\ &= -\frac{I}{\sigma_0 2\pi r} \exp\left(-\alpha_T \left(\theta(r_1) + \frac{\Delta\theta \ln\left(\frac{r}{r_1}\right)}{\ln\left(\frac{r_2}{r_1}\right)}\right)\right) \\ &= -\frac{I}{\sigma_0 2\pi r} \left(\frac{r}{r_1}\right)^m \exp(-\alpha_T(\theta(r_1))) \end{aligned} \right\} \quad (2.12)$$

avec :

$$m = \frac{\alpha_T \Delta \theta}{\ln \left(\frac{r_2}{r_1} \right)} \quad (2.13)$$

En considérant la constante C_{te} comme étant :

$$C_{te} = -\frac{I}{\sigma_0 2\pi} \frac{\exp(-\alpha_T(\theta(r_1)))}{(r_1)^m} \quad (2.14)$$

En remplaçant l'équation (2.14) dans (2.12) :

$$E(r) \exp(\beta_E E(r)) = C_{te} r^{m-1} \quad (2.15)$$

Il faut ajouter à cette équation (2.15), la condition (2.16) [28] :

$$U = -\int_{r_1}^{r_2} E(r) dr \quad (2.16)$$

Vu que l'équation (2.15) n'a pas de solution analytique directe, elle peut être résolue par deux manières [2] :

La première consiste à supposer que le champ électrique au milieu de l'isolant $\left[r = \frac{r_1+r_2}{2} \right]$ est égal au champ moyen :

$$E \left(\frac{r_1 + r_2}{2} \right) = \bar{E} = \frac{U}{r_1 - r_2} \quad (2.17)$$

\bar{E} : Le champ électrique moyen.

De l'équation (2.15), le champ électrique au milieu du câble s'écrit :

$$\bar{E} \exp(\beta_E \bar{E}) = C_{te} \left(\frac{r_1 + r_2}{2} \right)^{m-1} \quad (2.18)$$

L'expression (2.18) permet d'écrire :

$$C_{te} = \frac{\bar{E} \exp(\beta_E \bar{E})}{\left(\frac{r_1+r_2}{2} \right)^{m-1}} \quad (2.19)$$

En remplaçant (2.19) dans (2.15), on obtient :

$$E(r) \exp(\beta_E E(r)) = \bar{E} \exp(\beta_E \bar{E}) \left(\frac{2r}{r_1 + r_2} \right)^{m-1} \quad (2.20)$$

Donc on peut faire le calcul point par point.

La seconde consiste à diviser l'isolation en couches cylindriques d'épaisseur h_n [2].

On obtient alors :

$$U_k = \frac{\frac{U_{k+1}+U_{k-1}}{2} \left(1 + \beta_E \frac{|U_{k+1}-U_{k-1}|}{2h_n} \right) + \frac{h_n}{4} (U_{k+1} - U_{k-1}) \left(\frac{1}{r} + \alpha_T \frac{d\theta}{dr} \right)}{1 + \beta_E \frac{|U_{k+1}-U_{k-1}|}{2h_n}} \quad (2.21)$$

avec : $\frac{d\theta}{dr} = \frac{\Delta\theta}{r \ln\left(\frac{r_2}{r_1}\right)}$ dans la couche r .

D'abord, on calcul les valeurs U_0 et U_n en rapport avec la tension appliquée et on choisit U_k linéairement entre ces deux valeurs. Puis on calcule la totalité des valeurs U_k , ces $n+1$ valeurs calculées vont être réutiliser comme valeurs initiales pour continuer le calcul. On peut noter que la convergence de cette méthode est lente [2].

Trois domaines peuvent être distingués selon m : [2]

- $m > 1$: Ce qui veut dire que $\Delta\theta > \frac{1}{\alpha_T} \ln \frac{r_2}{r_1}$. Dans ce domaine, le câble est en charge normale. Dans ces conditions, le champ électrique est maximal au niveau de l'écran.
- $m = 1$: Ce qui veut dire que $\Delta\theta = \theta_0$ (en général environ 5°C). Pour ce domaine, le champ dans l'enveloppe isolante est constant et égal au champ moyen $\frac{U}{r_2 - r_1}$.
- $0 \leq m < 1$: Cela signifie que $\Delta\theta < \frac{1}{\alpha_T} \ln \frac{r_2}{r_1}$. Dans ce domaine, le câble est très faiblement chargé et à température homogène. Le champ électrique, dans ce cas, est quasi hyperbolique et il atteint son maximum au niveau de l'âme (la partie conductrice).

Ces résultats peuvent être récapitulés sur la figure 2.2 [2].

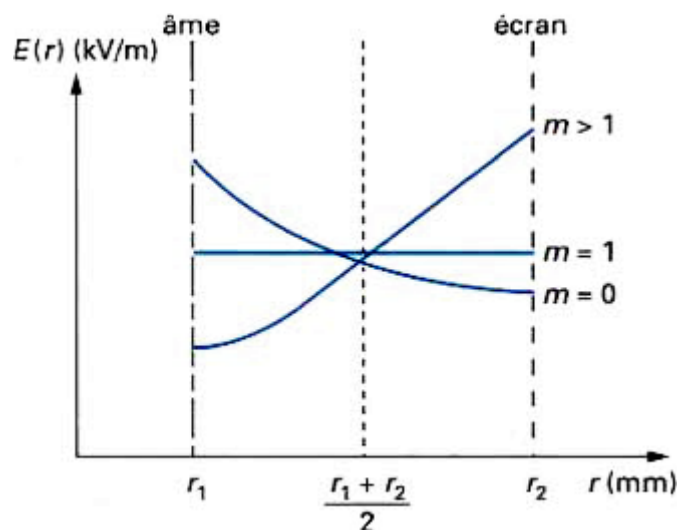


Figure 2.2 – Répartition du champ électrique dans l'enveloppe isolante d'un câble à courant continu [2]

2.2.2 Calcul Analytique de la Composante Tangentielle du Champ Electrique

L'écran conducteur et la couche semi-conductrice sont retirés depuis la terminaison du câble d'une longueur L comme montré sur la figure 2.3. Dans ces conditions, le champ ne deviendra plus radial du fait de l'introduction d'une composante tangentielle. Une méthode proposée par Malik et al [30] permet de calculer le champ aux terminaisons d'un câble. La méthode consiste à émerger la terminaison du câble dans un tube remplie d'eau désionisée (déméralisée) pour pouvoir appliquer des tensions supérieures à la tension nominale et d'éviter les décharges partielles. Si la terminaison du conducteur est en contact avec l'air, de telles décharges peuvent apparaître pour des tensions très inférieures à celle nominale, se propager et éventuellement mener au claquage du diélectrique [30].

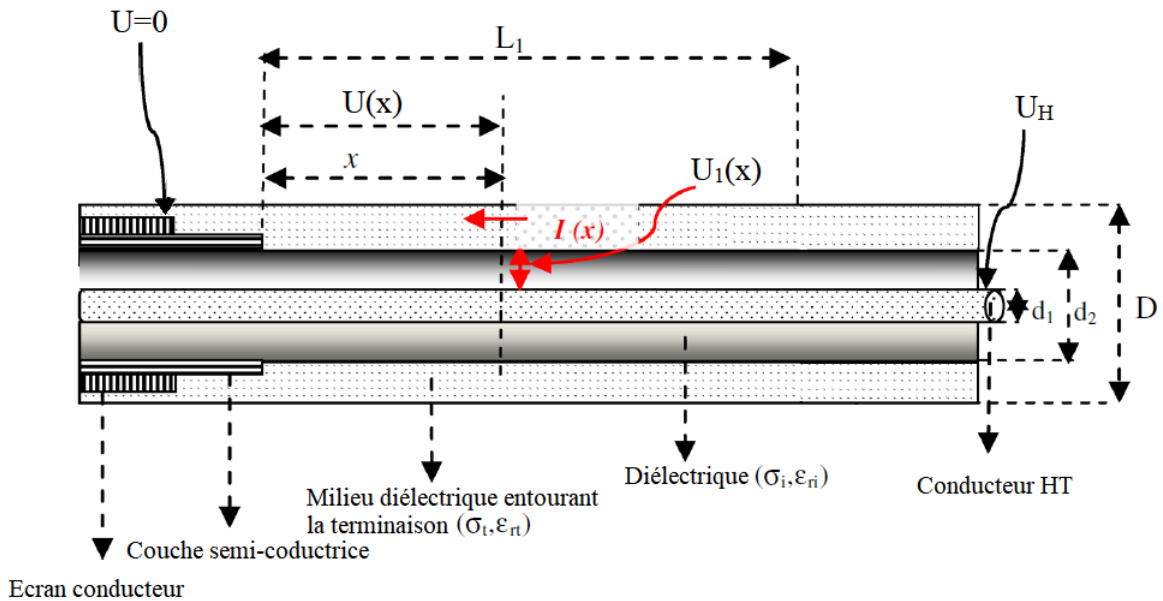


Figure 2.3 – Terminaison d'un câble HT [30]

d_1 : Le diamètre interne du diélectrique ;

d_2 : Le diamètre externe du diélectrique ;

D : Diamètre du tube ;

$U(x)$: La tension dans le milieu diélectrique à une distance x depuis la couche semi-conductrice ;

$U_1(x)$: La tension dans le diélectrique (isolation du câble) à une distance x depuis la couche semi-conductrice ;

$I(x)$: Le courant circulant dans le milieu diélectrique à une distance x depuis la couche semi-conductrice ;

U_H : La tension appliquée au conducteur ;

ϵ_{ri} : La permittivité relative du diélectrique ;

ϵ_{rt} : La permittivité relative du milieu diélectrique entourant la terminaison du câble ;

σ_i : La conductivité du diélectrique ;

σ_t : La conductivité du milieu diélectrique entourant la terminaison du câble.

La terminaison du câble HT de la figure 2.3 peut être modélisée suivant la longueur de la terminaison du câble sous forme d'un circuit électrique présenté sur la figure 2.4.

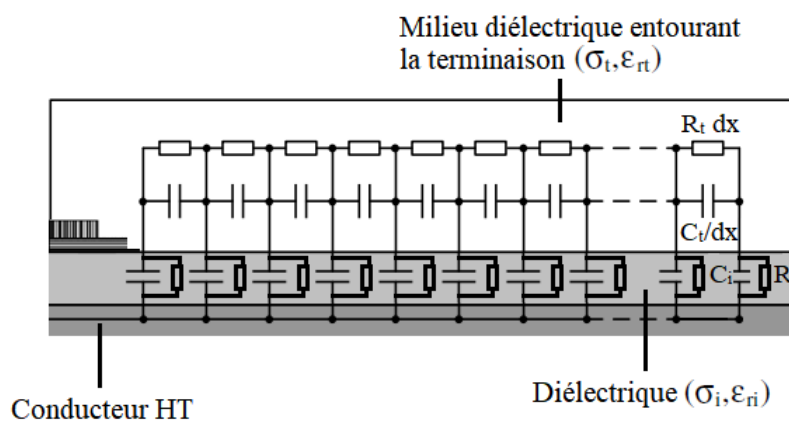


Figure 2.4 – Circuit équivalent d'une terminaison d'un câble HT

R_i : La résistance du diélectrique ;

C_i : La capacité du diélectrique ;

R_t : La résistance du milieu diélectrique entourant la terminaison du câble ;

C_t : La capacité du milieu diélectrique entourant la terminaison du câble.

Le circuit équivalent élémentaire du diélectrique est représenté sur la figure 2.5 suivante :

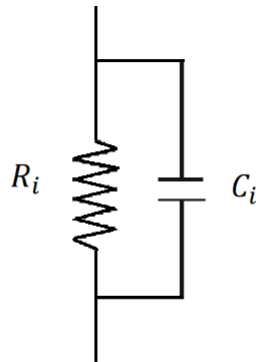


Figure 2.5 – Circuit électrique équivalent élémentaire du diélectrique pour une longueur dx

L'admittance du circuit précédent s'écrit sous la forme suivante :

$$Y_i = \left[\frac{1}{R_i} + j\omega C_i \right] \quad (2.22)$$

La résistance du diélectrique est définie par :

$$R_i = \int_{d_1}^{d_2} \frac{\rho_i}{2\pi r L} dr = \frac{\rho_i}{2\pi L} \ln \left(\frac{d_1}{d_2} \right) \quad (2.23)$$

Pour une unité de longueur, cette résistance devient :

$$R_i = \frac{\rho_i}{2\pi} \ln \left(\frac{r_1}{r_2} \right) = \frac{1}{2\pi\sigma_i} \ln \left(\frac{d_1}{d_2} \right) \quad (2.24)$$

La capacité a été définie précédemment dans l'expression (2.1) par :

$$C_i = \frac{2\pi\epsilon_0\epsilon_{ri}}{\ln \left(\frac{d_2}{d_1} \right)} \quad (2.25)$$

En remplaçant les expressions de la résistance (2.24) et de la capacité (2.25) respectivement par unité de longueur, on obtient l'expression finale de l'admittance suivante :

$$Y_i = \frac{2\pi}{\ln \left(\frac{d_2}{d_1} \right)} (\sigma_i + j\omega\epsilon_0\epsilon_{ri}) \quad (2.26)$$

ρ_i : La résistivité du diélectrique.

Le circuit équivalent du milieu entourant la terminaison du câble est représenté sur la figure 2.6 suivante [30] :

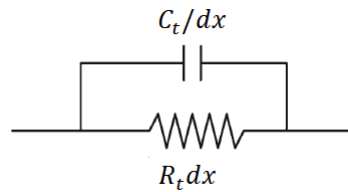


Figure 2.6 – : Circuit équivalent du milieu entourant la terminaison pour une longueur dx

L'impédance de ce circuit s'écrit de la forme suivante :

$$Z_t = (R_t dx) \left(\frac{dx}{j\omega C_t} \right) = \frac{(R_t dx) \left(\frac{dx}{j\omega C_t} \right)}{(R_t dx) + \left(\frac{dx}{j\omega C_t} \right)} \quad (2.27)$$

avec :

La résistance par unité de longueur R_t est définie par :

$$R_t = \frac{1}{\sigma_t A_t} \quad (2.28)$$

Par ailleurs, la capacité par unité de longueur C_t est définie par :

$$C_t = \varepsilon_0 \varepsilon_{rt} A_t \quad (2.29)$$

avec :

$$A_t = \frac{\pi}{4} [D^2 - (d_2)^2] \quad (2.30)$$

A_t : La surface du milieu diélectrique entourant la terminaison du câble.

En remplaçant les expressions de la résistance (2.28) et de la capacité (2.29) respectivement par unité de longueur, on obtient l'expression (2.31) représentant l'impédance du milieu diélectrique entourant la terminaison du câble :

$$Z_t = \frac{1}{A_t (\sigma_t + j\omega \varepsilon_0 \varepsilon_{rt})} \quad (2.31)$$

A partir de la figure 2.4, on a les trois équations suivantes :

$$dU(x) = I(x) Z_t dx \quad \text{ou} \quad \frac{dU(x)}{dx} = I(x) Z_t \quad (2.32)$$

et :

$$dI(x) = -U_1(x) Y_i dx \quad \text{ou} \quad \frac{dI(x)}{dx} = Y_i U_1(x) \quad (2.33)$$

et :

$$U_1(x) = U_H - U(x) \quad (2.34)$$

En dérivant l'équation (2.34), on obtient :

$$\frac{dU(x)}{dx} = -\frac{dU_1(x)}{dx} \quad (2.35)$$

En remplaçant l'expression (2.32) dans l'expression (2.33), et en tenant compte de l'égalité de l'équation (2.35), on obtient l'équation différentielle (2.36)

$$\frac{d^2 U_1(x)}{dx^2} = Z_t Y_i U_1(x) \quad (2.36)$$

On pose :

$$Z_t Y_i = \gamma^2 \quad (2.37)$$

En multipliant les expressions de l'impédance du milieu entourant la terminaison du câble et de l'admittance du diélectrique on obtient l'expression détaillée de la constante de l'expression (2.37) :

$$\gamma = \sqrt{Z_t Y_i} = \left[\frac{2\pi}{A_t \ln(d_2/d_1)} \left(\frac{\sigma_i + j\omega \epsilon_0 \epsilon_{ri}}{\sigma_t + j\omega \epsilon_0 \epsilon_{rt}} \right) \right]^{\frac{1}{2}} \quad (2.38)$$

La solution de l'équation différentielle (2.36) s'écrit de la forme suivante :

$$U_1(x) = A_1 e^{\gamma x} + A_2 e^{-\gamma x} \quad (2.39)$$

On obtient les constantes A_1 et A_2 à partir des conditions aux limites :

$$A \quad x = 0 \quad U_1(0) = U_H \quad \text{donc} \quad A_1 + A_2 = U_H \quad (2.40)$$

et :

$$A \quad x = L \quad U_1(L) = 0 \quad \text{donc} \quad A_1 e^{\gamma L} + A_2 e^{-\gamma L} = 0 \quad (2.41)$$

En résolvant le système d'équation obtenu dans les deux équations (2.40) et (2.41) on obtient :

$$A_1 = -\frac{U_H e^{-\gamma L}}{e^{\gamma L} - e^{-\gamma L}} \quad \text{et} \quad A_2 = \frac{U_H e^{\gamma L}}{e^{\gamma L} - e^{-\gamma L}} \quad (2.42)$$

La solution (2.39) de l'équation différentielle s'écrit alors :

$$U_1(x) = U_H \frac{\sinh(\gamma(L-x))}{\sinh(\gamma L)} \quad (2.43)$$

En tenant compte de l'égalité (2.34) on obtient :

$$U(x) = U_H - U_H \frac{\sinh(\gamma(L-x))}{\sinh(\gamma L)} \quad (2.44)$$

La composante tangentielle du champ s'écrit donc :

$$E_T(x) = -\frac{dU(x)}{dx} = -\gamma U_H \frac{\sinh(\gamma(L-x))}{\cosh(\gamma L)} \quad (2.45)$$

E_T : La composante tangentielle du champ électrique dans le diélectrique.

L'équation (2.45) peut être appliquée dans les cas alternatif et continu. Pour le cas alternatif, la pulsation $\omega = 2\pi f$ où f est la fréquence. Pour le cas continu, la pulsation $\omega = 0$. Cette équation peut aussi être appliquée dans différents milieux tels que l'air, milieux résistif et/ou capacitif entourant la terminaison du câble à étudier [30].

2.3 Méthodes Numériques pour le Calcul du Champ Electrique

La détermination des distributions du champ et du potentiel électriques de tout système haute tension est un problème complexe de calcul non pas par la complexité des équations aux dérivées partielles qui les décrivent, mais plutôt à cause de la forme irrégulière des diélectriques et dans certains cas, de la présence d'une couche conductrice [31].

Les progrès de l'informatique ont permis de développer des méthodes numériques de calcul afin de déterminer les distributions du champ et du potentiel électriques. Les méthodes numériques les plus populaires sont la méthode des différences finies (MDF), la méthode des éléments finis (MEF) et celle de simulation de charges (fictives) (MSC) [31].

2.3.1 Choix de Méthodes Numériques

Le choix de méthodes numériques est conditionné par le type d'analyse des structures envisagées, tout en essayant de trouver un compromis entre les temps de calcul, la précision de la méthode, ainsi que les outils informatiques mis à notre disposition [32].

Une étude comparative entre les différentes méthodes numériques employées en électromagnétisme (Différences Finies, Eléments Finis, Transmission-Line Matrix, Equation Intégrale, Raccordement de Modes, Résonance Transverse, Méthode Spectrale, Méthode Des Lignes) a été réalisée par Itoh [33], en fonction de l'espace mémoire et le temps de CPU nécessaires pour chaque méthode ainsi qu'en fonction de la généralité de chaque méthode et le conditionnement préliminaire du problème. Cette étude est présente dans un tableau 2.1 récapitulatif, tel que les lettres G, M et P représentent respectivement Grand, Moyen et Petit ; les lettres TB, B et Pa représentent respectivement Très bon, Bon et Passable [32, 33].

Table 2.1 – Comparaison entre les méthodes numériques [32]

Méthode	Espace Mémoire Nécessaire	Temps CPU Nécessaire	Généralité De La Méthode	Conditionnement Préliminaire Du Problème
Différences Finies	G	G	TB	Nul
Eléments Finis	G	M/G	TB	P
Transmission Line Matrix (TLM)	M/G	M/G	TB	P
Equation Intégrale	P/M	P/ M	B	M
Raccordement De Modes	M	P/M	B	M
Résonance Transverse	P/M	P/M	Pa	M
Méthode Spectrale	P	P	Pa	G
Méthode Des Lignes	M	P	B	G

2.3.2 Modélisation du Problème

L'étude et l'analyse de champ électromagnétique sont de grande importance dans diverses applications technologiques. Les équations du Maxwell offrent la base mathématique pour l'analyse rigoureuse des problèmes électromagnétiques [34].

La résolution des équations de Maxwell peut être obtenue en considérant les champs comme inconnues. Cependant, on préfère souvent exprimer les champs électrique et magnétique en fonction de potentiels [31]. En effet, Ren [35] a montré que le système obtenu en prenant comme inconnues les champs (\vec{E} et \vec{H}) converge rapidement que celui avec des potentiels [35].

2.3.2.1 Cas de Courant Alternatif

Dans de nombreux cas pratiques, on rencontre une isolation imparfaite, c'est-à-dire que les matériaux isolants utilisés possèdent une conductivité électrique. La distribution du champ électrique en courant alternatif peut être obtenue en combinant les différentes équations suivantes [36] :

Equation de Maxwell-Gauss :

$$\vec{\nabla} \cdot \vec{E} = \frac{\rho}{\varepsilon} \quad (2.46)$$

Equation de conservation de la charge sous forme complexe :

$$\vec{\nabla} \cdot \vec{J} = -j\omega\rho \quad (2.47)$$

Loi d'Ohm :

$$\vec{J} = \sigma \vec{E} \quad (2.48)$$

L'équation finale du potentiel est telle que :

$$\vec{\nabla} \cdot \left(\left(\varepsilon - \frac{j\sigma}{\omega} \right) \vec{\nabla} U \right) = 0 \quad (2.49)$$

La solution de la dernière équation, donne le potentiel électrique U. Etant donné que le champ électrique dérive d'un potentiel scalaire, il est calculé en tout point en utilisant l'équation (2.50) suivante :

$$\vec{E} = -\vec{\nabla} U \quad (2.50)$$

ρ : La densité de charge électrique ;
 J : La densité de courant électrique ;
 E : Le champ électrique ;
 σ : La conductivité électrique ;
 ε : La permittivité du milieu isolant ;
 ω : La pulsation électrique .

Considérant le cas parfait, c'est-à-dire que les matériaux isolants utilisés possèdent une conductivité électrique nulle ($\sigma = 0$). La distribution du potentiel en courant obéit à l'équation de Laplace [29].

$$\nabla^2(\varepsilon U) = 0 \quad (2.51)$$

2.3.2.2 Cas de Courant Continu

La distribution du potentiel en courant continu obéit à l'équation de Poisson [29].

$$-\nabla^2(\epsilon U) = \rho \quad (2.52)$$

La solution de la dernière équation de Poisson, donne le potentiel électrique U et le champ électrique est calculé en tout point en employant l'équation (2.50).

La résolution des équations aux dérivées partielles précédentes se base sur des méthodes numériques qui sont la méthode des différences finies, la méthode des éléments finis ou bien la méthode de simulation de charges.

Le système composé des équations de Maxwell et des lois de comportement admet une infinité de solutions. Des conditions aux limites doivent être données sur la frontière du domaine d'étude afin d'assurer l'unicité de la solution. Ces conditions sont principalement de deux types : la condition de Dirichlet et celle de Neumann. La condition de Dirichlet impose la valeur du potentiel sur les surfaces des conducteurs, sur les surfaces équipotentielles et sur les limites infinies du domaine d'étude. La condition de Neumann impose la valeur de la dérivée normale du potentiel sur les plans de symétrie ou les surfaces à flux imposé. Les conditions de Dirichlet et de Neumann sont dites homogènes si les valeurs imposées sont nulles. Elles sont dites non homogènes dans le cas contraire [31].

2.3.3 Méthode des Différences Finies (MDF)

La MDF est l'une des méthodes de résolution des problèmes linéaires et non linéaires les plus rigoureuses et les plus générales, malgré son temps de calcul relativement important et le grand espace mémoire qu'elle occupe [32].

L'origine principale de cette méthode remonte à Gauss entre 1777-1855. Durant ses conférences à Munich en 1892, Boltzmann aussi avait résolu l'équation de Laplace à l'aide des équations de différences Finies. Il fallait attendre jusqu'à 1940 pour que cette méthode soit utilisée et appliquée pour résoudre les problèmes à dérivées partielles [37].

D'abord, comme l'indique l'équation (2.53), les problèmes de champs sont donnés sur un plan bidimensionnel (2D) limité par des contours dont les valeurs du champ sont connues ; la surface doit être limitée par des conditions aux limites données.

$$\nabla^2 U = \frac{\partial^2 U}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 U}{\partial y^2} = f(x, y) \quad (2.53)$$

Chaque calcul numérique peut fournir une quantité limitée d'informations, donc pour afficher les nœuds pour lesquels la solution peut être trouvée, une discrétisation du domaine est primordiale [37-39].

Le choix de l'élément de maillage est très important. Les polygones réguliers qui peuvent remplir un plan sont des carrés, des triangles ou des hexagones. Les plus utilisés sont les carrés et les triangles équilatéraux. Cependant, l'utilisation de ces deux maillages pose des problèmes au niveau des limites du domaine. Au fait, les équations de différence au niveau des limites du domaine ne peuvent pas être écrites à cause de l'absence des

nœuds dans ces limites. En effet, il est préférable d'utiliser des rectangles qui permettent de poser des nœuds sur le contour du domaine [37-39].

Un maillage irrégulier de rectangles sur le plan (x,y) est représenté sur la figure 2.7 [37]. Dans cet exemple, on s'intéresse uniquement à cinq nœuds, à savoir le nœud M et ses quatre nœuds voisins N (North) , W (West), E (East) et S (South).

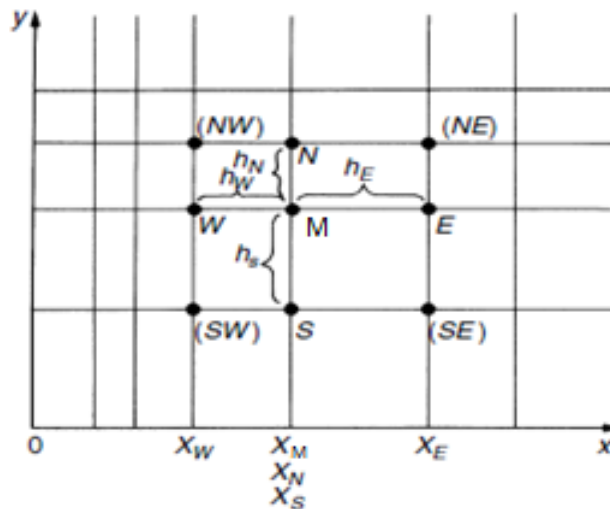


Figure 2.7 – Maillage rectangulaire irrégulier avec abréviation des nœuds [37]

Comme le potentiel dans ce domaine est continu et les valeurs des potentiels $U(E)$, $U(N)$, $U(W)$ et $U(S)$ aux nœuds voisins de M, sont connues (soit elles coïncident avec les conditions aux limites préétablies et/ou peuvent être l'objet d'un calcul précédent), il est possible d'étendre le potentiel en tout point (x, y) en utilisant le développement de Taylor. Si ce point est au voisinage du nœud M, alors le potentiel en tout point (x,y) s'écrit [37] :

$$\left. \begin{aligned}
 U(x,y) = U(M) &+ \frac{1}{1!} [(x - x_m)U_x(M) + (y - y_m)U_y(M)] \\
 &+ \frac{1}{2!} [(x - x_m)^2 U_{xx}(M) + 2(x - x_m)(y - y_m)U_{xy}(M) \\
 &\quad + (y - y_m)^2 U_{yy}(M)] \\
 &+ \frac{1}{3!} [(x - x_m)^3 U_{xxx}(M) + 3(x - x_m)^2(y - y_m)U_{xxy}(M) \\
 &\quad + 3(x - x_m)(y - y_m)^2 U_{yyx}(M) + (y - y_m)^3 U_{yyy}(M)] \\
 &+ R'_{xy}(M)
 \end{aligned} \right\} \quad (2.54)$$

Le reste $R'_{xy}(M)$ représente les termes d'ordres plus élevés. Par ailleurs, les termes $U_x(M)$, $U_y(M)$ et $U_{xy}(M)$ peuvent s'écrire comme suit [38, 39] :

$$\begin{aligned}
 U_x(M) &= \left[\frac{\partial U(x,y)}{\partial x} \right]_M & U_y(M) &= \left[\frac{\partial U(x,y)}{\partial y} \right]_M & U_{xy}(M) &= \left[\frac{\partial^2 U(x,y)}{\partial x \partial y} \right]_M \\
 U_{xx}(M) &= \left[\frac{\partial^2 U(x,y)}{\partial x^2} \right]_M & U_{yy}(M) &= \left[\frac{\partial^2 U(x,y)}{\partial y^2} \right]_M & U_{xxx}(M) &= \left[\frac{\partial^3 U(x,y)}{\partial x^3} \right]_M \\
 U_{xxy}(M) &= \left[\frac{\partial^3 U(x,y)}{\partial x^2 \partial y} \right]_M & U_{yyx}(M) &= \left[\frac{\partial^3 U(x,y)}{\partial y^2 \partial x} \right]_M & U_{yyy}(M) &= \left[\frac{\partial^3 U(x,y)}{\partial y^3} \right]_M
 \end{aligned} \quad (2.55)$$

Les termes d'ordre 3 ou plus de l'équation (2.54) seront négligés, car ils seront multipliés par les petites distances qui séparent les nœuds N, S, E et W du nœud M à la puissance de trois ou plus, et ces distances $(x - x_M)$ et $(y - y_M)$ seront remplacées par h [39].

Le potentiel dans les nœuds N, S, E et W s'écrit donc :

$$U(E) = U(M) + h_E U_x(M) + \frac{1}{2} h_E^2 U_{xx}(M) \quad (2.56)$$

$$U(N) = U(M) + h_N U_y(M) + \frac{1}{2} h_N^2 U_{yy}(M) \quad (2.57)$$

$$U(W) = U(M) + h_W U_x(M) + \frac{1}{2} h_W^2 U_{xx}(M) \quad (2.58)$$

$$U(S) = U(M) + h_S U_y(M) + \frac{1}{2} h_S^2 U_{yy}(M) \quad (2.59)$$

La somme des équations (2.56) et (2.58), et des équations (2.57) et (2.59) donne respectivement :

$$U(E) + U(W) - 2U(M) = (h_E - h_W) U_x(M) + \frac{1}{2} (h_E^2 + h_W^2) U_{xx}(M) \quad (2.60)$$

$$U(N) + U(S) - 2U(M) = (h_N - h_S) U_y(M) + \frac{1}{2} (h_N^2 + h_S^2) U_{yy}(M) \quad (2.61)$$

Les dérivées $U_x(M)$ et $U_y(M)$ seront exprimées par les approximations du premier ordre :

$$U_x(M) \cong \left. \begin{aligned} & \frac{\frac{h_W}{h_E} [U(E) - U(M)] + \frac{h_E}{h_W} [U(M) - U(W)]}{h_E + h_W} \\ & = \frac{h_W}{h_E(h_E + h_W)} U(E) + \frac{(h_E - h_W)}{h_E h_W} U(M) - \frac{h_E}{h_W(h_E + h_W)} U(W) \end{aligned} \right\} \quad (2.62)$$

$$U_y(M) \cong \frac{h_S}{h_N(h_N + h_S)} U(N) + \frac{(h_N - h_S)}{h_N h_S} U(M) - \frac{h_N}{h_S(h_N + h_S)} U(S) \quad (2.63)$$

Les deux équations (2.62) et (2.63) sont remplacées respectivement dans (2.60) et (2.61). Dans ces conditions, on obtient :

$$U_{xx}(M) = \frac{2 U(E)}{h_E(h_E + h_W)} + \frac{2 U(W)}{h_E(h_E + h_W)} - \frac{2 U(M)}{h_E h_W} \quad (2.64)$$

$$U_{yy}(M) = \frac{2 U(N)}{h_N(h_N + h_S)} + \frac{2 U(S)}{h_S(h_N + h_S)} - \frac{2 U(M)}{h_N h_S} \quad (2.65)$$

Les approximations susmentionnées permettent la résolution des équations de Poisson et Laplace. Dans un milieu de permittivité ε et contenant des charges réparties de densité $\rho(x, y)$, ces deux équations peuvent s'écrire, en substituant $\frac{\rho(x, y)}{\varepsilon}$ par $F(x, y)$, comme suit :

$$\nabla^2 U = U_{xx} + U_{yy} = \begin{cases} 0 & (\text{région de Laplace}) \\ -F(x, y) & (\text{région de Poisson}) \end{cases} \quad (2.66)$$

La solution de l'équation (2.66) est telle que :

$$D_{EM} U(E) + D_{NM} U(N) + D_{WM} U(W) + D_{SM} U(S) + D_{MM} U(M) + \frac{1}{2} F(M) \quad (2.67)$$

avec :

$$\begin{aligned} D_{EM} &= \frac{1}{h_E(h_E+h_W)} & D_{NM} &= \frac{1}{h_N(h_N+h_S)} \\ D_{EM} &= \frac{1}{h_E(h_E+h_W)} & D_{NM} &= \frac{1}{h_N(h_N+h_S)} \\ D_{NM} &= \frac{1}{h_N(h_N+h_S)} \end{aligned} \quad (2.68)$$

L'équation (2.67) est une approximation valide de l'équation différentielle d'origine (2.66) au voisinage du point M. La même forme est obtenue pour chaque nœud du maillage. Les éléments dans un plan 2D sont généralement des carrés ($h_E = h_N = h_W = h_S = h$) alors l'équation (2.81) se simplifie [37, 38, 39] :

$$U(E) + U(N) + U(W) + U(S) - 4U(M) + h^2F(M) = 0 \quad (2.69)$$

Dans tous les cas, le potentiel du nœud M peut être exprimé en fonction des potentiels des nœuds voisins supposés connus. Par exemple, le potentiel pourrait être exprimé en fonction des potentiels aux nœuds NE, NW, SW et SE en négligeant ou pas les potentiels aux nœuds N, E, W et S.

L'évaluation numérique de l'équation de différence (3.69) qui n'est rien d'autre qu'une approximation de l'équation d'origine du champ est évidemment simple. Cependant, elle prend beaucoup de temps et d'espace mémoire. Par conséquent, la MDF est maintenant beaucoup moins utilisée [37, 32].

2.3.4 Méthode des Eléments Finis (MEF)

La MEF, outil numérique très puissant, est beaucoup utilisée dans la résolution des problèmes à domaine spatial fini, surtout en mécanique où elle a connu son plus fort développement. Cette méthode a été appliquée avec succès dans les problèmes de calcul de potentiel et de champs électriques [31].

L'idée de la méthode est de chercher une solution approchée à une équation différentielle après une reformulation sous forme d'identité intégrale appelée forme faible ou variationnelle. Au lieu de chercher à satisfaire l'équation aux nœuds, on décompose ici le domaine en sous domaines appelés éléments finis, et on impose la satisfaction des équations par sous domaine. L'introduction d'une approximation locale par sous domaine (dit élément fini) permet de contourner le problème de complexité des géométries, car il suffit alors de choisir une approximation ou une décomposition (maillage) qui respecte la géométrie [31, 40].

Le principe de cette méthode consiste à diviser le domaine d'étude en plusieurs éléments finis, cette opération est appelée maillage. C'est une étape très importante, puisque le choix de la forme de l'élément de maillage est primordial dans la précision des résultats obtenus. Il est donc nécessaire de trouver la forme et le degré d'approximation de celui-ci qui soient les plus adaptés à la géométrie du domaine d'étude. Il existe un grand nombre de formes géométriques pour les éléments de maillage tels que [31, 40] :

- Des triangles, des rectangles, des quadrilatères arbitraires pour les problèmes à deux dimensions ;
- Des tétraèdres, des hexaèdres, des cubes, des prismes pour des problèmes à trois dimensions.

Dans cette partie nous allons présenter le procédé de calcul de la solution de l'équation de Laplace par la méthode des éléments finis [37].

Considérons un champ électrique en régime permanent au sein d'un matériau diélectrique dont la conductivité peut être négligée et dont la permittivité peut dépendre de la direction de l'intensité E du champ électrique (matériau anisotrope) ou non (diélectrique isotrope). En supposant un système de coordonnées cartésiennes, l'énergie électrique W_{em} stockée dans tout le volume V de la région considérée est [41- 45] :

$$W_{em} = \iiint_V \left[\frac{1}{2} \left\{ \varepsilon_x \left(\frac{\partial U}{\partial x} \right)^2 + \varepsilon_y \left(\frac{\partial U}{\partial y} \right)^2 + \varepsilon_z \left(\frac{\partial U}{\partial z} \right)^2 \right\} \right] dx dy dz \quad (2.70)$$

On suppose que la distribution du potentiel ne varie pas selon l'axe z , donc une distribution bidimensionnelle 2D (Figure 2.8), donc l'énergie électrique W_{em} stockée dans toute la surface A est donnée par :

$$W_{em} = z \iint_A \left[\frac{1}{2} \left\{ \varepsilon_x \left(\frac{\partial U}{\partial x} \right)^2 + \varepsilon_y \left(\frac{\partial U}{\partial y} \right)^2 \right\} \right] dx dy \quad (2.71)$$

z : constante.

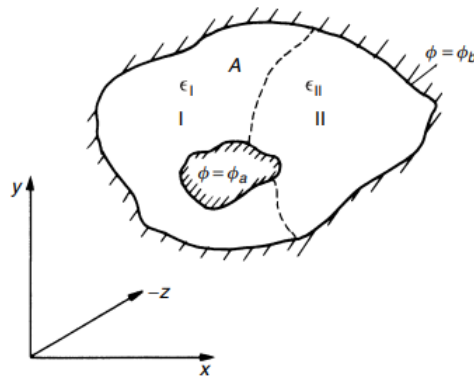


Figure 2.8 – Champ bidimensionnel dans un matériau diélectrique [37]

La fonction scalaire U est continue et dérivable par morceaux. Il est avantageux d'utiliser des triangles qui peuvent facilement être ajustés pour coïncider avec des formes de frontière. Ce maillage triangulaire est représenté sur la Figure 2.9.

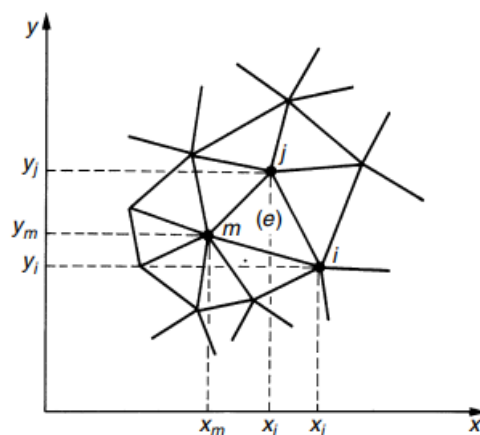


Figure 2.9 – Maillage triangulaire [37]

Considérons l'un de ces éléments (indiqué par e) et les nœuds i, j et m , et formulons des fonctions de bases pour la distribution du potentiel au sein de cet élément. Aucune restriction n'est imposée à cette fonction de base. La forme générale non linéaire de la fonction de base est un polynôme qui s'exprime sous la forme suivante [45] :

$$U(x, y) = \alpha_1 + \alpha_2 x + \alpha_3 y + \alpha_4 x^2 + \alpha_5 xy + \alpha_6 y^2 + \dots \quad (2.72)$$

Dans le cas d'un élément d'un maillage triangulaire, la variation du potentiel est linéaire et s'exprime sous comme suit [44, 45] :

$$U(x, y) = \alpha_1 + \alpha_2 x + \alpha_3 y \quad (2.73)$$

Pour les nœuds (i, j, k) de l'élément e , le potentiel s'écrit :

$$\left. \begin{aligned} U_i &= \alpha_1 + \alpha_2 x_i + \alpha_3 y_i \\ U_j &= \alpha_1 + \alpha_2 x_j + \alpha_3 y_j \\ U_m &= \alpha_1 + \alpha_2 x_m + \alpha_3 y_m \end{aligned} \right\} \quad (2.74)$$

Les coefficients peuvent être calculés en appliquant la règle de Cramer [44, 45] :

$$\left. \begin{aligned} \alpha_1 &= \frac{1}{2\Delta_e} (a_i U_i + a_j U_j + a_m U_m) \\ \alpha_2 &= \frac{1}{2\Delta_e} (b_i U_i + b_j U_j + b_m U_m) \\ \alpha_3 &= \frac{1}{2\Delta_e} (c_i U_i + c_j U_j + c_m U_m) \end{aligned} \right\} \quad (2.75)$$

avec :

$$\left. \begin{aligned} a_i &= x_j y_m - x_m y_j \\ a_j &= x_m y_i - x_i y_m \\ a_m &= x_i y_j - x_j y_i \end{aligned} \right\} \left. \begin{aligned} b_i &= y_j - y_m \\ b_j &= y_m - y_i \\ b_m &= y_i - y_j \end{aligned} \right\} \left. \begin{aligned} c_i &= x_m - x_j \\ c_j &= x_i - x_m \\ c_m &= x_j - x_i \end{aligned} \right\} \quad (2.76)$$

et :

$$\left. \begin{aligned} 2\Delta_e &= a_i + a_j + a_m \\ &= b_i c_j - b_j c_i \end{aligned} \right\} \quad (2.77)$$

La distribution du potentiel dans l'élément peut être liée aux potentiels des nœuds adjacents et les coefficients a, b, c [37] :

$$U_e(x, y) = \frac{1}{2\Delta_e} [(a_i + b_i + c_i)U_i + (a_j + b_j + c_j)U_j + (a_m + b_m + c_m)U_m] \quad (2.78)$$

Cette équation peut également s'écrire sous la forme matricielle suivante :

$$U_e = [N_i, N_j, N_m] \begin{bmatrix} U_i \\ U_j \\ U_m \end{bmatrix} \quad (2.79)$$

D'où les fonctions $N_{i,j,m}$ dépendent de la forme des éléments. La MEF est basée sur la minimisation de l'énergie dans l'ensemble du système. En effet, seules les dérivées des énergies par rapport à la distribution potentielle sont intéressantes. L'énergie par unité de longueur dans la direction z pour ce cas spécifique s'écrit [43 - 45] :

$$X^e = \frac{(W_{em})_e}{z} = \frac{1}{2\Delta_e} \left\{ \varepsilon_x \left(\frac{\partial U}{\partial x} \right)^2 + \varepsilon_y \left(\frac{\partial U}{\partial y} \right)^2 \right\} \quad (2.80)$$

avec Δe est la surface de l'élément qui remplace le double intégral.
Le matériau diélectrique est supposé isotrope avec $\varepsilon_x = \varepsilon_y = \varepsilon_e$.

La formulation concernant la minimisation de l'énergie au sein du système complet (surface) peut ainsi s'écrire [43 - 45] :

$$\frac{\partial X}{\partial U} = 0 \quad (2.81)$$

U est le vecteur des potentiels de tous les nœuds. Selon l'équation (2.80), on dérive l'équation (2.81) respectivement par rapport à U_i et U_j et U_m .

$$\left. \begin{aligned} \frac{\partial X^e}{\partial U_i} &= \frac{1}{2} \varepsilon_e \Delta_e \left(2\alpha_2 \frac{\partial \alpha_2}{\partial U_i} + 2\alpha_3 \frac{\partial \alpha_3}{\partial U_i} \right) \\ &= \frac{1}{2} \varepsilon_e (\alpha_2 b_i + \alpha_3 c_i) \\ &= \frac{\varepsilon_e}{4\Delta_e} \left[(b_i^2 + c_i^2) U_i + (b_i b_j + c_i c_j) U_j + (b_i b_m + c_i c_m) U_m \right] \end{aligned} \right\} \quad (2.82)$$

avec :

$$\frac{\partial U}{\partial x} = \alpha_1 = f(U_i, U_j, U_m) \quad (2.83)$$

$$\frac{\partial U}{\partial x} = \alpha_2 = f(U_i, U_j, U_m) \quad (2.84)$$

L'ensemble des trois équations peut être mieux exprimé sous forme matricielle comme suit :

$$\begin{aligned} \frac{\partial X^e}{\partial U^e} &= \frac{\varepsilon_e}{4\Delta_e} \begin{bmatrix} (b_i^2 + c_i^2) & (b_i b_j + c_i c_j) & (b_i b_m + c_i c_m) \\ (b_i b_j + c_i c_j) & (b_j^2 + c_j^2) & (b_j b_m + c_j c_m) \\ (b_i b_m + c_i c_m) & (b_j b_m + c_j c_m) & (b_m^2 + c_m^2) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} U_i \\ U_j \\ U_m \end{bmatrix} \\ &= [h]^e [U^e] \end{aligned} \quad (2.85)$$

$[h]^e$ est la matrice de rigidité élémentaire.

En écrivant pour tous les éléments constituant le maillage, on obtient un système d'équations algébriques dont la solution fournit la distribution du potentiel dans le domaine étudié. La résolution du système final est simple puisque les équations obtenues sont linéaires et les matrices ainsi formées sont symétriques. Pour déterminer la distribution du champ électrique, il faut calculer la dérivée du potentiel par une méthode numérique adaptée [37].

2.3.5 Méthode de Simulation de Charges (MSC)

Les méthodes numériques citées précédemment se basent principalement sur les équations de Maxwell, il peut être utile de revoir certains principes fondamentaux de ces équations [37] :

$$\vec{\nabla} \cdot (-\varepsilon \vec{\nabla} U) = \vec{\nabla} \cdot \vec{D} = \rho \quad (2.86)$$

\vec{D} : L'induction électrique ;

ρ : La densité volumique de charge.

Si une intégrale de volume est introduite à l'équation (2.86), la formule de Green-Ostrogradsk donne [31] :

$$\iiint_V \operatorname{div}(\vec{D}) dV = \oiint \vec{D} dA = \iiint_V \rho dV \quad (2.87)$$

L'intégrale de volume de la divergence est transformée à une intégrale de surface de la surface fermée A. L'intégrale de volume appliquée à la densité de charges donne la charge totale incluse dans la surface A. Au fait, l'équation (2.87) représente la loi de Gauss [37].

Les deux méthodes vues précédemment (MDF et MEF) sont fondés sur la base de la forme différentielle de l'équation de Maxwell (2.86). Par contre, la loi de Gauss (2.87) est beaucoup plus facile à appliquer et permet d'éliminer beaucoup de problèmes de conditions aux limites dans les cas où une symétrie existe, cas de câbles coaxiaux [37, 46].

En se basant sur cette loi, Steinbigler a mis en place une nouvelle méthode de calcul de champ en 1974, nommée la méthode de simulation de charge (MSC). Cette méthode a été considérée comme étant très compétitive à MEF ou MDF et parfois meilleure surtout dans le calcul de champ en 2D et 3D dans le domaine de la haute tension. Le principe de la méthode est simple, le champ électrique est simulé par celui engendré par un nombre de charges discrètes qui sont placées en dehors de la région dans laquelle le champ électrique doit être calculé.

Le potentiel électrique à n'importe quel point M d'une région, peut être déterminé en appliquant le théorème de superposition, c'est-à-dire qu'il est égal à la somme des potentiels résultants des charges ponctuelles appartenant à cette région tant que le point M n'est pas situé sur aucune charge ponctuelle [37, 31, 46]. Le potentiel électrique s'écrit comme le montre l'équation (2.88).

$$U_i = \sum_{j=1}^n P_{ij} Q_j \quad (2.88)$$

P_{ij} : Représente le coefficient de potentiel, dépendant du type de charges utilisées et qui peut être évalué analytiquement par résolution de l'équation de Laplace ou de Poisson ;
 Q_j : Représente la charge ponctuelle au point j.

Pour déterminer le potentiel U_i et la charge Q_j en tout point de la frontière du domaine, il faut d'abord déterminer la position et le type des charges. Pour calculer le champ avec cette méthode, il faut que les charges de simulation soient placées à l'extérieur de l'espace ou à l'intérieur d'une surface équipotentielle (cas des électrodes métalliques) où le calcul de champ se fait. Par ailleurs, si le point M est situé sur la surface du câble, le potentiel U_i sera égal au potentiel du conducteur [31, 46]. En appliquant cette procédure à m points sur le contour de l'espace où on veut calculer le champ et pour n charges connues, m équations linéaires sont obtenues. Le système ainsi obtenu est :

$$\begin{pmatrix} P_{11} & P_{12} & \cdots & P_{1n} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ P_{m1} & \cdots & \cdots & P_{mn} \end{pmatrix} \times \begin{pmatrix} Q_1 \\ \vdots \\ Q_m \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} V_1 \\ \vdots \\ V_m \end{pmatrix} \quad (2.89)$$

2.4 Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons vu les différentes méthodes de calcul du champ électrique et de ses deux composantes (radiale et tangentielle) en courant alternatif et continu. Le calcul analytique du champ radial en courant alternatif est très simple et dépend seulement de la géométrie du câble. Par contre, le calcul devient plus complexe en courant continu car il ne dépend non seulement de la géométrie du câble mais aussi de la température de l'isolation (diélectrique). Un tel calcul nécessite la résolution d'une équation non linéaire. La méthode analytique du calcul de la composante tangentielle consiste à déterminer les paramètres du circuit électrique équivalent du câble. Cependant, le calcul analytique du champ électrique avec une bonne précision est une tâche très difficile ou presque impossible, non seulement à cause de la complexité des équations aux dérivés partielles, mais aussi à cause de la forme irrégulière des diélectriques, de la proximité de surfaces métalliques aux formes complexes et la présence d'une couche conductrice. Afin de contourner ce problème, plusieurs méthodes numériques (MDF, MEF, MSC, ...) ont été évoquées. Le choix de la méthode utilisée se fait en essayant de trouver un compromis entre les temps de calcul, la précision de la méthode, l'espace mémoire nécessaire et le conditionnement préliminaire du problème. Actuellement, les chercheurs s'intéressent plus particulièrement à la méthode des éléments finis.

Chapitre 3 :

Champ Electrique au Niveau d'une Terminaison et Méthodes de Contrôle

Chapitre 3

Champ Electrique au Niveau d'une Terminaison et Méthodes de Contrôle

3.1 Introduction

LA demande d'énergie électrique ne cesse d'augmenter. Pour des raisons technico-économiques, on utilise des niveaux de tension très élevés (MT et HT) [47]. Les contraintes électriques et thermiques pouvant surgir doivent être prises en compte lors de la conception des systèmes de transmission de l'énergie électrique. De telles contraintes peuvent être à l'origine des pannes (de plus en plus fréquentes) de câbles MT et HT [48]. Dans le présent chapitre, nous nous intéressons aux contraintes électriques, plus précisément le champ électrique. Nous commençons tout d'abord par présenter le problème de concentration du champ électrique au niveau des terminaisons de câbles. Ensuite, nous présentons une simulation d'une terminaison de câble de 20 kV sous environnement COMSOL Multiphysics, en vue d'analyser le problème de concentration du champ. Finalement, nous évoquons les différents remèdes à ce problème, permettant de réduire et de niveler le champ électrique en question.

3.2 Description du Problème

Dans un câble sans écran conducteur, les lignes du champ électrique se referment vers la terre d'une manière non uniforme (Figure 3.1.a). Celui-ci peut créer des points chauds et critiques causant la rupture du câble [49]. Il convient de noter que cet effet est négligeable en basse tension, contrairement en haute tension où son élimination est indispensable. Pour ce faire, une première solution peut être envisagée. Il s'agit est d'augmenter l'épaisseur de l'isolation. Puisque cette solution est non seulement coûteuse et non fiable, les ingénieurs/chercheurs ont proposé de placer un écran conducteur mis à la terre à la surface du diélectrique, formant ainsi une capacité cylindrique concentrique [1, 3-4]. Cette technique permet d'avoir un champ électrique purement radial comme l'indique la figure 3.1.b.

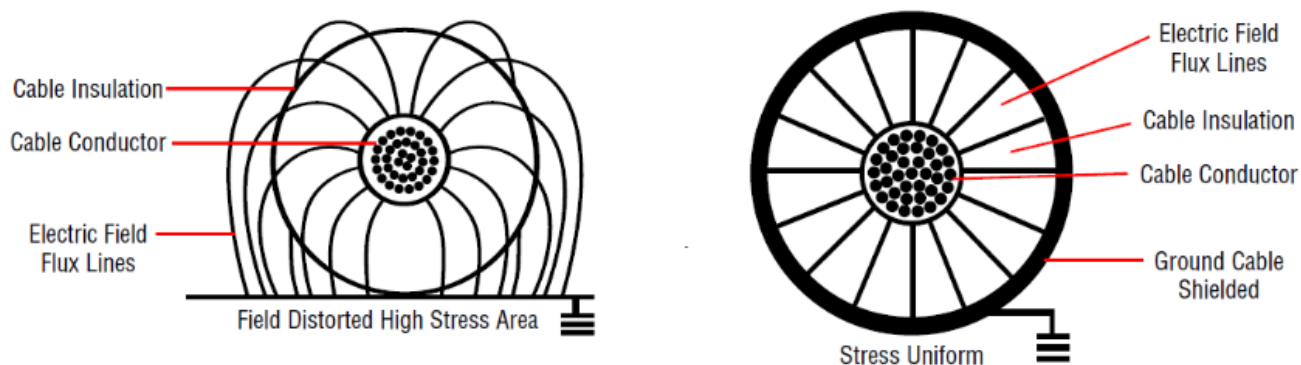


Figure 3.1 – Lignes du champ électrique autour d'un câble (a) sans (b) avec écran conducteur [49]

Pour des raisons de raccordement entre différents tronçons de câbles ou avec les équipements et les installations de haute tension, le câble doit être coupé. La géométrie de celui-ci change et l'isolation entre le conducteur haute tension et l'écran mis à la terre devient l'air [3]. Dû à ce changement brusque de la géométrie et du milieu diélectrique, se crée une composante tangentielle du champ électrique et un renforcement des lignes de champ localisé dans cette région comme le montre la figure 3.2 [3].

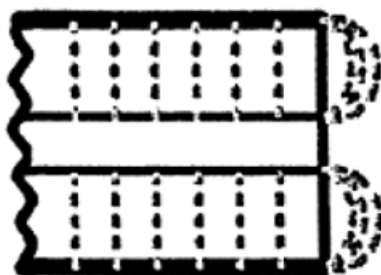


Figure 3.2 – Distribution du champ électrique dans un câble à terminaison coupée [3]

Afin de réduire l'intensité de ce champ, les deux électrodes de haute tension et la terre sont éloignées l'une de l'autre en coupant l'écran mis à la terre à une distance suffisante comme indiqué sur la figure 3.3 [3, 50]. Cependant, les lignes de champ convergent vers le point de coupure, ce qui rend le champ intense dans ce point, ce qui peut causer de nombreux problèmes pour les niveaux de tensions au-delà de 6,6 kV, tels que les décharges partielles, le vieillissement, ... [3, 51-52]. Ce phénomène de concentration du champ au niveau de la discontinuité de l'écran sera simulé et discuté dans ce chapitre.

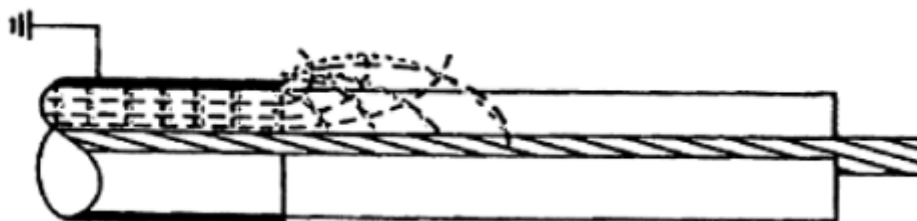


Figure 3.3 – Distribution du champ électrique dans une terminaison de câble avec écran dénudé [3]

3.3 Répartition du Champ Électrique

Il est clair que la simulation numérique est une approche donnant la possibilité aux chercheurs d'analyser le comportement de plusieurs phénomènes, échappent au calcul classique par leur complexité. La modélisation, quant à elle, est la mise en équations de ces phénomènes, tels que divers problèmes scientifiques sont basés sur des équations aux dérivées partielles. Afin d'obtenir les distributions du potentiel et du champ électriques, une simulation d'une terminaison d'un câble haute tension a été faite.

3.3.1 Modèle du Câble

Pour effectuer cette simulation, nous avons adopté le modèle de câble coaxial de 20 kV proposé par Nikolajevic et al. [50-51]. Ce câble est caractérisé par une isolation synthétique en PRC. La figure 3.4 montre une représentation du modèle considéré sur le plan (r, z) . L'axe z est dirigé suivant la longueur et l'axe r suivant l'épaisseur. Ce dernier axe traverse en fait différents matériaux (milieux) à savoir l'âme conductrice, les écrans semi-conducteurs, l'isolation en PRC et l'air. Nous avons utilisé une portion de câble de 1 mètre de longueur. Le câble est dénudé de l'écran mis à la terre et la couche semi-conductrice extérieure d'une distance de 0,25 m [53].

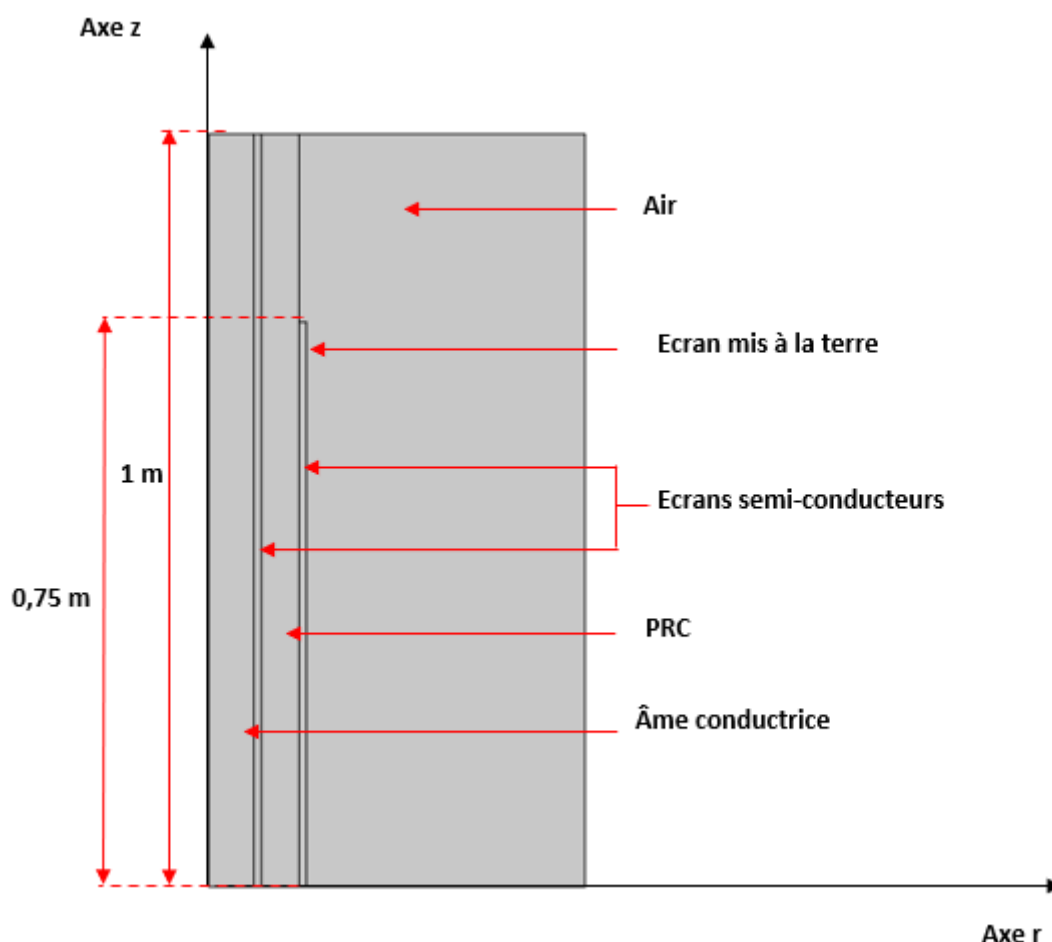


Figure 3.4 – Modèle 2D du câble de 20 kV objet d'étude

Pour des raisons de comparaison de nos résultats de simulation, nous avons supposé les mêmes paramètres du câble ainsi que les mêmes conditions de test de Nikolajevic et al. [50, 51]. Les dimensions de ce câble sont comme suit :

- Une âme conductrice en alliage d'aluminium/cuivre de diamètre de 6,83 mm ;
- Un écran semi-conducteur type HFDS 0592 sur l'âme d'épaisseur de 0,5 mm ;
- Un isolant synthétique PRC/XLPE d'épaisseur de 5,5 mm ;
- Un écran semi-conducteur type HFDS 0592 sur l'isolant d'épaisseur de 0,5 mm ;
- Un écran métallique en fil de cuivre mis à la terre ;
- Une gaine de protection extérieure en PVC d'épaisseur de 2 mm.

Les permittivités relatives des différents matériaux constituant le câble de 20 kV sont données dans le tableau 3.1 [51].

Table 3.1 – Permittivités relatives des différents matériaux du câble [51]

Les matériaux	Les permittivités relatives ϵ_r
PRC/XLPE	2,3
Ecrans semi-conducteurs	1000
Ame conductrice (Al/Cu)	10000
Air	1

Pour l'analyse de la distribution du champ électrique, nous avons simulé cette terminaison de câble sous environnement COMSOL Multiphysics. La formulation du problème ainsi que les étapes essentielles de la simulation sont exposées dans la partie suivante.

3.3.2 Formulation du Problème dans un Environnement COMSOL

Utilisant la méthode des éléments finis, COMSOL Multiphysics peut servir d'une manière puissante et interactive à résoudre les différents problèmes scientifiques aux dérivées partielles. Il peut également interagir avec des logiciels de programmation tels que Matlab. Ce logiciel permet de construire une simulation semblable à la réalité en considérant non seulement la précision des géométries et de la résolution numérique, mais aussi les diverses grandeurs physiques représentant les conditions réelles des matériaux utilisés. Il facilite amplement les étapes de modélisation et de simulation, à savoir la définition de la géométrie, des propriétés physiques des matériaux présents et des conditions aux frontières, le maillage, la résolution et l'affichage des résultats. De ce fait, COMSOL devient un outil très employé dans des secteurs divers (industriel ou de recherche) [54].

Sous environnement COMSOL, toutes les équations nécessaires à la résolution numérique des problèmes physiques sont déjà prédéfinies. Cependant, il suffit de préciser dans quel module (électromagnétisme, transfert de chaleur, acoustique, ...) et dans quel régime (stationnaire, temporel, fréquentiel, ...) le modèle doit être construit. Il est à noter que la modélisation est disponible en 1D, 2D, 2D axisymétrique ou encore en 3D. Dans notre cas, nous avons choisi une simulation en 2D axisymétrique avec le module AC/DC. Ce dernier permet de simuler des champs électriques, magnétiques et électromagnétiques dans des applications statiques et à basses fréquences [54]. Les applications concernées sont les condensateurs, les inducteurs, les isolateurs, les bobines, les moteurs, les actionneurs

et les capteurs, ... L'organigramme de la figure 3.5 montre les différentes étapes de simulation d'une portion du câble de 20 kV.

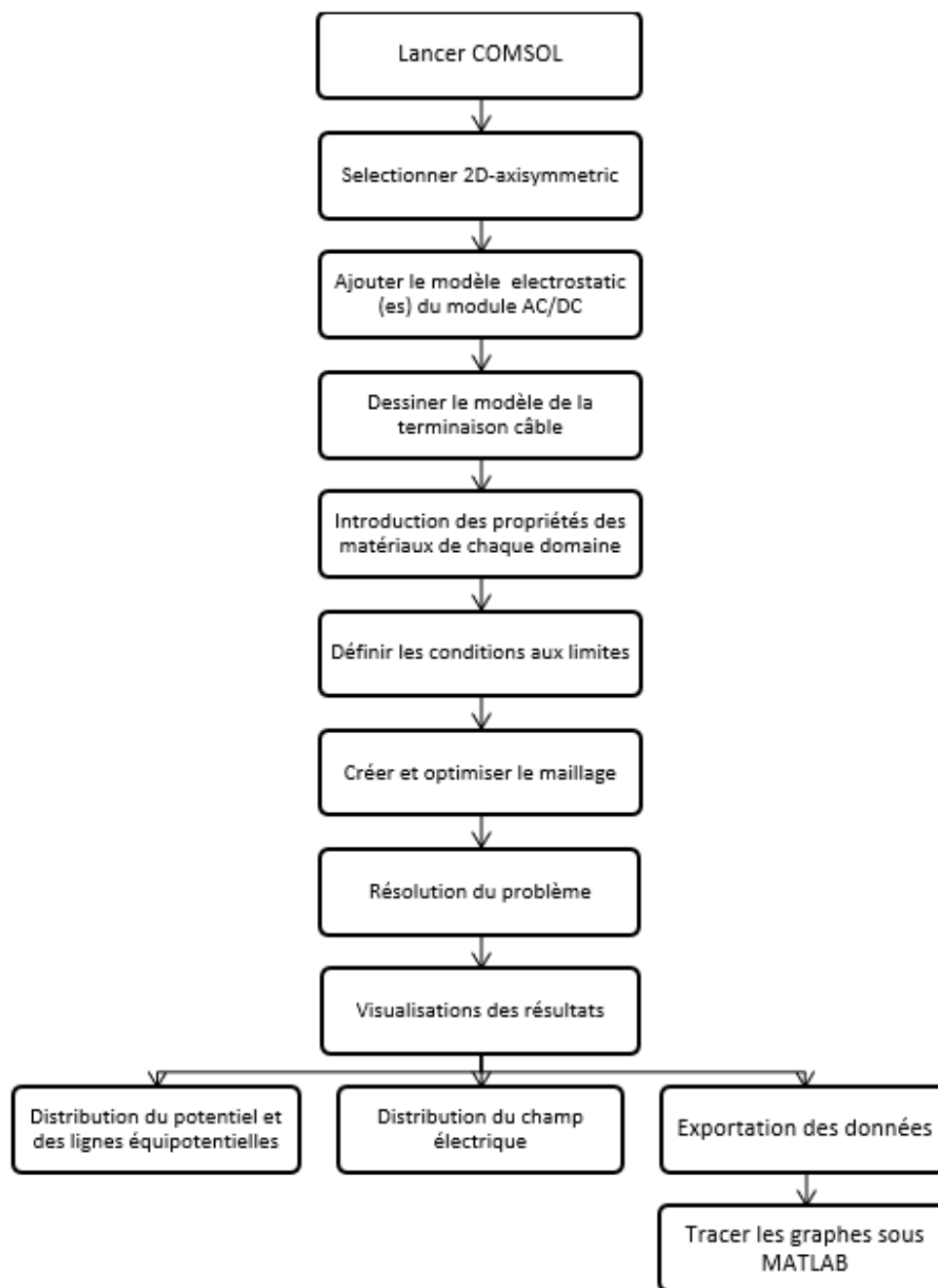


Figure 3.5 – Organigramme montrant les différentes étapes de simulation sous COMSOL

De la figure 3.5, il est clair que la première chose à faire, une fois le programme ouvert, est de définir la géométrie de notre câble et choisir le module AC/DC. L'étape suivante consiste à définir les paramètres physiques des matériaux des différents domaines de la géométrie, tels que la constante diélectrique, la conductivité, etc. Également, il est nécessaire de définir un certain nombre de conditions aux limites cohérentes à chaque frontière de domaine est associé.

Après avoir défini les conditions aux limites de type Dirichlet au niveau de l'âme conductrice ($U = 20$ kV) et l'écran mis à la terre ($U = 0$), l'étape suivante consiste

en le maillage. Ce dernier permet de diviser les différents domaines en plusieurs éléments finis comme indiqué sur la figure 3.6.

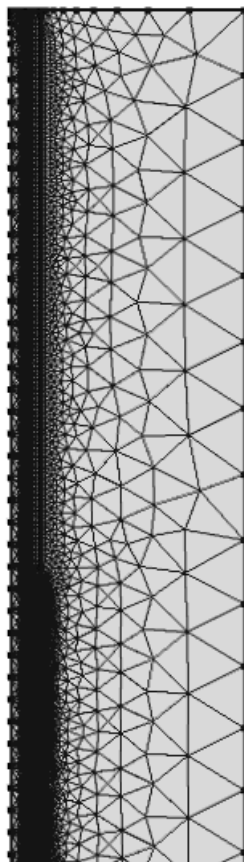


Figure 3.6 – Maillage de la terminaison du câble

Ensuite, nous avons choisi le maillage le plus adapté pour la méthode des éléments finis à savoir le maillage triangulaire [37]. Il convient de signaler que le choix de la taille des mailles est primordial dans la précision des résultats obtenus. En général, le maillage se fait automatiquement à l'aide du code COMSOL où il suffit de sélectionner le type du maillage. Cependant, les mathématiques démontrent que dans certains cas, il existe des points où la solution n'est pas entièrement définie ; ces points sont nommés singularités [55]. La plupart du temps, le champ y est infini ou, plus rigoureusement tend vers l'infini lorsque l'on s'approche du point singulier. Dans le modèle étudié, le point singulier n'est d'autre que le point où l'écran se termine. Pour éliminer ce problème, le maillage au voisinage de ce point est raffiné manuellement par l'utilisateur [54]. Pour valider ce maillage, nous avons vérifié que la solution de la simulation n'en dépend pas significativement. Lorsque le problème est complètement défini, il ne reste plus qu'à le résoudre. Il est possible d'accéder à des menus pour modifier la résolution. De même, lors de la résolution d'un problème multiphysique, il est possible de ne résoudre que pour une certaine partie des variables. Lorsque le programme converge vers une solution, il bascule automatiquement vers la fenêtre de post traitement, qui permet d'analyser les résultats. Il est possible de visualiser les résultats sous plusieurs formes (courbes, lignes de champ, équipotentiels, ...).

3.3.3 Résultats et Discussions

Comme discuté dans le titre 3.2, lorsqu'une tension est appliquée entre l'âme conductrice et l'écran mis à la terre, une distribution non uniforme du champ électrique (concentration du champ électrique) est générée au niveau de la terminaison du câble, autrement dit, au niveau de la discontinuité de l'écran (là où l'écran est coupé) [52]. Si l'intensité de ce champ électrique dépasse la rigidité diélectrique, des décharges partielles peuvent se manifester dans l'air ou dans l'isolant diélectrique (internes ou externes) [48, 51-52, 56]. Afin de visualiser et d'analyser ce problème, la distribution du potentiel, les lignes équipotentielles, la distribution du champ électrique et ses deux composantes (radiale et tangentielle) le long de la longueur de la surface extérieure du câble ont été déterminées.

3.3.3.1 Distribution du Potentiel

Le calcul du potentiel représente une méthode populaire pour examiner et étudier les systèmes électriques. De ce fait, les résultats obtenus sont représentés sur les figures 3.7 à 3.9 donnant respectivement la distribution surfacique du potentiel, les lignes équipotentielles et la variation du potentiel tout au long de la longueur de la surface extérieure du câble.

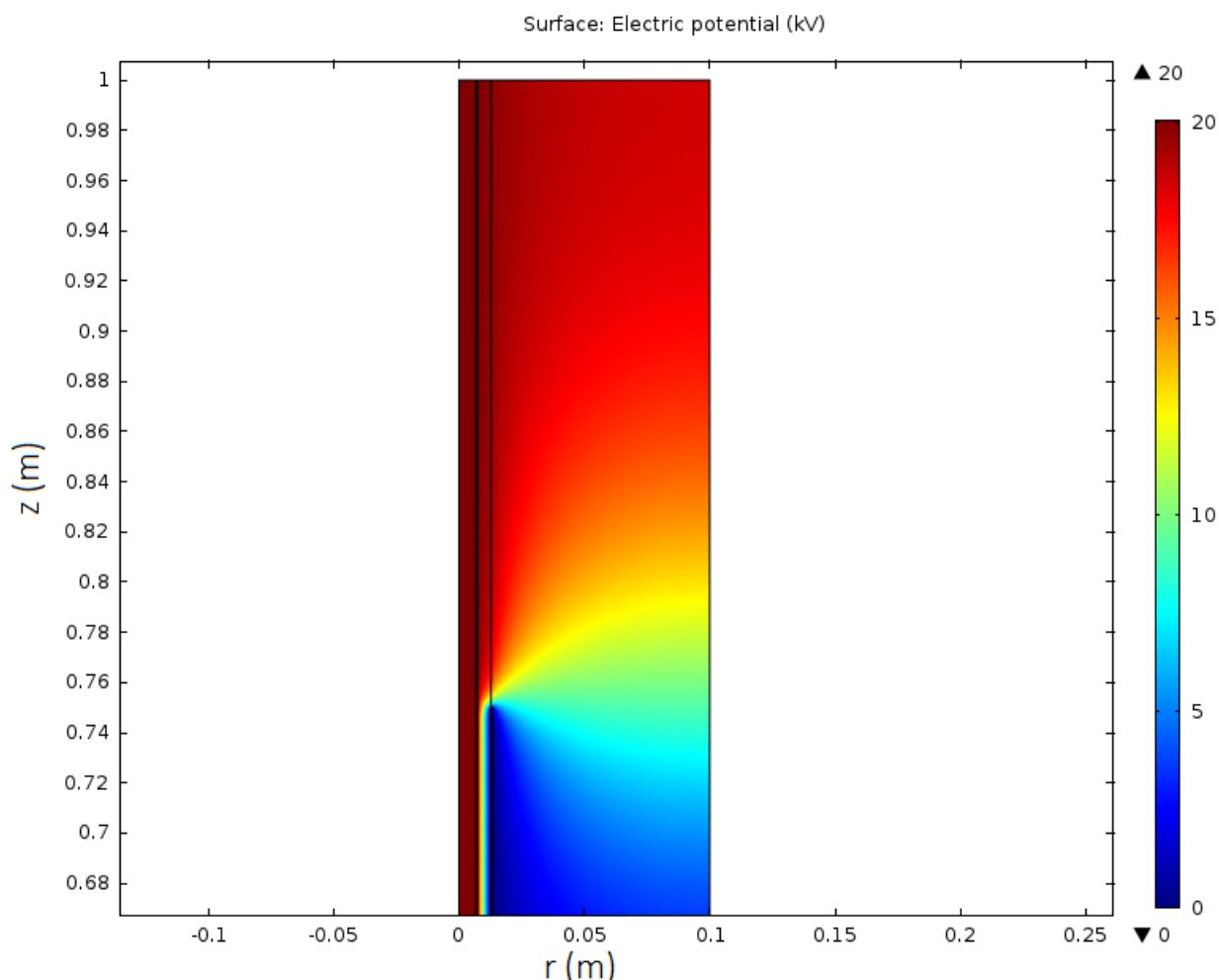


Figure 3.7 – Distribution surfacique du potentiel

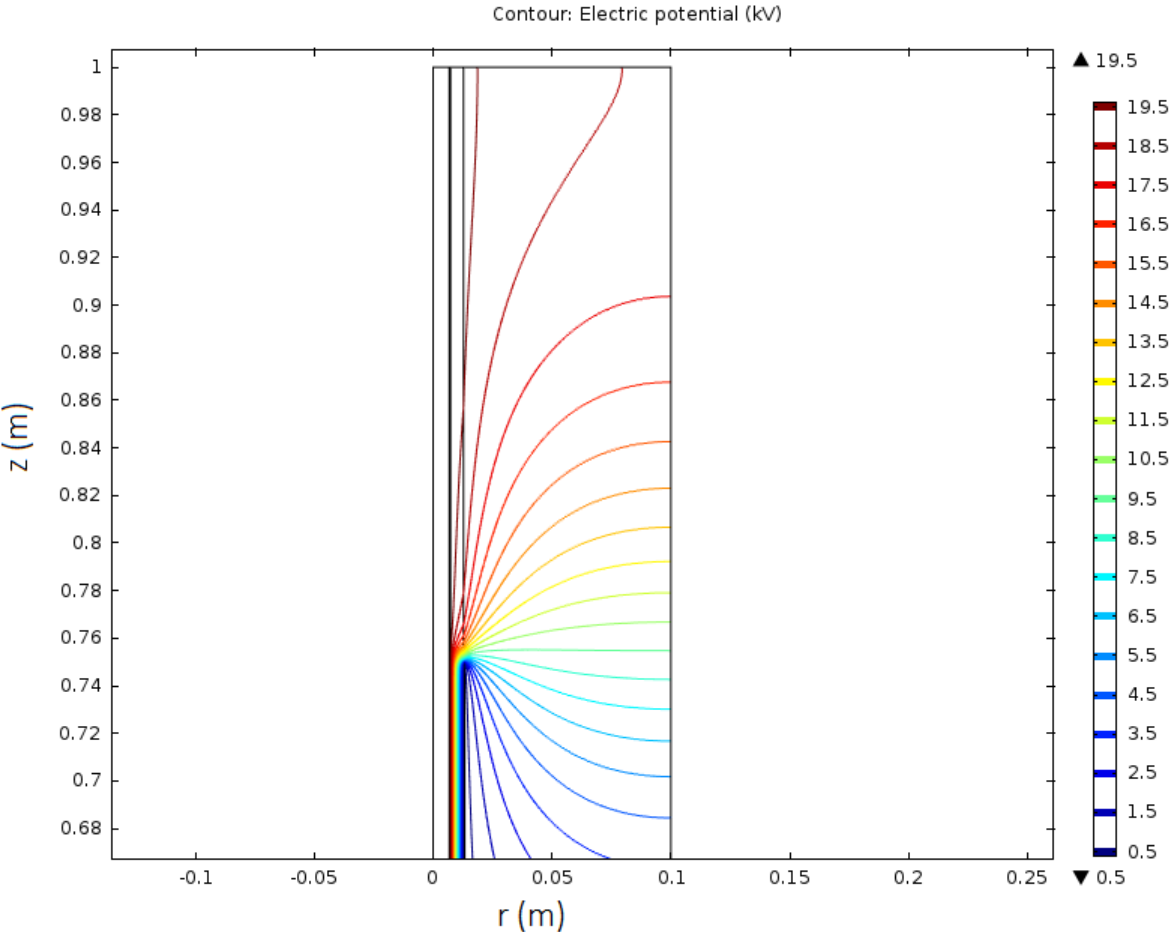


Figure 3.8 – Distribution des lignes équipotentielles

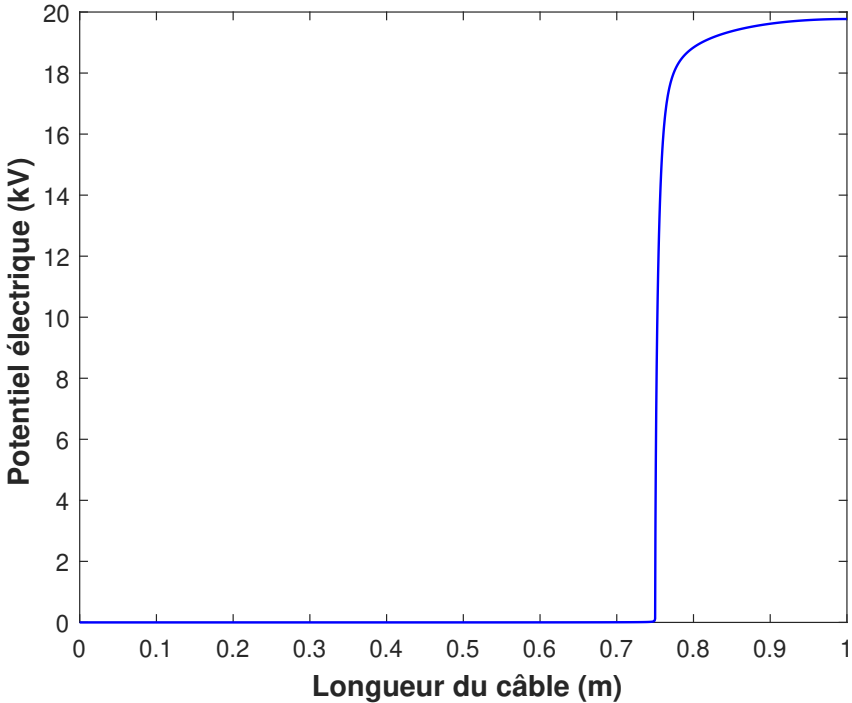


Figure 3.9 – Variation du potentiel le long de la longueur de la surface extérieure du câble

La figure 3.7 illustre le profil du potentiel sur le modèle du câble de 20 kV isolé au PRC, où l'écran semi-conducteur et l'écran mis à la terre sont dénudés de 25 cm. De cette figure, nous remarquons qu'avant la discontinuité de l'écran (soit pour $z < 0,75$ m), les plus hauts potentiels sont observés du côté de l'âme conductrice et les plus faibles sont du côté de l'écran mis à la terre. Nous remarquons aussi que le potentiel à la surface extérieure du câble est nul, cela est dû à la présence de l'écran mis à la terre. Par ailleurs, pour $z \geq 0,75$ m, nous constatons que les niveaux de potentiels à proximité de la discontinuité de l'écran sont très proches. Nous remarquons aussi de hauts potentiels à travers toute l'isolation et la surface extérieure du câble, cela est dû à l'absence de l'écran mis à la terre. Pour confirmer ces constatations, nous nous sommes intéressés à la distribution des lignes équipotentielles. De la figure 3.8, nous avons enregistré une concentration des lignes équipotentielles au niveau de la discontinuité de l'écran, tel que les hauts potentiels sont à proximité de l'électrode terre. En d'autres termes, les lignes équipotentielles se rapprochent les unes des autres de plus en plus qu'on se rapproche du point de la discontinuité. Pour but d'analyser davantage le potentiel au niveau de la discontinuité de l'écran, nous avons tracé la variation du potentiel le long de la longueur de la surface extérieure du câble. A partir de la figure 3.9, nous pouvons constater une augmentation brusque du potentiel à proximité de la discontinuité de l'écran ($z = 0,75$ m). A titre d'exemple, un potentiel électrique de 15,76 kV a été enregistré à $z = 0,76$ m de la discontinuité de l'écran. Ce gradient de potentiel provoquera un renforcement du champ électrique localisé en ces endroits.

3.3.3.2 Distribution du Champ Électrique

Pour une meilleure évaluation de la dangerosité de ce problème, nous nous intéressons, dans cette section, à la distribution du champ électrique représentée sur la figure 3.10, ainsi qu'à la variation du champ le long de la longueur de la surface extérieure du câble illustrée sur la figure 3.11.

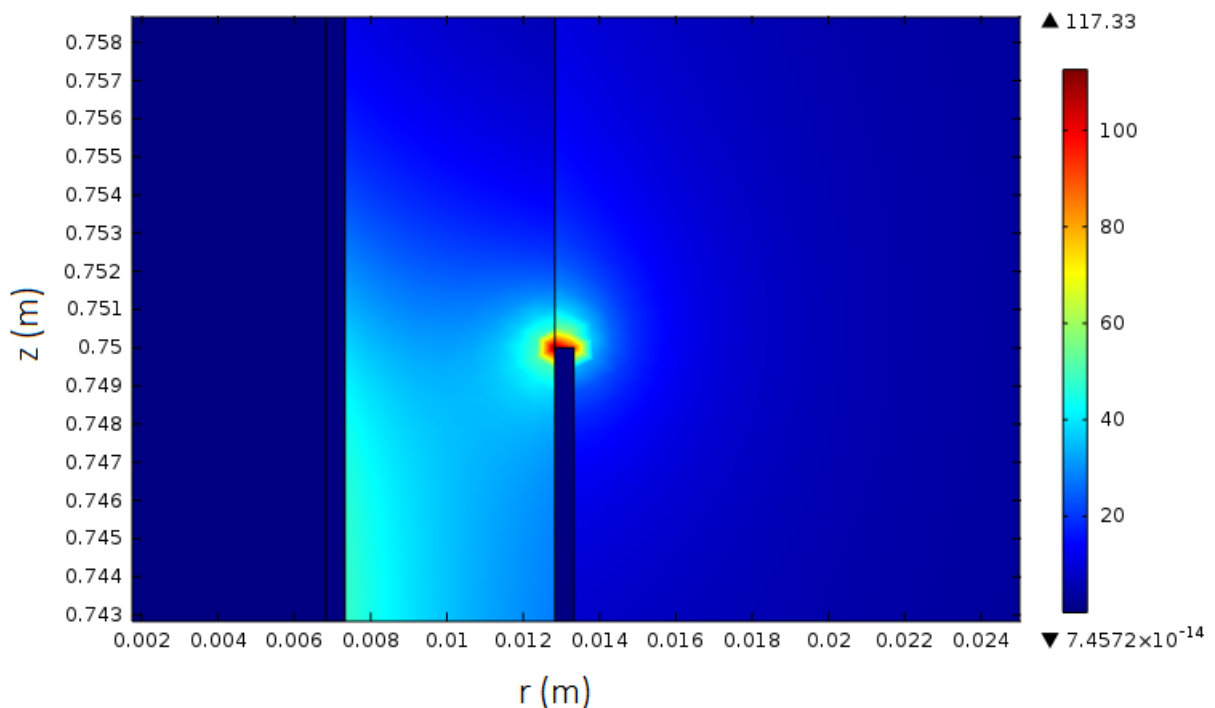


Figure 3.10 – Distribution du champ électrique au niveau de la terminaison du câble

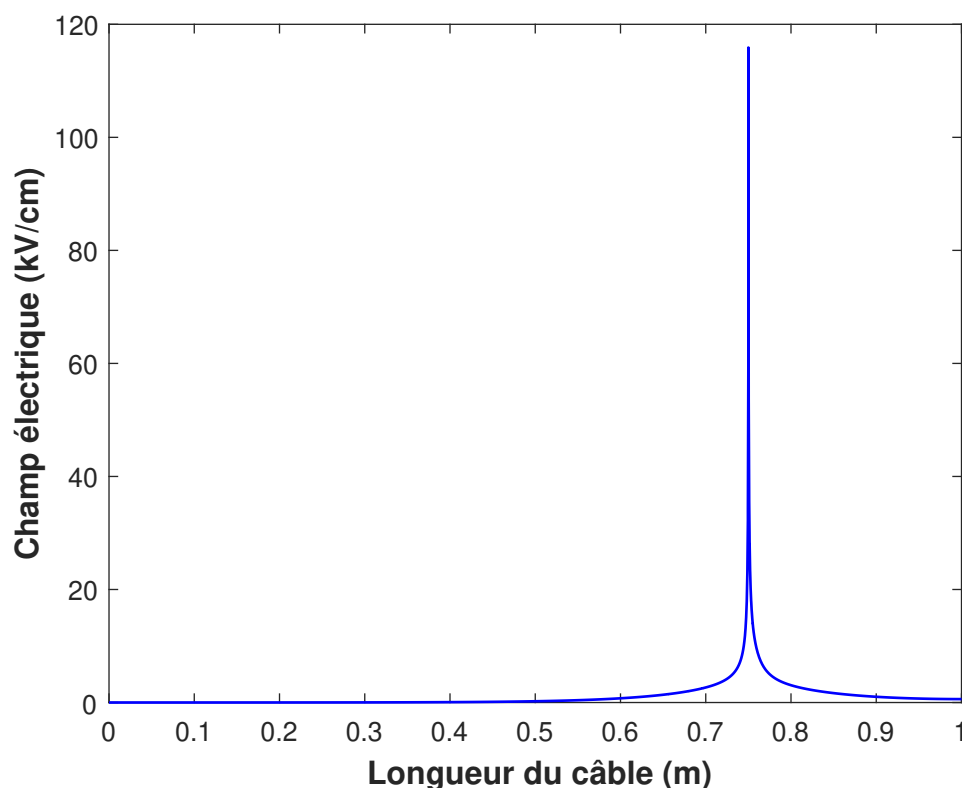


Figure 3.11 – Variation du champ électrique le long de la longueur de la surface extérieure du câble

De la figure 3.10, nous pouvons remarquer que la distribution du champ électrique à l'intérieur du diélectrique (PRC) avant la coupure de l'écran (soit pour $0 < z < 0,75$ m) est uniforme suivant l'axe z et le champ électrique diminue d'une valeur maximale de 48,5 kV/cm à une valeur minimale de 29 kV/cm. Par ailleurs, nous observons une concentration du champ électrique au niveau du point de la discontinuité ($z = 0,75$ m) de l'écran due au gradient de potentiel en ce point critique. La valeur du champ électrique en ce point est autour de 117 kV/cm. La figure 3.11 nous permet d'extraire plus de détails quant à la variation de ce champ le long de la longueur de la surface extérieure du câble. De cette dernière, nous constatons que le champ à la surface extérieure du câble est pratiquement nul pour $z < 0,6$ m, à partir de cette valeur, le champ électrique augmente brusquement atteignant une valeur maximale de 117 kV/cm au point de discontinuité de l'écran (point critique). Ce champ diminue en s'éloignant de ce point, jusqu'à atteindre une valeur presque nul pour $z > 0,9$ m.

Pour comprendre l'origine de cette concentration du champ électrique en ce point critique ($z = 0,75$ m), nous nous intéressons aux distributions des deux composantes du champ électrique radiale et tangentielle présentées respectivement sur les figures 3.12 et 3.13.

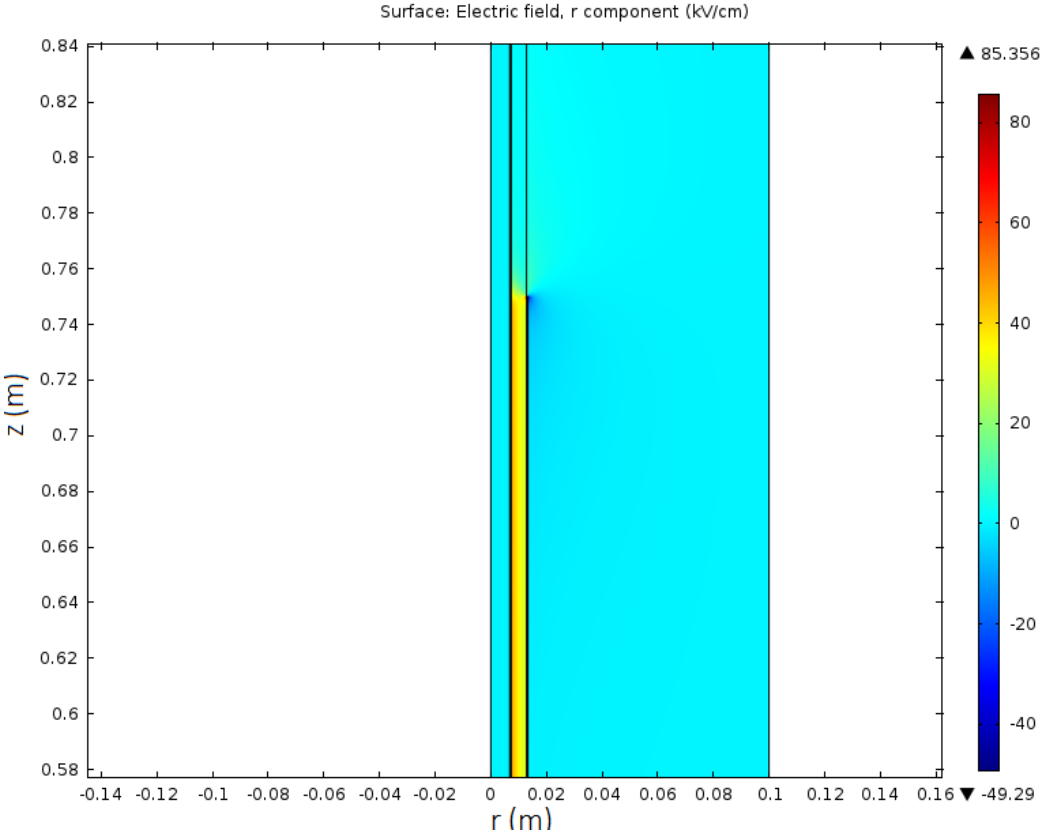


Figure 3.12 – Distribution de la composante radiale du champ électrique

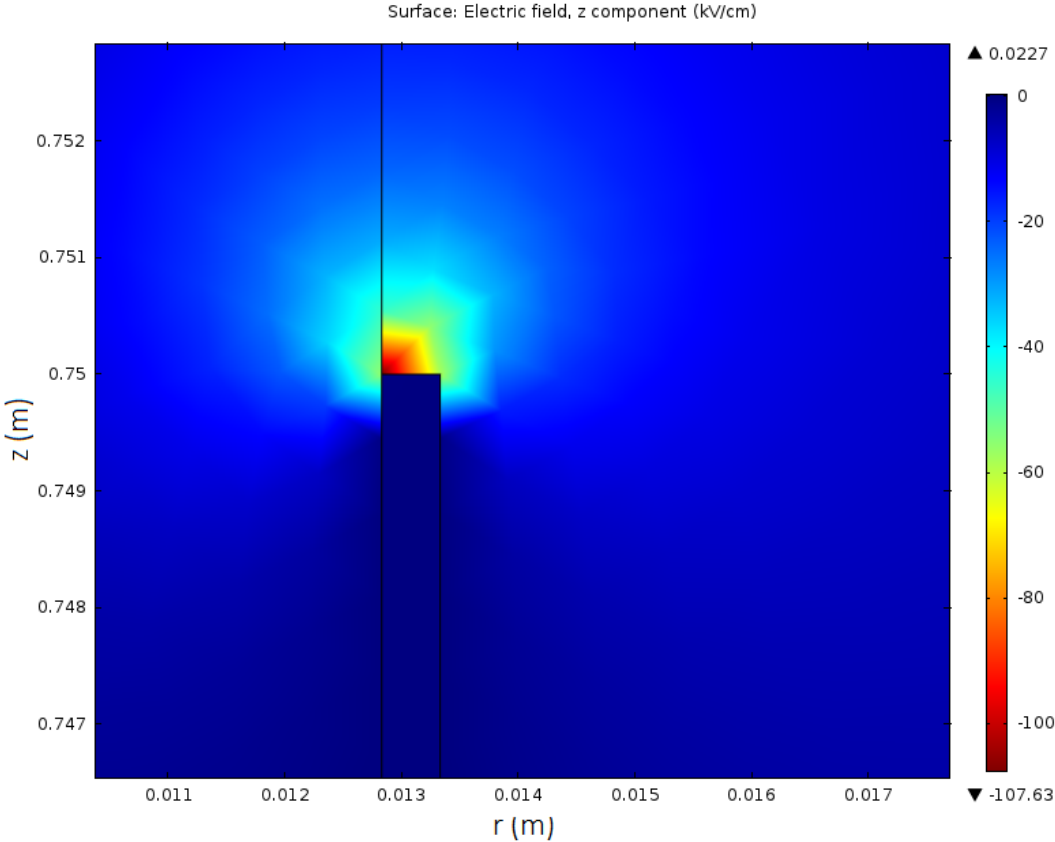


Figure 3.13 – Distribution de la composante tangentielle du champ électrique

De la figure 3.12 et 3.13, nous remarquons que le champ électrique à l'intérieur du câble avant la coupure de l'écran mis à la terre soit pour $z < 0,75$ m est purement radial. Une naissance d'une composante tangentielle intense autour de 103 kV/cm est observé à $z = 0,75$ m est observée. Les variations de ces deux composantes le long de la longueur de la surface extérieure du câble sont présentées sur la figure 3.14.

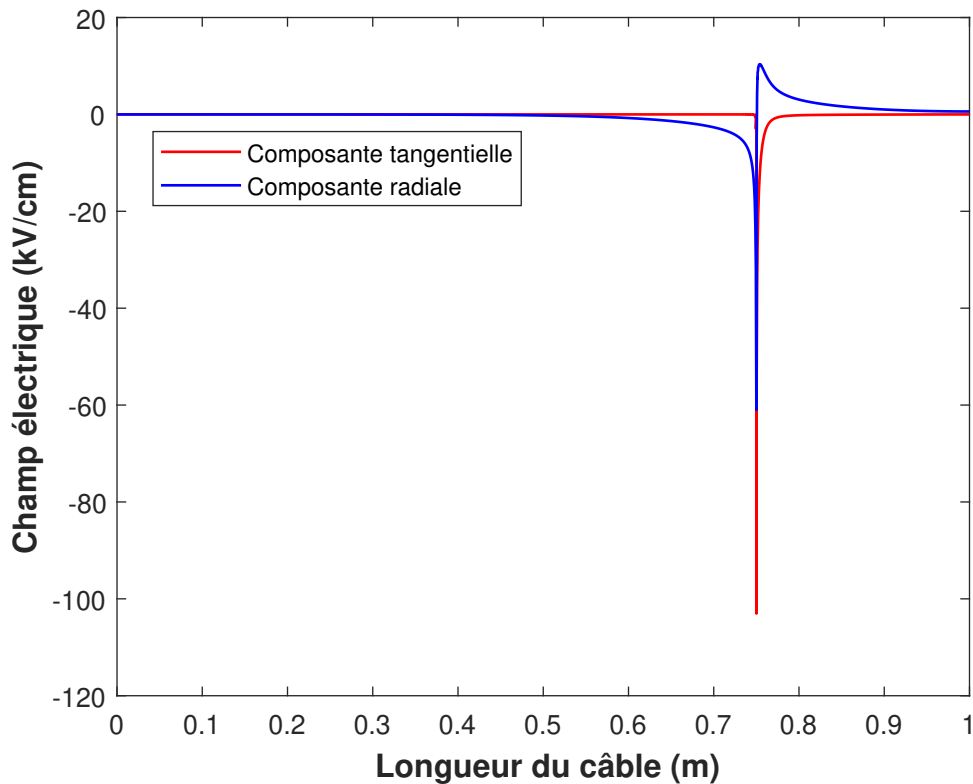


Figure 3.14 – Variations des deux composantes du champ électrique le long de la longueur de la surface extérieure du câble

De la figure 3.14, nous observons que la composante radiale du champ électrique commence à augmenter à partir de $z = 0,6$ m en mettant en évidence deux pics, au niveau de la discontinuité de l'écran $z = 0,75$ m. Le premier pic possède une intensité de 61,01 kV/cm tandis que le deuxième atteint une valeur de 10,34 kV/cm. Quant à la composante tangentielle, elle est nul pour $z < 0,75$ m et enregistre un pic d'une intensité de 103 kV/cm. L'existence de cette composante contribue fortement dans l'augmentation du champ électrique, déjà présentée sur la figure 3.11, enregistrée au niveau de la discontinuité de l'écran. Ces distributions de potentiel et de champ électriques le long de la longueur de la surface extérieure du câble du 20 kV sont en concordance avec les résultats obtenus par Malik et al. [30], Sharifi-Ghazvini [57], Baş [58] et Väkeväinen [59].

Ce renforcement du champ électrique peut engendrer des décharges partielles à l'intérieur de l'isolation et dans l'air, des étincelles visibles ou même des streamers, ... [50-52, 56]. De telles défaillances peuvent à leur tour causer des érosions dans le diélectrique et créer des points chauds au niveau de la discontinuité de l'écran. Ce qui peut diminuer la durée de vie des câbles, engendrer une augmentation des pertes diélectriques et mener à la rupture du câble causant ainsi une panne dans le système de transmission d'énergie [52]. En plus de ces effets néfastes sur le câble, il y a aussi des dangers et des risques sur

l'environnement tels que les interférences électromagnétiques et la génération du gaz toxique, l'ozone, par les décharges à la surface extérieure du câble [52]. De ce fait, le champ électrique aux terminaisons de câbles doit être réduit. Pour cela, différentes méthodes de contrôle et de réduction du champ électrique sont proposées.

3.4 Méthodes de réduction du champ aux terminaisons des câbles

Dans de nombreuses applications haute tension telles que les accessoires de câbles [50, 51, 60], les enroulements d'extrémité de générateur ou de moteur ou les traversées [61], des problèmes de concentration du champ électrique peuvent survenir. Le contrôle de cette contrainte électrique est par conséquent un des sujets clés de l'ingénierie de la haute tension. Pour cela, différentes techniques de réduction de l'intensité du champ électrique sont proposées [56].

Les critères de conception des câbles haute tension, tels que le coût, la sécurité, la température et les faibles intensités du champ électrique, sont souvent contradictoires. En effet, équilibrer ces critères est une tâche pointilleuse. A titre d'exemple, une plus faible épaisseur d'isolation entraîne des coûts de matériaux et des températures plus faibles, mais des champs électriques très élevés ce qui peut causer un claquage du diélectrique solide (isolation du câble). Pour avoir une conception optimale, un contrôle approprié du champ électrique est primordial [62].

Le contrôle du champ électrique est très important dans le cadre de la coordination d'isolement. Il permet de rendre les produits plus compétitifs, surtout qu'aujourd'hui les niveaux de tension augmentent, la taille des composants diminue, la logistique d'installation est un problème et la demande d'intégration de différentes fonctions dans un seul appareil est en croissance [62].

Comme mentionné précédemment, l'élimination de l'écran mis à la terre engendre inévitablement un renforcement du champ électrique. En effet, diverses techniques sont utilisées afin de contrôler et réduire le champ électrique au niveau de cette terminaison du câble. Ces méthodes sont classées en deux catégories à savoir capacitives et résistives. La méthode capacitive la plus simple consiste en le contrôle géométrique des contraintes. Cette méthode utilise généralement des électrodes de forme assez spéciale appelées électrodes de Rogowski (déflecteur). D'autres méthodes exploitant les propriétés particulières des matériaux sont également proposées. Nous citons, entre autres, la méthode capacitive de contrôle par réfraction utilisant des matériaux de haute permittivité. Quant aux méthodes résistives, nous citons le contrôle résistif linéaire appelé aussi contrôle du champ électrique par impédance employant des particules conductrices et le contrôle résistif non linéaire exploitant la caractéristique de non-linéarité des matériaux [48, 56]. La chronologie du développement de ces méthodes est présentée sur la figure 3.15.

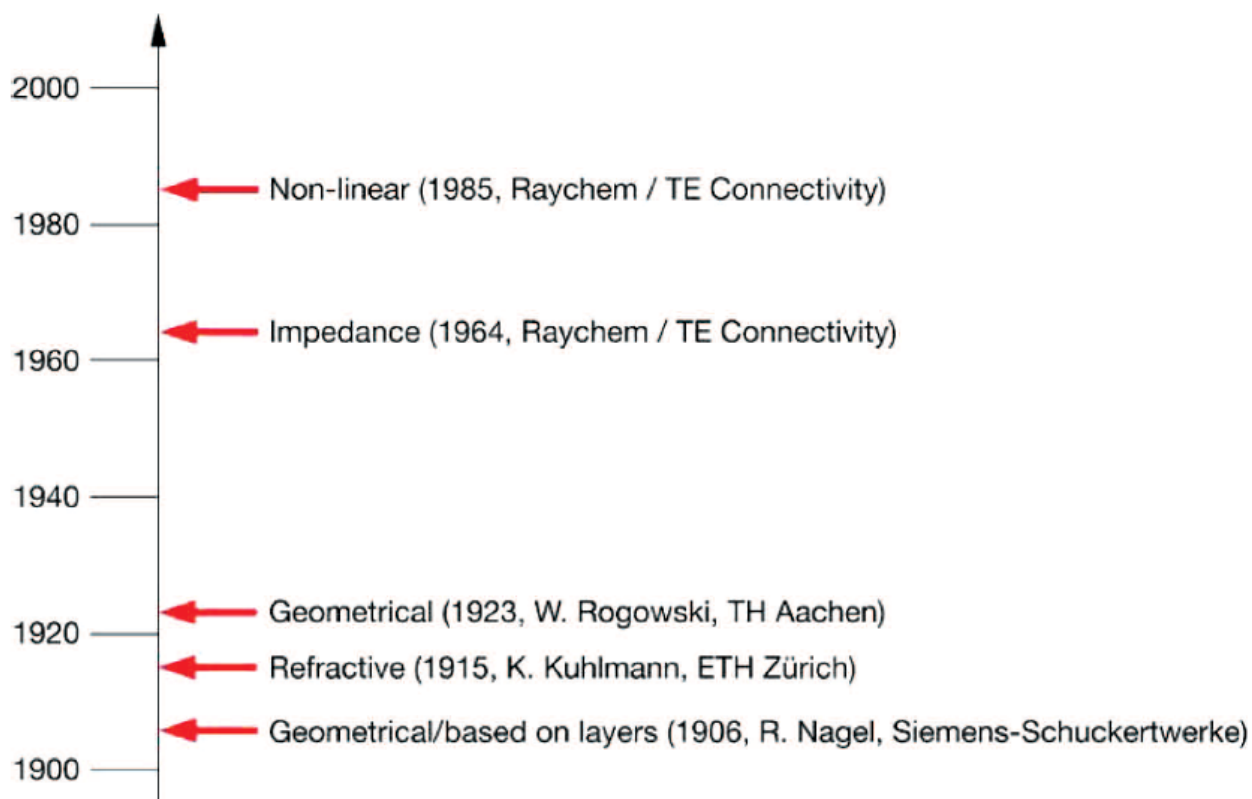


Figure 3.15 – Chronologie du développement des méthodes de contrôle du champ [56]

3.4.1 Contrôle capacitif

3.4.1.1 Méthode de contrôle géométrique

La méthode géométrique est une technique traditionnelle et largement utilisée dans l'industrie. Initiée en 1906, cette technique réduit la contrainte électrique au niveau de la discontinuité de l'écran mis à la terre en le prolongeant, tout en augmentant progressivement l'épaisseur du diélectrique. Ainsi, les zones où la contrainte électrique est plus élevée reçoivent une isolation supplémentaire [1]. La figure 3.16 présente la méthode géométrique traditionnelle où l'électrode de terre est mise sur l'apothème du cône solide.

En 1923, une autre forme de cette technique géométrique a été initiée sous le nom de la méthode de Rogowski (Figure 3.17) [56]. Cette dernière consiste à modifier la forme de l'électrode de terre (sous forme de cône déflecteur) afin de fournir une nouvelle distribution du champ électrique plus uniforme, tout en atténuant les contraintes au niveau de l'écran mis à la terre [56]. L'approche classique de la conception de ce déflecteur est de prendre un angle de départ proche de zéro degré (0°) et de prendre une courbe logarithmique sur toute sa longueur. Cela fournit généralement une solution idéale. Dans la pratique, l'angle de départ est compris entre 3 et 7 degrés [3].

Les méthodes géométriques nécessitent des volumes énormes, conduisant à des conceptions avec de grandes dimensions et diamètres. Par conséquent, certains fabricants recherchent des méthodes de contrôles alternatives [48].

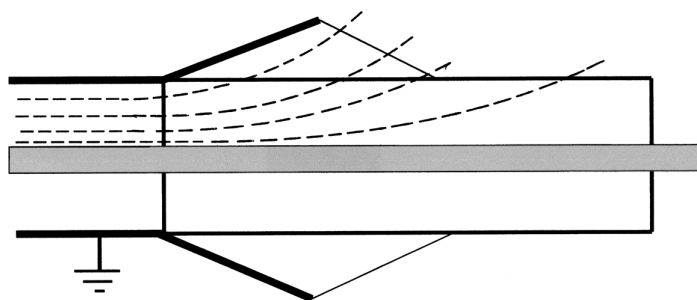


Figure 3.16 – Méthode de contrôle géométrique (sans déflecteur)[3]

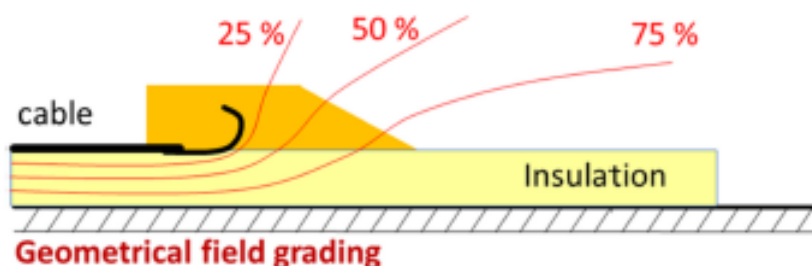


Figure 3.17 – Méthode de contrôle géométrique avec déflecteur [48]

3.4.1.2 Méthode de Contrôle par réfraction

Cette méthode consiste à appliquer une couche de haute permittivité au niveau des terminaisons de câbles. Cette couche a pour rôle de réfracter le champ électrique [63]. Cette méthode est basée sur le fait que la permittivité (ϵ_{r2}) du matériau réfractif est toujours beaucoup plus élevée que celle (ϵ_{r1}) de l'isolation et de l'environnement (ϵ_{r3}) entourant la terminaison du câble [56]. La réfraction permet d'éloigner la concentration du champ au niveau de la discontinuité de l'écran mis à la terre et de le répartir de la façon la plus uniforme possible [50-52]. Ainsi, le champ électrique maximal peut être réduit. La figure 3.18 illustre la méthode de contrôle du champ électrique par réfraction au niveau d'une terminaison de câble [48].

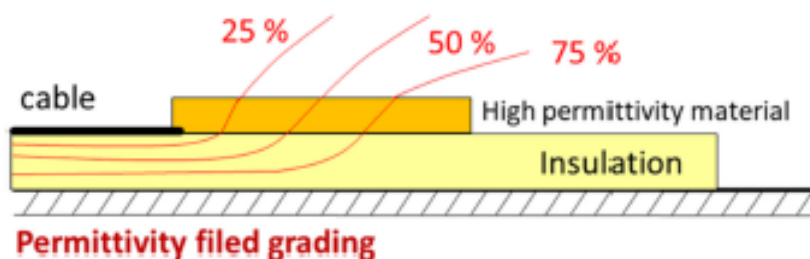


Figure 3.18 – Méthode de contrôle par réfraction [48]

3.4.1.3 Méthode de Contrôle Avec Brins Conducteurs

Cette méthode consiste à utiliser des brins métalliques conducteurs à l'intérieur d'un diélectrique (Figure 3.19). Ces brins conducteurs agissent comme des électrodes ayant un potentiel flottant, similaire au principe des diviseurs de tension capacitifs. Ce qui conduit à une répartition uniforme du potentiel dans le sens axial, engendrant la réduction de la contrainte au niveau de l'écran mis à la terre [48, 52]. Cependant, il existe des difficultés pratiques importantes dans la fabrication d'un tel système [52].

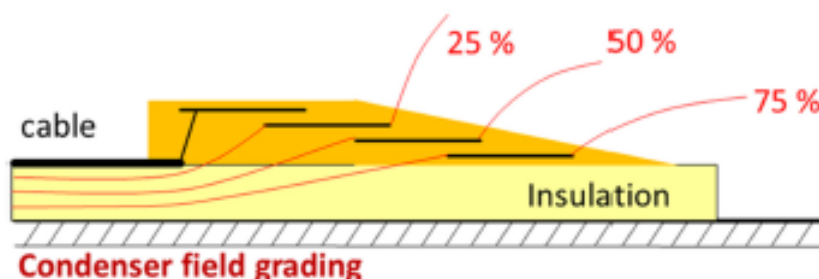


Figure 3.19 – Méthode de contrôle avec brins conducteurs [48]

3.4.2 Contrôle résistif

3.4.2.1 Contrôle par impédance (contrôle résistif linéaire)

Le contrôle résistif est une alternative très prometteuse relativement aux méthodes capacitives traditionnelles [64]. L'avantage majeur de cette méthode est d'avoir une conception plus petite pour des conditions de fonctionnement nominales par rapport à celle des méthodes capacitives qui conduisent souvent à une conception surdimensionnée [62]. Le câble peut être vu comme une capacité cylindrique. Le conducteur présente l'électrode haute tension et l'écran mis à la terre présente l'électrode de la terre [56]. Pour réduire le champ dans la partie où l'écran est coupé, une couche semi-conductrice avec une résistivité spécifique est appliquée à l'aide de tubes thermo-rétractables à la surface de l'isolation du câble [48]. La capacité de l'écran mis à la terre est combinée avec l'impédance du matériau de la couche supplémentaire [56]. Le mécanisme de contrôle résistif fonctionne en amenant les régions critiques où le champ est élevé à un état conducteur. Il y aura donc une formation de charges d'espace qui créent un contre-champ, réduisant ainsi le champ électrique dans ces régions [62]. Cette terminaison de câble est équivalente à un circuit linéaire RC comme le montre la figure 3.20. Il faut préciser aussi que les capacités en parallèles ne jouent aucun rôle dans la réduction de champ dans le cas de courant continu. Dans ces conditions, ces capacités peuvent être négligées [48].

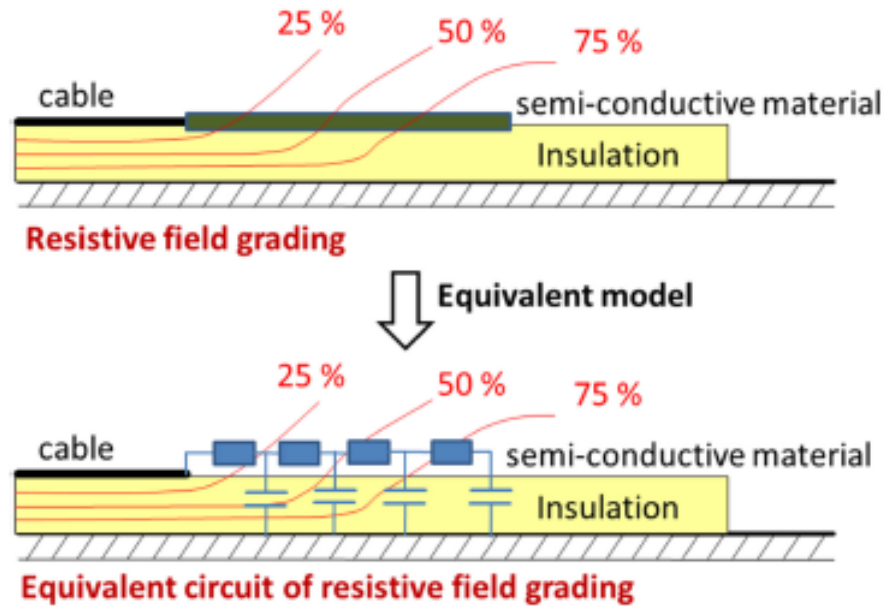


Figure 3.20 – Circuit équivalent de la méthode de contrôle résistif linéaire (par impédance) du champ électrique [48]

La distribution du potentiel au niveau du tube de contrôle du champ sera donc influencée principalement par l'impédance de la couche additionnelle. Ce potentiel s'écrit donc :

$$U(x) = U_l \cosh(\gamma(l - x)) - Z I_l \sinh(\gamma(l - x)) \quad (3.1)$$

Avec U_l, I_l représentent respectivement le potentiel et le courant à la fin du tube résistif, Z représente l'impédance de la couche additionnelle, γ est la constante de propagation et l est la longueur du tube [56].

L'équation (3.1) montre que le choix de la bonne valeur de la résistivité du tube est donc très important pour un bon contrôle du champ, si [56] :

- La résistivité est supposée infinie = ∞ , le tube sera donc isolant et la différence de potentiel au niveau de la coupure d'écran ($x = 0$), s'écrit donc :

$$U(x) = \frac{U_l \cosh(\sqrt{ZY}(l - x))}{\cosh(\sqrt{ZY}l)} \xrightarrow{Z \rightarrow \infty} U(x = 0) = 0 \quad (3.2)$$

avec Y Admittance électrique.

Il y aura donc un gradient de potentiel à la coupure de l'écran car le tube est à son potentiel plein (potentiel élevé), comme le représente le graphe (a) de la figure 3.21. Etant donné que le champ reste toujours intense, une très grande impédance ne satisfait pas les besoins de contrôle du champ.

- La résistivité est supposée nul, = 0 , le tube sera donc très conducteur et la différence de potentiel au niveau de la coupure d'écran ($x = 0$), s'écrit donc :

$$U(x) = \frac{U_l \cosh(\sqrt{ZY}(l - x))}{\cosh(\sqrt{ZY}l)} \xrightarrow{Z \rightarrow 0} U(x = 0) = U_l \quad (3.3)$$

Dans ce cas, le champ n'est pas atténué à la coupure de l'écran (x_1) comme le montre le graphe (b) de la figure 3.21, mais il est déplacé jusqu'à l'extrémité du tube (x_2). Donc un tube hautement conducteur ne satisfait pas aussi les besoins de réduction de champ.

Donc pour un contrôle de champ satisfaisant, le choix d'une valeur intermédiaire de conductivité est indispensable ; le champ électrique sera donc atténué à la coupure d'écran comme le montre le graphe (c) de la figure 3.21.

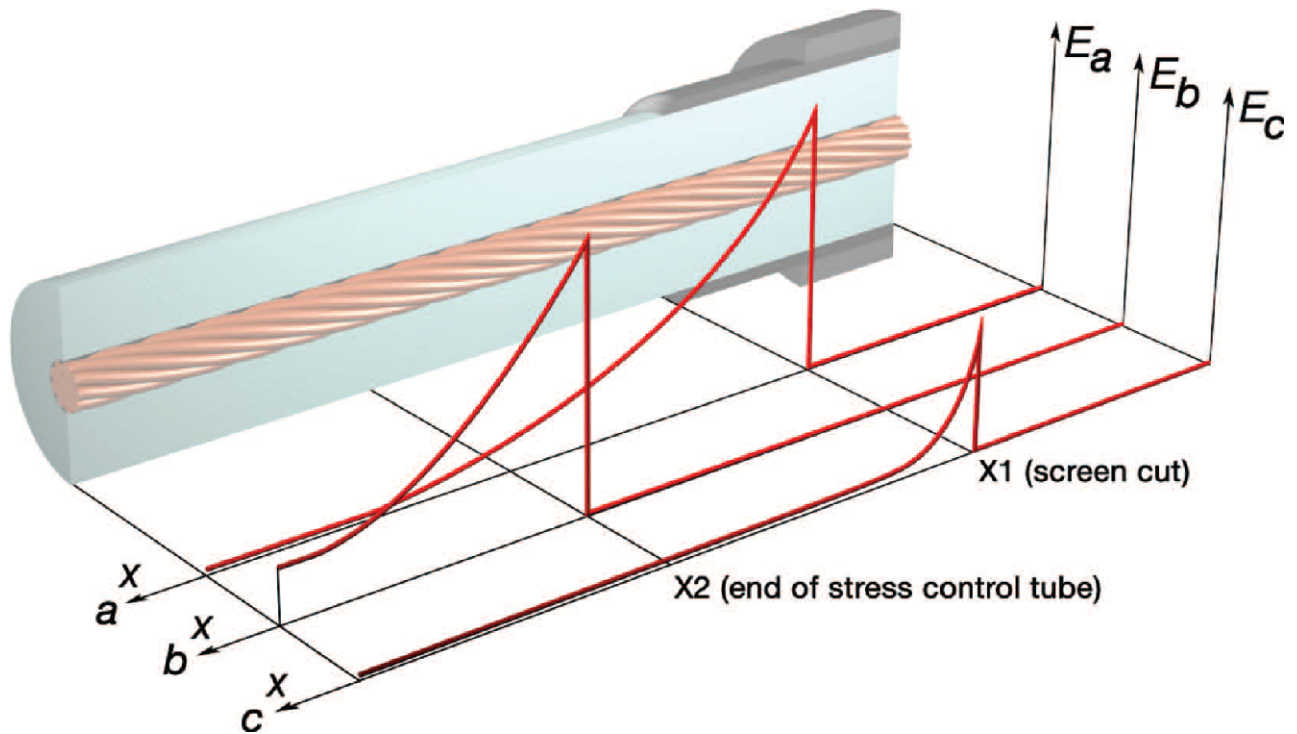


Figure 3.21 – Distribution du champ électrique entre l'électrode haute tension et celle de terre en utilisant le contrôle résistif. Graphe (a) est relatif à un tube de contrôle isolant $z = \infty$, Graphe (b) concerne un tube de contrôle très conducteur $z = 0$, Graphe (c) pour un tube de contrôle avec une conductivité intermédiaire [56]

La conductivité est définie principalement par la concentration du noir de carbone, pour un fonctionnement optimal. La teneur du noir de carbone doit être choisie d'une façon à avoir une conductivité qui se situe dans la plage de 10^{-5} à 10^{-10} [S/cm] [56].

La méthode résistif linéaire est basée principalement sur les courants de conduction. Cependant, ces derniers peuvent créer une quantité considérable de chaleur non désirable sur la surface du câble. De ce fait, l'inconvénient principal de cette méthode est la dépendance de la température à la conductivité ; un simple défaut de paramétrage de la conductivité peut causer un surchauffage local. Cette méthode présente aussi d'autres inconvénients tels que la difficulté à définir la valeur appropriée de la conductivité et la dépendance de cette dernière à la fréquence [48, 62].

3.4.2.2 Contrôle résistif non linéaire

Le choix de la conductivité des matériaux linéaire demeure une tâche très difficile pour le contrôle du champ par impédance. Lorsque les contraintes sont élevées, il faut augmenter la conductivité des matériaux. Cette augmentation ne fait que produire davantage de chaleur et des pertes par effet joule, comme c'est le cas dans les essais impulsionnels ou des commutations causées par un contrôle MLI. Une alternative de contrôle de ce type de contraintes est l'utilisation des matériaux non linéaires. La conductivité de ces matériaux dépend principalement des variations du champ électrique. Pour les régimes transitoires causés généralement par la commutation des interrupteurs, la contrainte électrique augmente sévèrement, ce qui cause l'augmentation de la conductivité des matériaux non linéaires pour ces brefs instants, offrant ainsi le minimum de pertes et de chaleur. Après ces brefs instants de surtensions, la conductivité diminue à une valeur adéquate assurant le contrôle du champ électrique au régime permanent. Autrement dit, le contrôle non linéaire n'agit donc que lorsque les contraintes sont maximales, ce qui minimise les pertes et la production de chaleur [62].

Le contrôle résistif non linéaire est effectué en utilisant des matériaux ayant des propriétés non linéaires [65], tel que la conductivité de ceux-ci varie en fonction du champ électrique. De ce fait, la densité de courant s'écrit donc : $\vec{j} = \sigma(E)\vec{E}$, contrairement au contrôle par impédance (contrôle résistif linéaire), où la densité de courant varie linéairement en fonction du champ, car la conductivité est indépendante des variations du champ électrique. La densité de courant s'écrit dans ce cas comme suit : $\vec{j} = \sigma\vec{E}$ [62]. Autrement dit, le contrôle non linéaire a le même circuit équivalent que celui du contrôle résistif linéaire (ou contrôle par impédance), sauf que les résistances sont variables (varistances) dans le cas du contrôle non linéaire comme le montre la figure 3.22 [48].

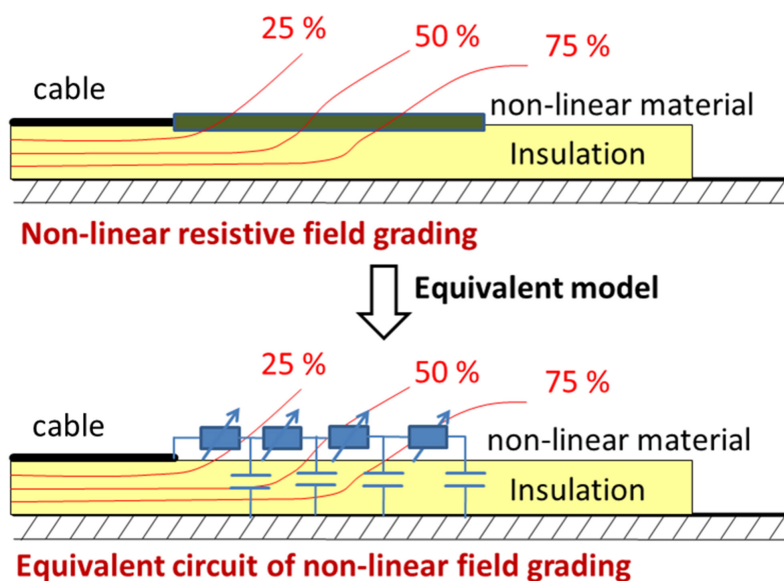


Figure 3.22 – Circuit équivalent de la méthode de contrôle résistif non linéaire du champ électrique [48]

Ces matériaux possèdent une faible valeur de la conductivité pour les faibles valeurs du champ électrique et deviennent significativement conducteurs si le champ électrique dépasse une certaine valeur, appelée point de commutation [48].

Pour illustrer l'effet de la non-linéarité de ces matériaux décrite par le coefficient α ($\alpha = 1$, pour les matériaux linéaires), nous considérons une configuration de deux électrodes sphériques concentriques de rayon r_1 et r_2 séparées par un matériau non linéaire, comme présenté sur la figure 3.23.a. L'effet de réduction du champ entre ces deux électrodes est défini par le facteur du champ f_r illustré sur la figure 3.23.b. Ce facteur représente le rapport entre les deux modules du champ électrique contrôlé par un matériau de non-linéarité α et celui contrôlé par un matériau linéaire ($\alpha = 1$). Ce coefficient s'écrit come suit :

$$f_r = \frac{(1 - 2\alpha^{-1}) \left(1 - \frac{r_2}{r_1}\right)}{\left(\frac{r_2}{r_1}\right)^{1-\frac{2}{\alpha}} - 1} \quad (3.4)$$

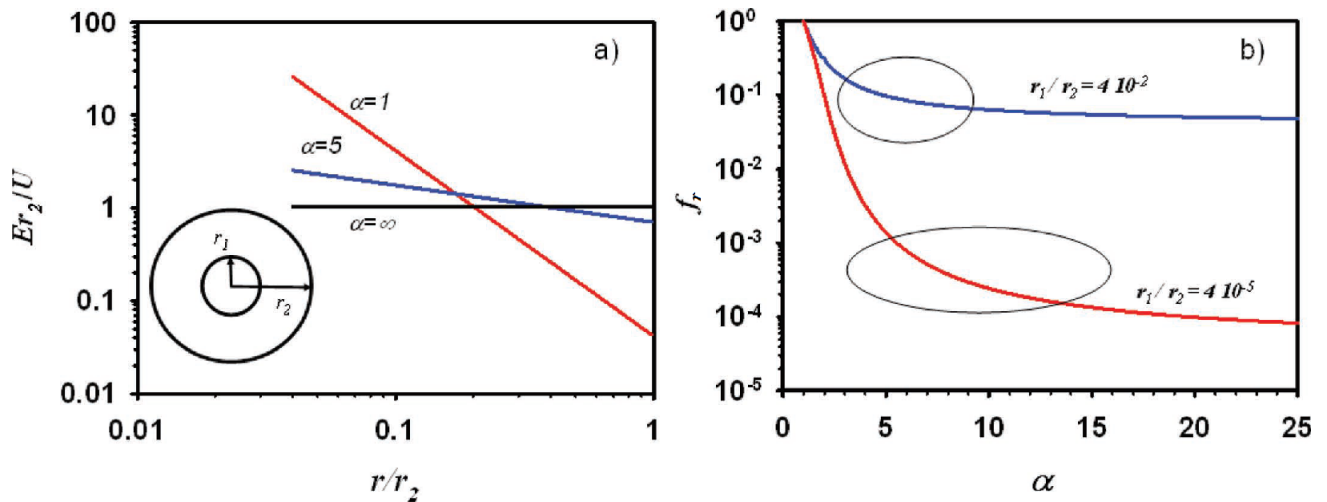


Figure 3.23 – a) Distribution du champ électrique pour différentes valeurs de α ; b) Variations du facteur du champ f_r pour différents rapports de rayons des sphères [62]

Comme le montre la figure 3.23.a, le champ tend vers un champ uniforme de plus en plus que les valeurs du coefficient α de la non-linéarité augmentent. Pour $\alpha \rightarrow \infty$, le champ devient constant et purement uniforme entre les deux électrodes. Par contre, une très grande valeur de non-linéarité rend la conception de tels matériaux une tâche très difficile. Cependant, pour une distance inter-électrodes fixée, il existe une valeur de α à partir de laquelle aucune amélioration significative du contrôle du champ électrique ne peut être obtenue, comme le montre la figure 3.23.b.

Cet effet est obtenu généralement en utilisant un composite rempli de Carbure de Silicium (SiC), ou Oxyde de Zinc (ZnO) aussi appelé micro-varistance. Les caractéristiques de la densité de courant en fonction du champ du SiC et du ZnO sont illustrées sur la figure 3.24 [57]. Comme indiqué, ZnO présente une non-linéarité significativement grande par rapport au SiC.

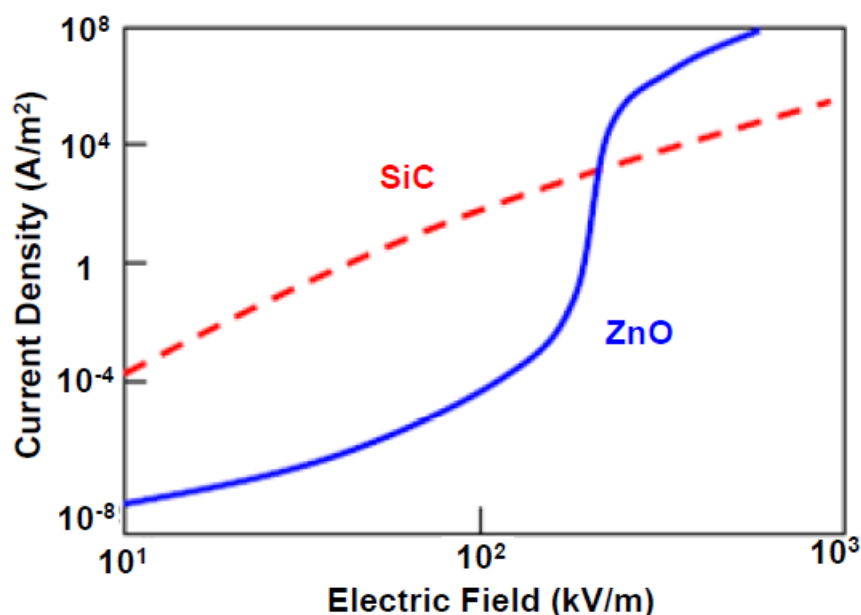


Figure 3.24 – Variation de la densité de courant en fonction du champ électrique pour ZnO et SiC [57]

3.5 Conclusion

Il ressort des travaux de recherche que nous avons entrepris dans ce chapitre, que le champ électrique au niveau des terminaisons du câble considéré est très élevé. Ainsi, et l'aide de la simulation effectuée sous environnement COMSOL, nous avons enregistré une intensité excessive du champ électrique de 117 kV/cm au niveau de la terminaison du câble de 20 kV isolé au PRC. Cette augmentation est due principalement à la création de la composante tangentielle au point de la discontinuité de l'écran mis à la terre. En ce point, l'intensité de cette composante atteint une valeur de 103 kV/cm. Un tel renforcement du champ pourrait engendrer les décharges partielles, l'érosion, les pertes diélectriques, la génération de gaz toxique (l'ozone), l'effet couronne, les interférences électromagnétiques, etc. Ce qui réduit la durée de vie du câble et peut mener à sa rupture. Pour éviter de telles défaillances, diverses méthodes de contrôle et de réduction du champ électrique sont proposées pour atténuer ce champ. Ces techniques sont classées en deux catégories : les méthodes capacitatives (géométrique, brins conducteurs, par réfractions) qui agissent à l'aide des courants de déplacement et les méthodes résistives (linéaire et non linéaire) qui agissent à l'aide des courants de conduction. La littérature a montré l'efficacité remarquable de ces méthodes dans la réduction du champ électrique au niveau des terminaisons des câbles.

Chapitre 4 :

Réduction du Champ Electrique à l'aide des Méthodes Capacitives

Chapitre 4

Réduction du Champ Electrique à l'aide des Méthodes Capacitives

4.1 Introduction

CE chapitre porte sur la réduction du champ électrique aux terminaisons des câbles MT et HT en utilisant les deux méthodes capacitatives présentées dans le chapitre précédent, à savoir contrôle par réfraction et contrôle géométrique. La validité de ces méthodes a été mise à l'épreuve pour une portion d'un câble de 20 kV isolée au PRC. Les résultats obtenus sont comparés à ceux reportés dans la littérature. Une analyse paramétrique a été, ensuite, effectuée. Nous nous sommes intéressés plus particulièrement à l'influence de l'épaisseur, la longueur et la permittivité de la couche additive de haute permittivité pour la première technique par réfraction ainsi que l'effet de la géométrie du cône solide pour la deuxième méthode à savoir contrôle géométrique. Les simulations ont été faites sous environnement COMSOL en 2D axisymétrique.

4.2 Méthode de Contrôle par Réfraction

Cette méthode consiste principalement à appliquer une couche diélectrique de haute permittivité au niveau de la terminaison du câble. L'effet de l'épaisseur, la longueur et la permittivité de la couche diélectrique additive aussi bien sur le champ que sur le potentiel a été étudié. Nous avons simulé le câble de 20 kV pour plusieurs épaisseurs e_c (variant de 0,6 à 2 mm par pas de 0,2 mm), longueurs L_c (de 5 à 25 cm par pas de 5 cm) et permittivités relatives (2,3, 10; 20, 30, 40, 80, 100, 120, 140 et 160) de la couche diélectrique additive. Pour ne pas alourdir ce chapitre, nous nous contentons d'exposer les résultats relatifs aux potentiel et champ électriques pour un seul scénario choisi aléatoirement et illustré sur la figure 4.1. Pour ce scénario, nous avons considéré une permittivité relative $\epsilon_r = 40$, une épaisseur $e_c = 2$ mm et une longueur totale de 0,95 m, soit de 20 cm depuis le point de discontinuité de l'écran ($z = 0,75$ m); l'influence de la longueur est analysée à partir du point de discontinuité, soit dans l'intervalle $0,75m < z < 1m$ [50, 51].

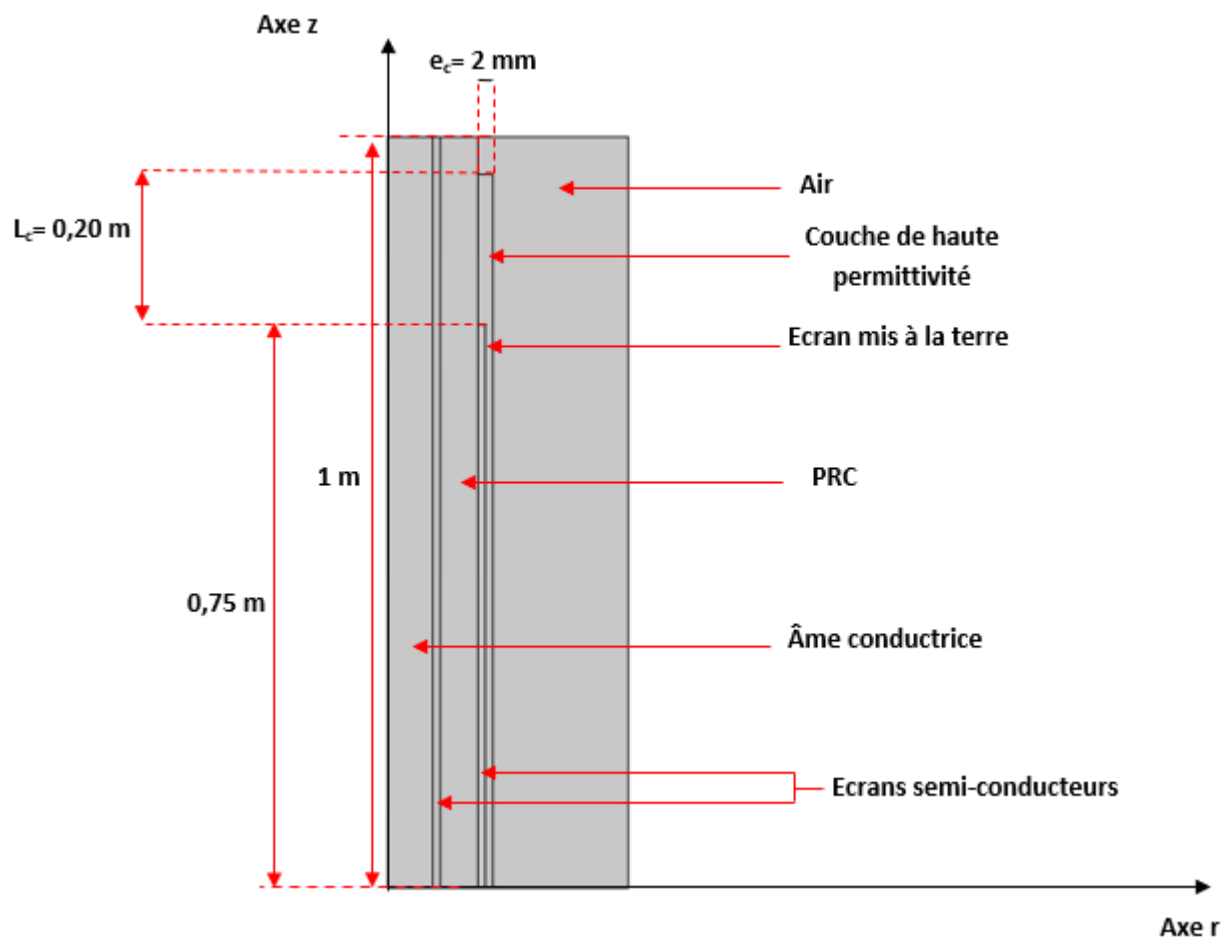


Figure 4.1 – Géométrie d'une terminaison de câble avec contrôle de champ électrique par réfraction

Les résultats obtenus par la simulation du scénario ainsi adopté sont présentés dans les sections suivantes.

4.2.1 Distribution du Potentiel

L'application de la méthode de contrôle du champ électrique par réfraction au niveau la terminaison du câble de 20 kV nous a permis d'obtenir la distribution surfacique du potentiel, les lignes équipotentielle ainsi que la variation du potentiel tout au long de la longueur de la surface extérieure du câble, représentées respectivement sur les figures 4.2 à 4.4.

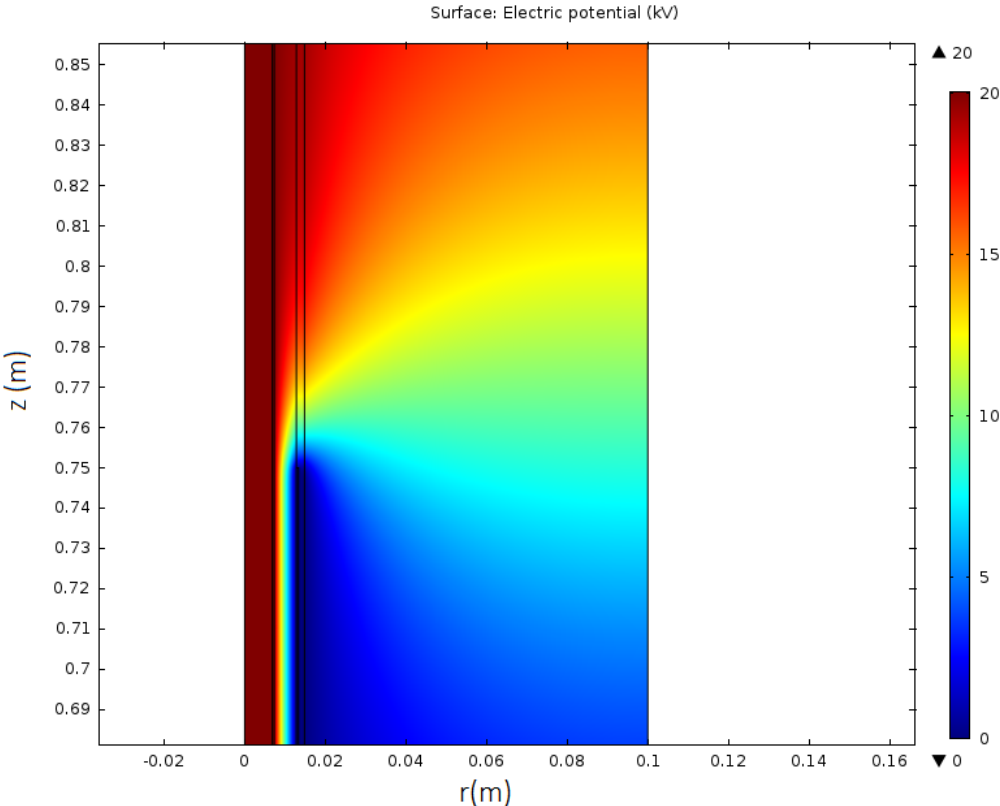


Figure 4.2 – Distribution surfacique du potentiel

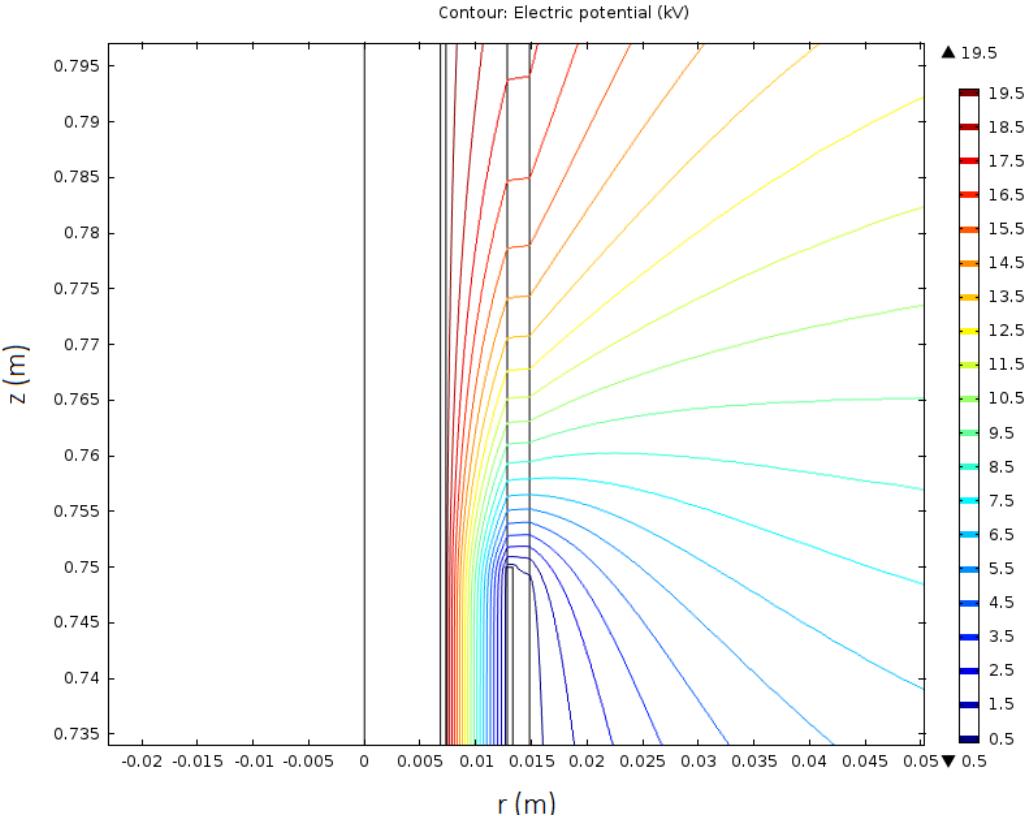


Figure 4.3 – Distribution des lignes équipotentielles

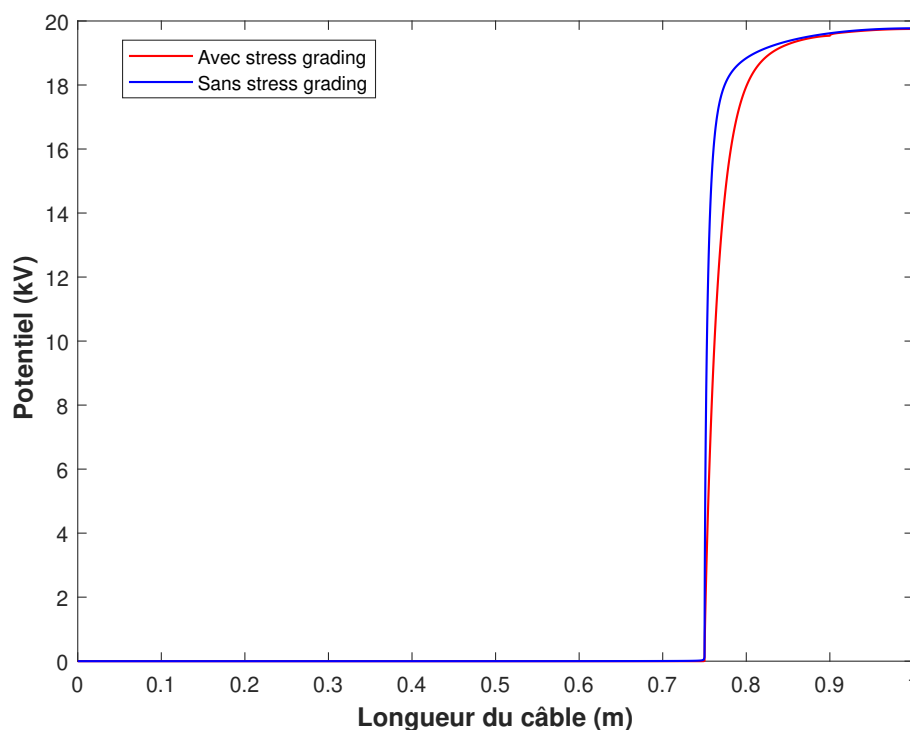


Figure 4.4 – Variation du potentiel électrique tout au long de la longueur de la surface extérieure du câble avant et après l'application de la méthode de contrôle par réfraction

A partir des figures 4.2 et 4.3, nous remarquons que les potentiels élevés se situent du côté de l'âme conductrice et les faibles sont du côté du point de discontinuité de l'écran impliquant ainsi un espacement important dans le potentiel entre les deux côtés. Nous remarquons aussi que les lignes équipotentielles sont beaucoup plus espacées et réparties tout au long de la surface de la couche de haute permittivité. Des constatations analogues ont été déjà faites par Nikolajevic et al. [50, 51]. Nous pouvons remarquer aussi que seule la ligne équipotentielle de 0,5 kV (représentant 2,5% de la tension maximale) qui passe à proximité du point de discontinuité de l'écran (soit en $z = 0,75$ m). Par contre, en absence de méthode de contrôle, les lignes équipotentielles étaient tellement concentrées qu'une multitude de lignes dont les valeurs appartiennent à l'intervalle $[0,5; 14,5kV]$ passaient à proximité du point de discontinuité (comme déjà illustré sur la figure 3.8). Ceci est en accord avec la variation du potentiel de la figure 4.4 qui montre que le gradient de potentiel enregistré à proximité du point de discontinuité, est moins important lors de l'application méthode de contrôle, qu'en absence de celle-ci. A titre d'exemple, nous avons obtenu, en $z = 0,7556$ m, un potentiel de l'ordre de 13,24 kV contre 5,89 kV obtenus respectivement avant et après l'application de la couche de haute permittivité. Les mêmes constatations ont été déjà faites par d'autres chercheurs [30, 57-58] considérant des câbles autres que le nôtre.

4.2.2 Distribution du Champ Electrique

Les figures 4.5 et 4.6 représentent la distribution du champ électrique ainsi que la variation de ce champ tout au long de la longueur de la surface extérieure du câble de 20 kV. De telles figures ont été obtenues après l'application de la méthode de contrôle du champ électrique par réfraction.

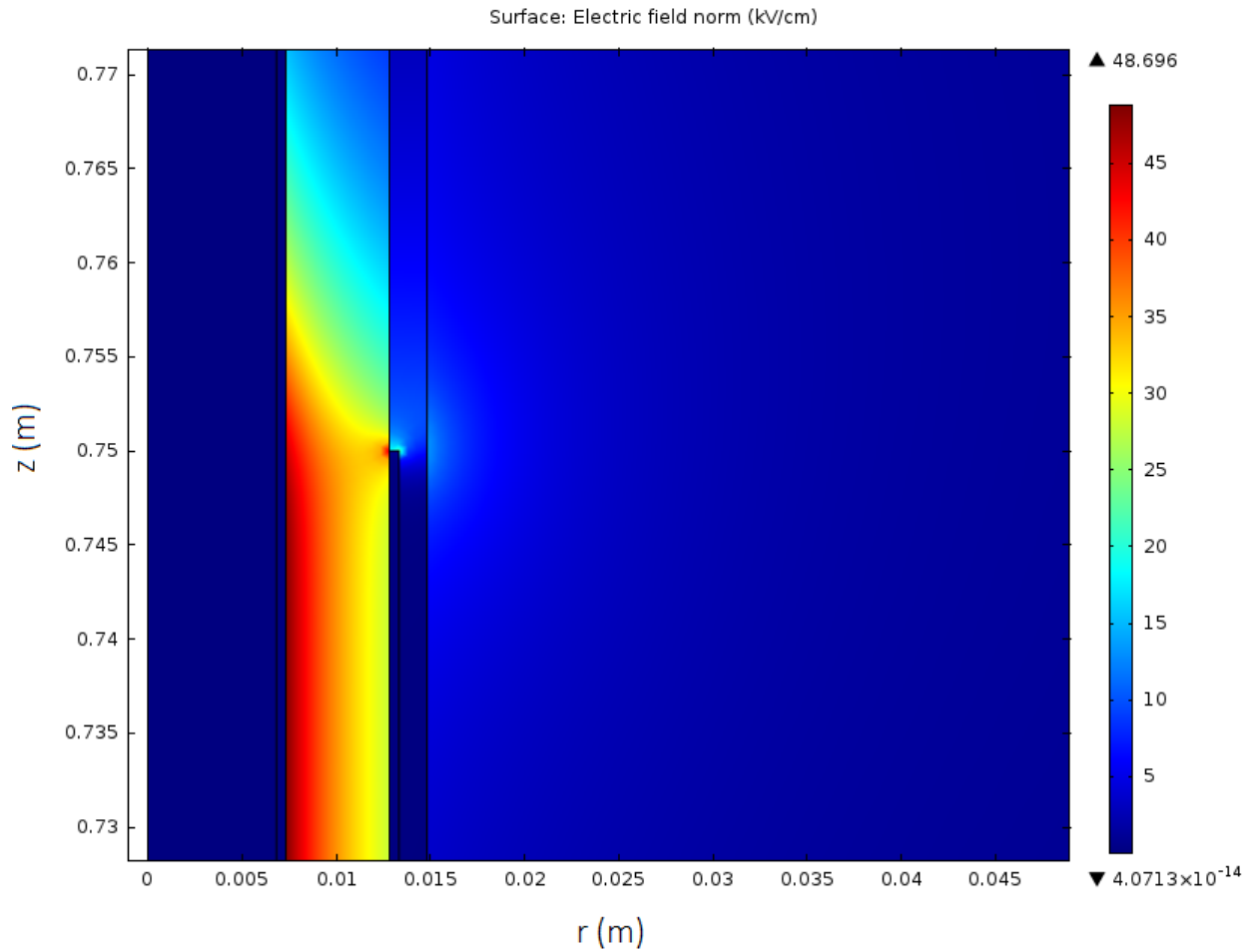


Figure 4.5 – Distribution surfacique du champ électrique

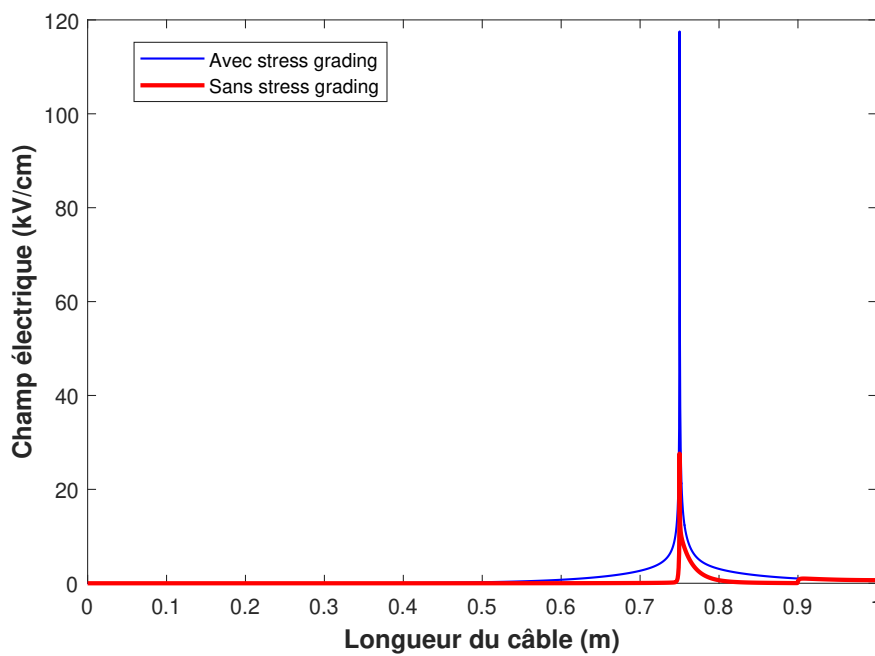


Figure 4.6 – Variation du champ électrique tout au long de la longueur de la surface extérieur du câble avant et après l'application de la méthode de contrôle par réfraction

La même distribution du champ électrique à l'intérieur du diélectrique (PRC) enregistrée pour $0 < z < 0,75$ m a été obtenue en appliquant (Figure 4.5) ou non (Figure 3.10) la méthode de contrôle du fait que cette partie du câble est non dénudée, donc n'a subi aucun changement de géométrie et/ou de matériaux. En effet, cette distribution est uniforme suivant l'axe des z . Cependant, suivant l'axe des r , le champ électrique, purement radial, diminue d'une valeur maximale de 48,5 kV/cm enregistrée du côté de l'âme conductrice à une valeur minimale de 29 kV/cm trouvée à proximité de l'écran mis à la terre. Par ailleurs, au niveau de la discontinuité de l'écran ($z = 0,75$ m), le champ électrique subit une diminution considérable à la discontinuité de l'écran comparé à celui illustré sur la figure 3.10.

De la figure 4.6, nous observons que suite à l'application de la méthode de contrôle, le champ diminue considérablement de 117 kV/cm à 27,61 kV/cm, soit une réduction de 76,4%. Nos résultats sont proches à ceux rapportés par Nikolajevic et al. [50-51] qui ont trouvé un champ de 21,6 kV/cm et 21,8 kV/cm lors de l'application d'une couche diélectrique ($\epsilon_r = 40$) de 1 mm et 3 mm d'épaisseur respectivement. Cette diminution est due à la réfraction des lignes de champ dans la couche de haute permittivité (qui doit être différente de celle de l'isolant).

Les distributions des deux composantes du champ électrique à savoir radiale et tangentielle le long de la longueur de la surface extérieure du câble sont représentées, respectivement, sur les figures 4.7 et 4.8.

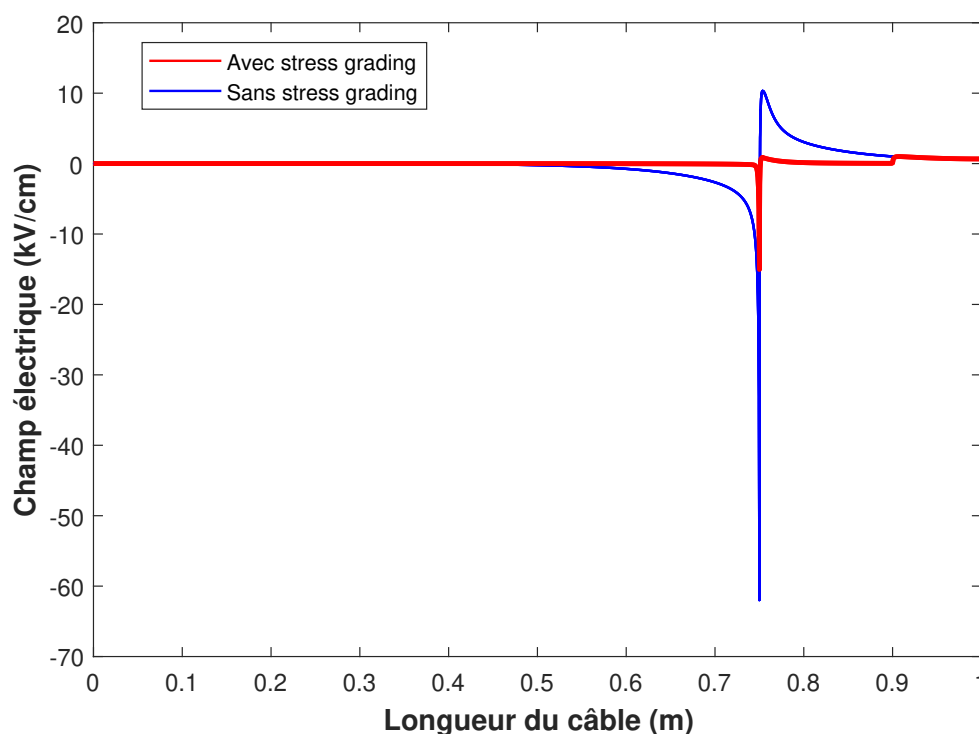


Figure 4.7 – Variation de la composante radiale du champ électrique tout au long de la longueur de la surface extérieur du câble avant et après l'application de la méthode de contrôle par réfraction

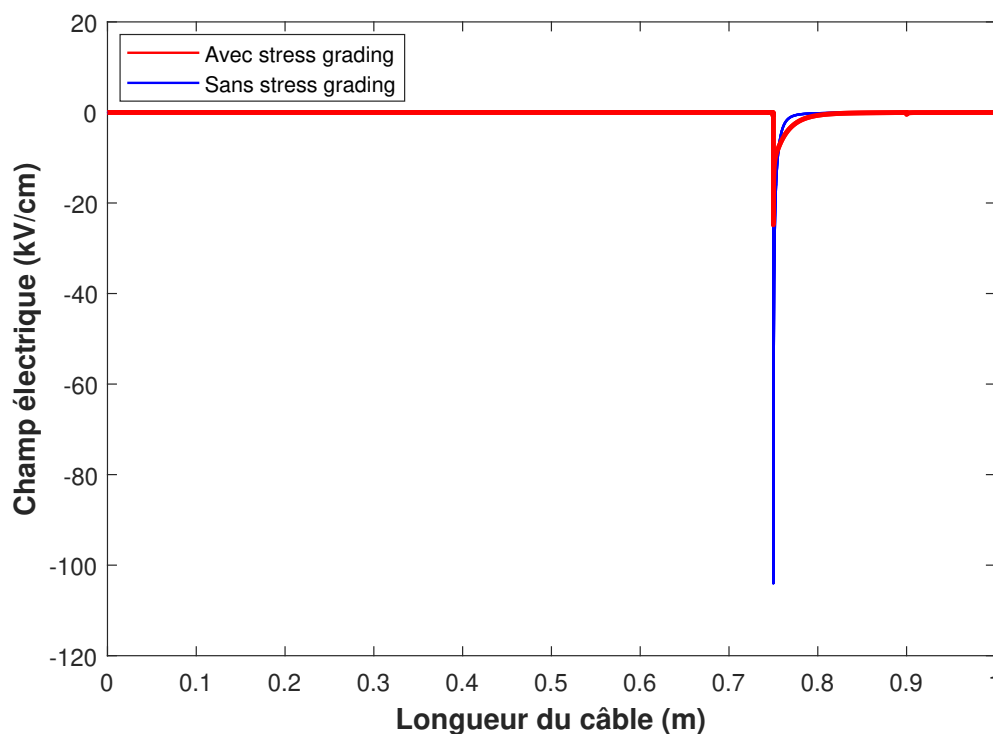


Figure 4.8 – Variation de la composante tangentielle du champ électrique tout au long de la longueur de la surface extérieur du câble avant et après l'application de la méthode de contrôle par réfraction

Comme mentionné notamment dans le chapitre précédent, le champ électrique dans la partie non dénudée du câble est purement radial. Cependant, un renforcement du champ apparaît au niveau de la discontinuité de l'écran (i.e où l'écran est coupé). Un tel renforcement du champ est dû principalement à la naissance de la composante tangentielle et aussi à l'augmentation de la composante radiale. Lors de l'application de la méthode de contrôle par réfraction, le champ électrique a connu une baisse considérable suite à la diminution remarquable des deux composantes du champ électrique. En effet, nous avons enregistré une diminution de 78,57% et 91,28% respectivement pour le premier et le deuxième pic de la composante radiale (Figure 4.7), contre 76,11% pour la composante tangentielle (Figure 4.8).

4.2.3 Etude Paramétrique

Afin d'étudier l'influence des différents paramètres électro-géométriques sur l'efficacité de la méthode de contrôle du champ par réfraction, une étude paramétrique a été faite. Ces paramètres consistent en la longueur L_c , l'épaisseur e_c et la permittivité relative ϵ_r de la couche de haute permittivité. Pour cela, différentes valeurs des trois paramètres ont été adoptées. L'objectif principal est de trouver la configuration optimale pour laquelle la valeur du champ électrique maximal à la surface du câble est la plus faible possible; plus basse encore que celle rapportée dans la littérature [50, 51].

4.2.3.1 Effet des Paramètres Géométriques

Relatif à la couche de haute permittivité, l'épaisseurs e_c considérée varie de 0,6 à 2 mm par pas de 0,2 mm et la longueur L_c de 5 à 25 cm par pas de 5 cm. Initialement, les simulations

ont été effectuées pour différentes valeurs de la permittivité relative de la couche additive. Si cette permittivité n'affecte pratiquement pas les grandeurs géométriques (épaisseur e_c et longueur L_c de la couche additive) optimales, elle influe considérablement sur le champ électrique. Afin de bien montrer l'influence des paramètres géométriques en utilisant la méthode de contrôle par réfraction, il est recommandé de choisir une faible permittivité relative de la couche diélectrique additive. Nikolajevic et al. [50-51] et Nelson et Hervig [63] ont proposé une valeur $\varepsilon_r = 10$ comme un seuil en dessous duquel cette méthode perd son efficacité. En effet, nous avons adopté cette valeur de permittivité dans cette section. Les résultats ainsi obtenus quant à la valeur du champ électrique maximal à la surface du câble sont récapitulés dans le tableau 4.1 suivant :

Table 4.1 – Champ électrique maximal (en kV/cm) pour différentes géométries de la couche de haute permittivité ($\varepsilon_r = 10$)

e_c (mm) \ L_c (cm)	05	10	15	20	25
0,6	52,50	54,66	54,66	60,80	61,10
0,8	49,13	48,84	48,90	49,85	50,70
1,0	47,60	45,11	31,83	51,00	59,47
1,2	48,05	48,05	56,82	56,30	48,93
1,4	50,65	55,09	51,53	54,82	56,32
1,6	56,20	51,82	47,90	48,22	49,78
1,8	53,35	51,82	47,90	56,23	56,86
2,0	56,45	57,33	51,07	53,12	55,93

D'après ce tableau, la valeur maximale du champ varie d'une manière aléatoire en fonction des paramètres géométriques, à savoir l'épaisseur e_c et la longueur L_c de la couche diélectrique additive. Des variations analogues ont été trouvées par Nikolajevic et al. [50-51]. En effet, l'augmentation des dimensions de la couche de haute permittivité n'impliquent pas forcément la diminution du champ électrique maximal à la terminaison du câble.

Par ailleurs, la plus faible valeur du champ électrique maximal est de 31,83 kV/cm. Cette configuration géométrique optimale a été obtenue pour une épaisseur $e_c = 1$ mm et une longueur $L_c = 15$ cm.

4.2.3.2 Effet de la Permittivité Relative

Le but de cette partie est d'analyser l'influence de la constante diélectrique sur le champ électrique. Pour cela, la permittivité relative ε_r de la couche additive a été variée de permittivité 2,3 à 140. Pour l'épaisseur e_c et la longueur L_c de cette couche, nous avons adopté celles qui ont donné la géométrie optimale à savoir $e_c = 1$ mm et $L_c = 15$ cm. L'objectif principal est de trouver les paramètres électro-géométriques, en l'occurrence e_c , L_c et ε_r , permettant l'obtention de la configuration optimale.

La figure 4.9 présente la variation du champ électrique au niveau de la discontinuité de l'écran en fonction de permittivité de la couche diélectrique additive.

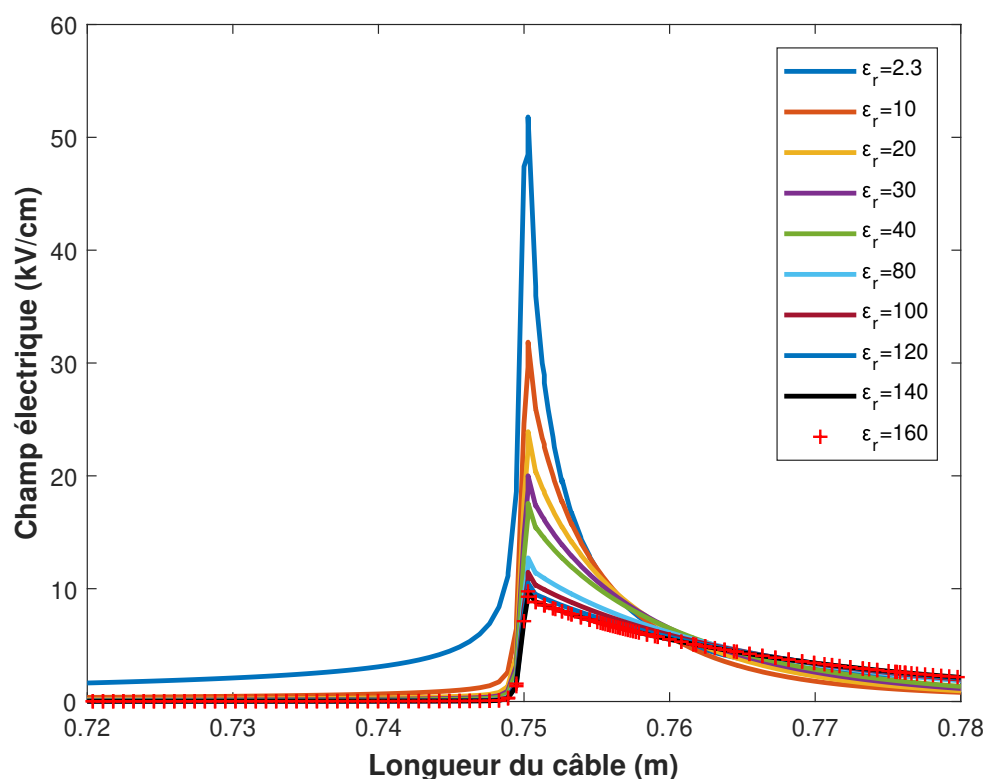


Figure 4.9 – Variation du champ électrique à la surface du câble en fonction de la permittivité relative de la couche additive

A partir de la figure 4.9, nous pouvons remarquer que l'effet de la constante diélectrique de la couche de haute permittivité est visiblement clair sur l'intensité du champ électrique. En effet, l'augmentation de la permittivité relative de la couche diélectrique engendre une diminution de l'intensité maximale du champ électrique.

Il est à noter que la plus faible valeur de la permittivité relative ($\epsilon_r = 2,3$) est égale à celle de l'isolation en PRC ; la couche additive possédant une telle permittivité relative n'est rien d'autre qu'une extension de l'isolation. C'est pourquoi, l'application d'une couche diélectrique ayant cette permittivité ($\epsilon_r = 2,3$) ne fournit pas de résultats satisfaisants. Comme conséquence néfaste, la valeur maximale du champ électrique obtenue est la plus importante et vaut 52,63 kV/cm. Une telle intensité peut générer les décharges partielles, l'érosion, les pertes diélectriques, la génération de gaz toxique (l'ozone), les interférences électromagnétiques, ... [50-52, 55, 56].

Pour une permittivité relative de $\epsilon_r = 10$, nous remarquons que le champ électrique diminue de 72,79% par rapport à celui du câble sans méthode de contrôle du champ électrique. Il est important de noter que les chercheurs dans le domaine, en l'occurrence Nikolajevic et al. [50, 51], Nelson et Hervig [63], Eigner et Semino [56] et Illias [66] ne recommandent en aucun cas l'application d'une couche additive de permittivité relative inférieure à 10. Autrement dit, la valeur minimale de la permittivité relative pour le fonctionnement de la méthode de contrôle du champ par réfraction est de 10.

Nous constatons également que le champ électrique diminue de plus en plus que la permittivité relative de la couche additive augmente. D'ailleurs, à partir de $\epsilon_r \geq 30$, les

champs électriques maximaux que nous avons obtenus sont tous inférieurs à 20 kV/cm, soit une diminution supérieure à 82,90% par rapport au câble sans méthode de contrôle du champ électrique. A partir de $\epsilon_r \geq 80$, la valeur du champ électrique maximal est pratiquement égale à 10 kV/cm, soit une diminution de 91,45%. Bien que que cette diminution est considérable, de telles valeurs excessives de permittivités relatives ne sont en aucun cas recommandées car elles peuvent engendrer des pertes diélectriques considérables, comme reporté par certains chercheurs à savoir Nikolajevic et al. [50-51], Nelson et Hervig [63], Eigner et Semino [56], roberts [52]. Ces mêmes chercheurs préconisent l'utilisation des permittivités relatives entre 30 et 40 environ.

Dans notre étude, nous avons choisi la valeur de $\epsilon_r = 40$ pour la configuration optimale de la couche additive afin d'éviter les pertes diélectriques qui peuvent être générées par les hautes permittivités. Pour cette permittivité relative, nous avons obtenu un champ maximal de 17,57 kV/cm. Ainsi, nous avons amélioré les résultats reportés par Nikolajevic et al. [50, 51] qui ont trouvé 21,6 kV/cm comme valeur minimale du champ maximal pour permittivité relative de $\epsilon_r = 40$ pour une épaisseur $e_c = 1$ mm. Notons que dans leurs études, ces chercheurs ont pris une longueur fixe de la couche additive $L_c = 10$ cm.

En effet, la configuration optimale de la couche additive est caractérisée par une épaisseur $e_c = 1$ mm, une longueur $L_c = 15$ cm et une permittivité relative $\epsilon_r = 40$.

4.3 Méthode Géométrique Traditionnelle

La deuxième méthode de contrôle capacitive du champ électrique présentée dans ce chapitre est la méthode géométrique. Cette méthode est traditionnelle. Elle consiste à appliquer, au niveau de la terminaison du câble, un cône solide diélectrique, généralement en caoutchouc de silicone. Relatif aux des dimensions géométriques du cône, nous nous sommes inspirés des travaux réalisés par Metwally et al. [67]. En effet, nous avons adopté un cône caractérisé par ces chercheurs. Celui-ci est caractérisé par un rayon R_g , un angle de départ β formé avec l'axe z et une longueur fixe L_g . Par ailleurs, la permittivité relative du cône est ϵ_r . La méthode géométrique traditionnelle exige que l'écran mis à la terre soit prolongé jusqu'à couvrir l'apothème du cône [1]. Ainsi, cet écran est coupé à $z = 0,78$ m. Dans ces conditions, le point de discontinuité coïncide avec le sommet du cône. Conformément à cette méthode géométrique, la terminaison du câble ainsi que ses dimensions géométriques sont illustrées sur la figure 4.10.

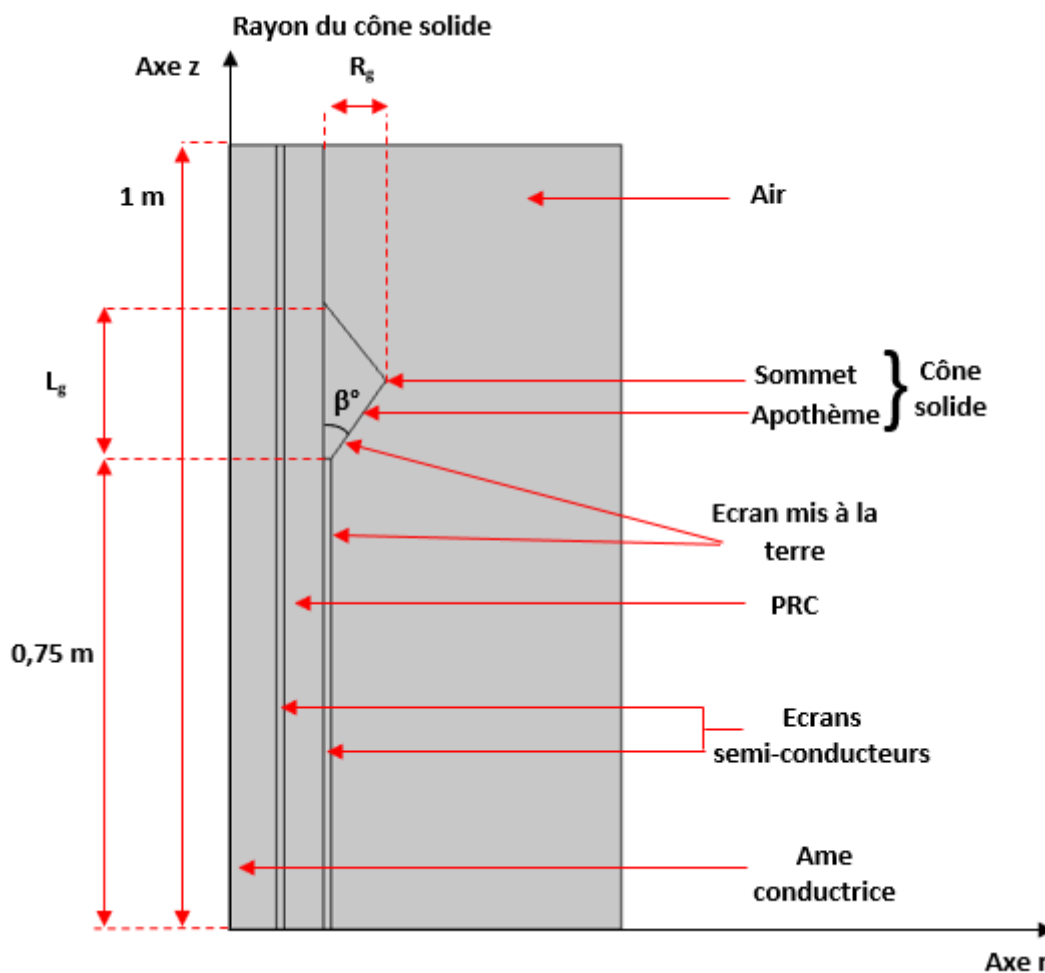


Figure 4.10 – Géométrie de la terminaison du câble

Dans les méthodes géométriques, les cônes sont en caoutchouc de silicone d'une constante diélectrique variant entre 2,7 et 10 [68]. La permittivité relative du cône que nous avons adoptée est supposée constante, le long de cette partie, et vaut $\epsilon_r = 7$. De même, nous avons fixé la longueur du cône solide $L_g = 6$ cm. Cependant, nous avons varié le rayon R_g du cône. Les valeurs ainsi adoptées sont 7,17 mm, 12,17 mm, 17,17 mm et 22,17 mm. Il

est évident que la variation du rayon affecte l'angle de départ. Pour les valeurs du rayon adoptées, l'angle de départ β vaut 13° , 22° , 30° et 36° respectivement. Les simulations du câble de 20 kV isolé au PRC avec la méthode géométrique traditionnelle ont été faites pour toutes les configurations géométriques susmentionnées.

4.3.1 Distribution du Potentiel

La distribution surfacique du potentiel, les lignes des équipotentielles ainsi que la variation du potentiel tout au long de la surface extérieure du câble sont présentées respectivement sur les figures 4.11 à 4.13, pour un rayon du cône de $R_g = 17.17$ mm. Ce rayon correspond à un angle de départ $\beta = 30^\circ$ formé avec l'axe z .

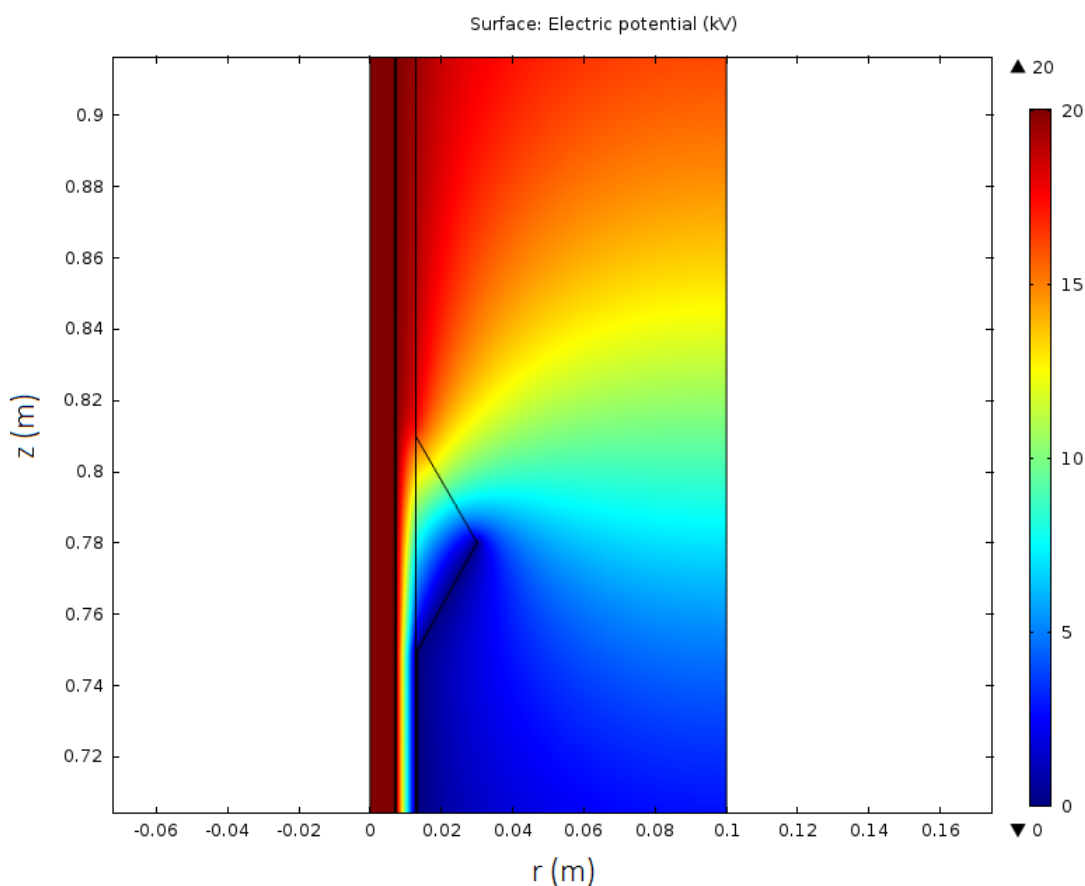


Figure 4.11 – Distribution surfacique du potentiel lors de l'application de la méthode géométrique traditionnelle

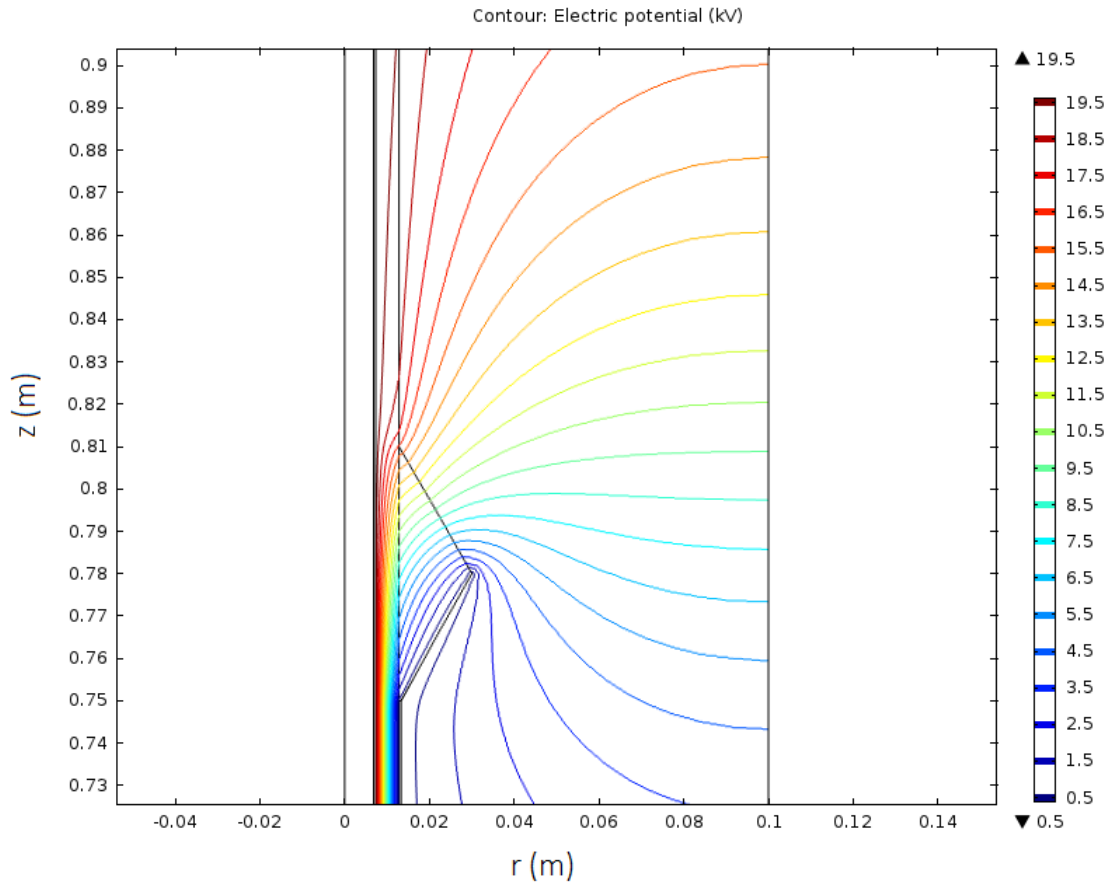


Figure 4.12 – Distribution des lignes équipotielles lors de l'application de la méthode géométrique traditionnelle

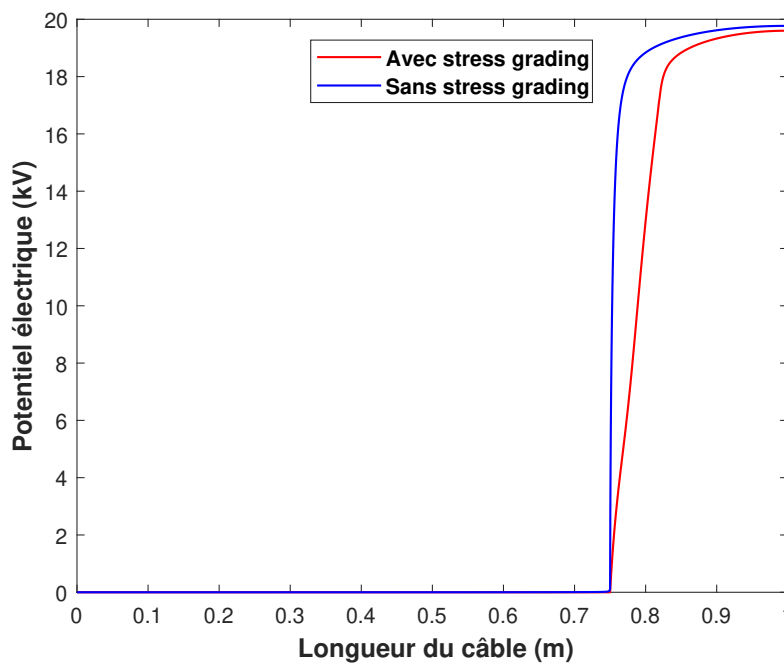


Figure 4.13 – Variation du potentiel électrique le long de la longueur de la surface extérieur du câble avant et après l'application de la méthode géométrique traditionnelle

Relativement aux résultats illustrés sur la figure 3.7 et 3.8 obtenus en absence de toute méthode de contrôle du champ, les figures 4.11 et 4.12 montrent clairement que les potentiels sont très espacés les uns des autres. Nous pouvons remarquer que les hauts potentiels sont situés du côté de l'âme conductrice et les faibles potentiels à proximité du point de discontinuité consistant en le sommet du cône. Il ressort de cette constatation que l'application de la méthode géométrique traditionnelle permet une meilleure distribution des lignes équipotentiels le long de la surface extérieure du câble. En effet, le prolongement de l'écran sur l'apothème du cône isolant ainsi que la forme géométrique de celui-ci renforcent l'isolation du câble en fournissant une isolation supplémentaire à la terminaison de câble, offrant ainsi une large surface de répartition aux lignes équipotentiels. Cependant, une concentration des lignes équipotentiels a été observée au niveau du sommet de cône (point de discontinuité de l'écran). Il s'agit d'un d'inconvénient parmi d'autres de cette méthode traditionnelle.

D'après la figure 4.13 présentant l'évolution du potentiel le long de la longueur de la surface extérieure du câble, montre que l'application de la méthode géométrique traditionnelle engendre une diminution remarquable du gradient de potentiel. Par exemple, au point $z = 0,7556$ m, le potentiel a diminué de 13,24 kV à 2,04 kV, soit une réduction de 84,59%. Ceci est évident puisque cette diminution est due à l'espacement des lignes équipotentiels engendrée par ce cône.

4.3.2 Distribution du Champ Electrique

Après avoir vu l'effet de la méthode géométrique traditionnelle sur la distribution du potentiel électrique, nous intéressons maintenant à l'efficacité de cette méthode sur la distribution du champ électrique. Pour ce faire, nous avons déterminé la distribution du champ électrique en tout point du câble, la variation du champ électrique tout au long de la longueur de la surface extérieure du câble et la distribution du champ électrique au niveau du sommet de cône. Les résultats ainsi obtenus sont présentés respectivement sur les figures 4.14, 4.15 et 4.16.

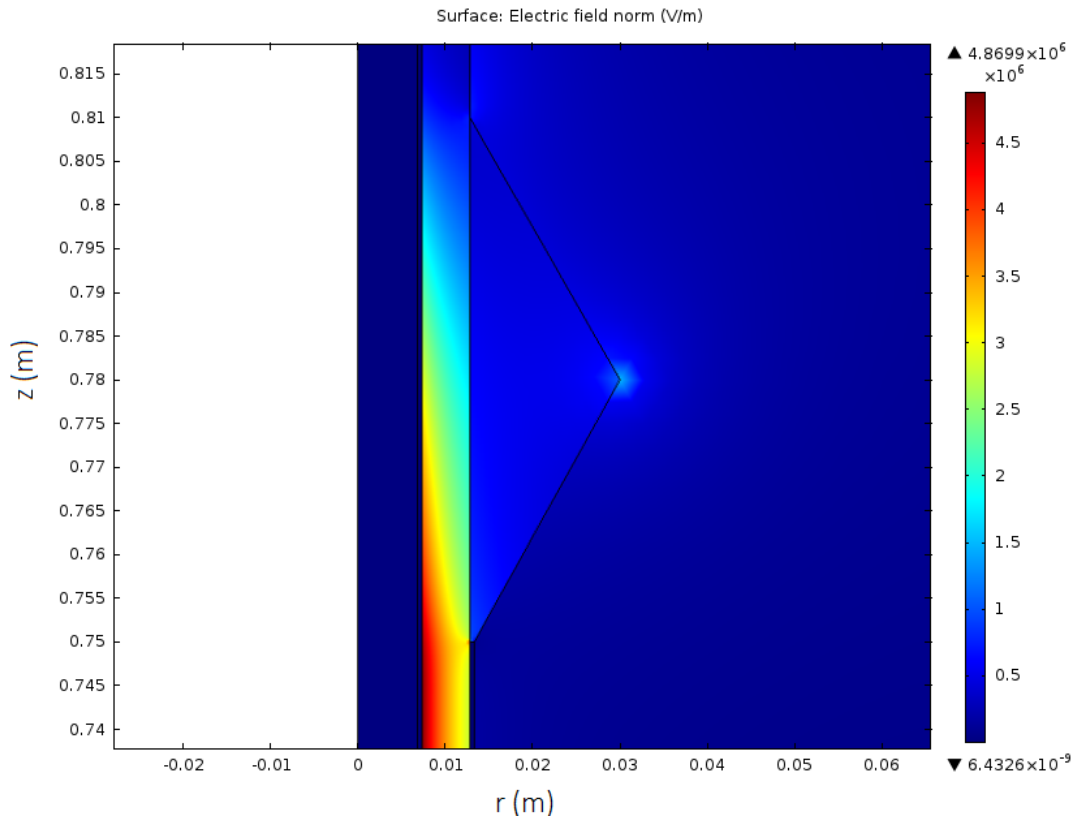


Figure 4.14 – Distribution surfacique du champ électrique lors de l'application de la méthode géométrique traditionnelle

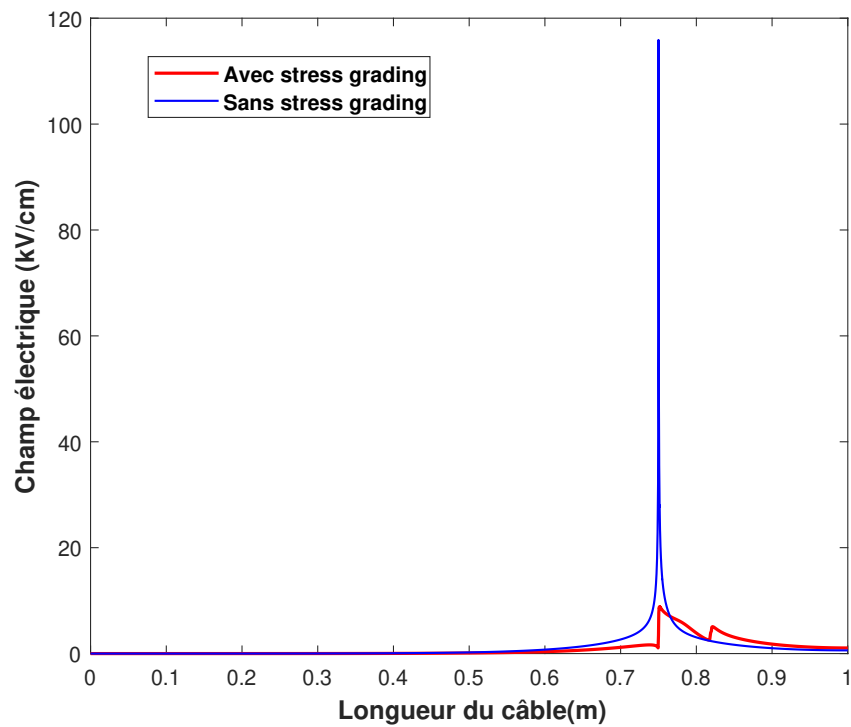


Figure 4.15 – Variation du champ électrique le long de la longueur de la surface extérieure du câble avant et après l'application de la méthode géométrique traditionnelle

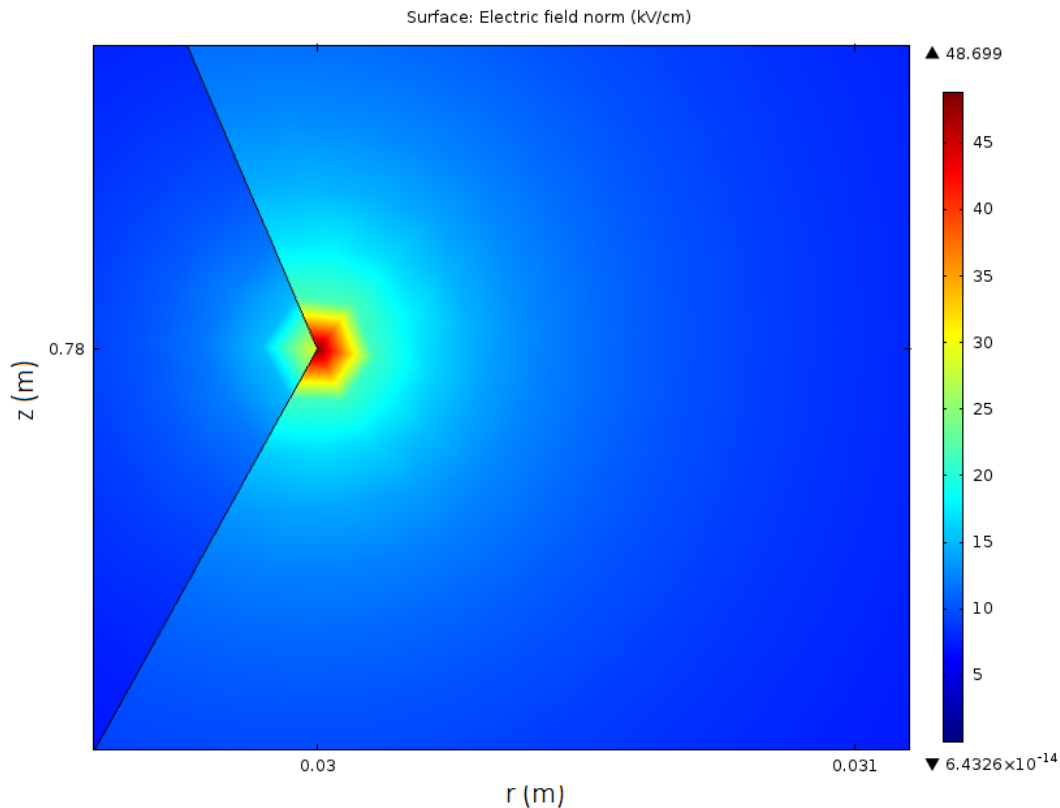


Figure 4.16 – Distribution surfacique du champ électrique au niveau du sommet du cône

La figure 4.14 montre une distribution uniforme, suivant l'axe z , du champ électrique dans la partie non dénudée du câble ($0 \leq z < 0,75$ m). Cependant, suivant l'axe r , le champ électrique présente seulement une composante radiale. Ce champ diminue d'une valeur maximale de 48,5 kV/cm enregistrée à proximité de l'âme conductrice à une valeur minimale de 29 kV/cm trouvée du côté de l'écran mis à la terre. Ces variations du champ électrique sont similaires comparées à celles obtenues sans méthodes de contrôle du champ (Figure 3.10). Ceci est dû au fait que la géométrie et les matériaux de la portion étudiée du câble n'ont subi aucun changement. Par ailleurs, au point de la coupure de l'écran $z = 0,75$ m, le champ à la surface du câble diminue remarquablement comme illustré sur figure 4.15. En effet, le champ électrique a diminué d'une valeur de 117 kV/cm à 8,86 kV/cm après l'application du cône, soit une réduction de 92,42%. Cette diminution est due au changement de la géométrie de l'électrode de terre qui offre une distance âme conductrice-écran plus importante ainsi qu'à l'augmentation de la surface du diélectrique en dessous de l'écran mis à la terre, ce qui donne une plus grande surface de répartition de champ électrique. Cependant, un pic de champ électrique d'amplitude de 5,09 kV/cm a été enregistré en $z = 0,81$ m (là où le cône se termine).

Les figures 4.17 et 4.18 présentent respectivement les variations des composantes radiale et tangentielle le long de la longueur de la surface extérieur du câble.

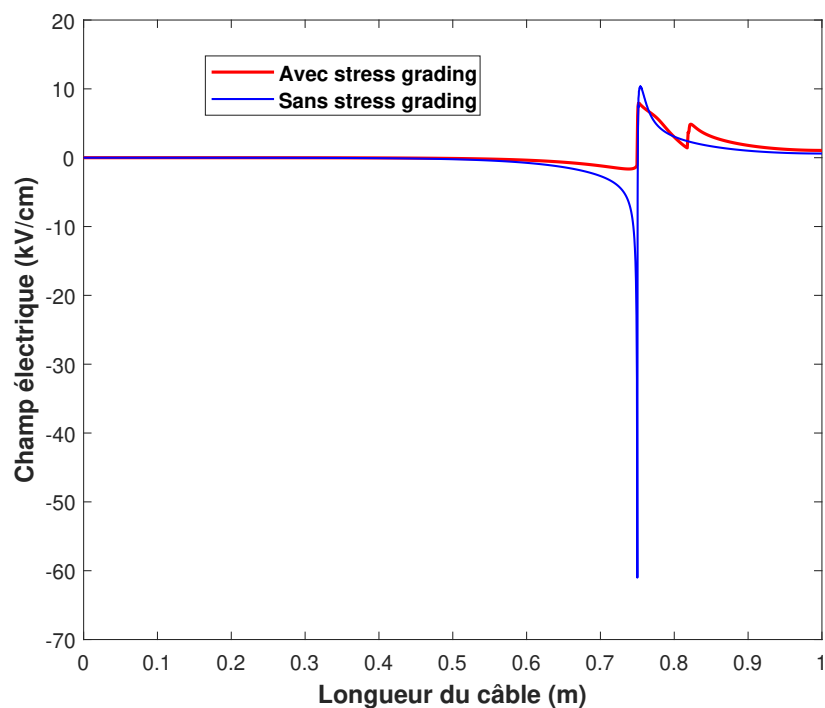


Figure 4.17 – Variation de la composante radiale du champ électrique le long de la longueur de la surface extérieure du câble avant et après l'application de la méthode géométrique traditionnelle

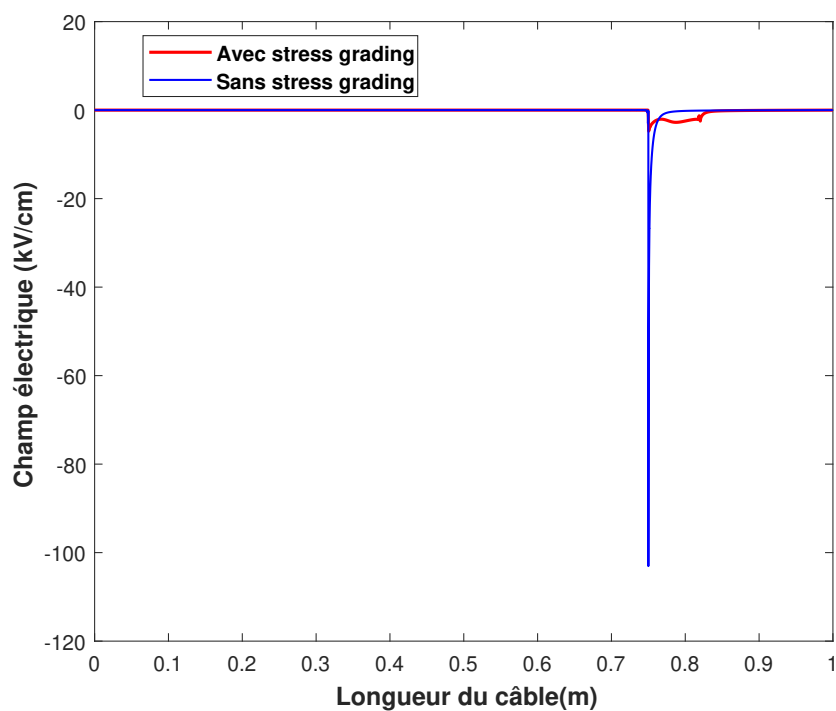


Figure 4.18 – Variation de la composante tangentielle du champ électrique le long de la longueur de la surface extérieure du câble avant et après l'application de la méthode géométrique traditionnelle

A partir de la figure 4.17, nous observons, suite à l'application de la méthode géométrique traditionnelle, une diminution de l'intensité du champ électrique de 61,01 kV/cm à 1,64 kV/cm (correspondant à une réduction de 97,31%) et de 10,34 kV/cm à 7,68 kV/cm (soit une diminution de 25,72%) pour le premier et le deuxième pic de la composante radiale, respectivement. Nous remarquons aussi une création d'un nouveau pic de 4,86 kV/cm pour la composante radiale en $z = 0,81$ m (là où le cône se termine). De même pour la composante tangentielle (Figure 4.18) dont l'intensité maximale diminue de 103 kV/cm à 4,75 kV/cm qui correspond à 95,38% de réduction lors de l'application de la méthode géométrique traditionnelle. Cette intensité maximale de 4,75 kV/cm diminue progressivement en s'éloignant du point $z = 0,75$ m, jusqu'à s'annuler en $z = 0,81$ m (où le cône se termine).

Les résultats obtenus de la distribution du champ électrique dans le câble montrent l'efficacité de la méthode géométrique traditionnelle dans la réduction du champ électrique sur surface du câble. Cependant, une concentration du champ électrique apparaît au niveau du sommet du cône, comme le montre la figure 4.16. La valeur du champ électrique en ce point est élevée puisqu'elle atteint une intensité de 48 kV/cm. Cette intensité est due principalement à la discontinuité de l'écran en ce point, qui engendre une concentration des lignes équipotentielles comme illustré sur la figure 4.12.

4.3.3 Effet du rayon R_g du cône

Dans cette partie, nous nous sommes intéressés aux évolutions du champ électrique en fonction du rayon du cône aussi bien le long de la longueur de la surface extérieure du câble, qu'au sommet du cône. Les valeurs adoptées sont 7,17 mm, 12,17 mm, 17,17 mm et 22,17 mm. Les valeurs respectives de l'angle de départ β consistent en 13° , 22° , 30° et 36° . Les résultats obtenus quant aux variations du champ électrique, le long de la longueur de la surface extérieure du câble et au sommet du cône sont illustrés sur les figures 4.19 et 4.20, respectivement.

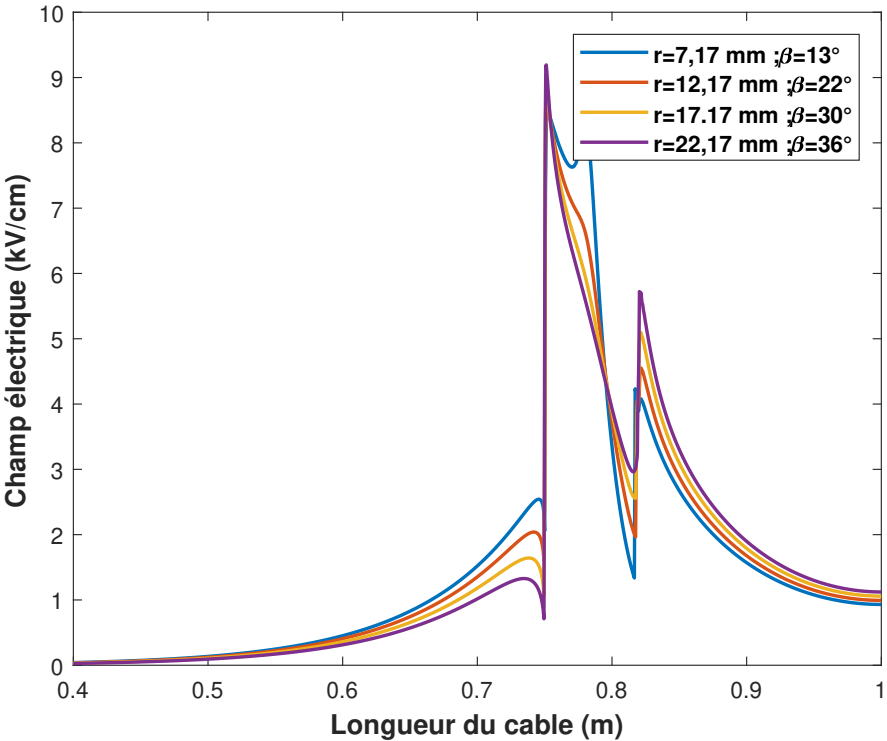


Figure 4.19 – Variation du champ électrique le long de la longueur de la surface extérieure du câble pour différents rayons R_g

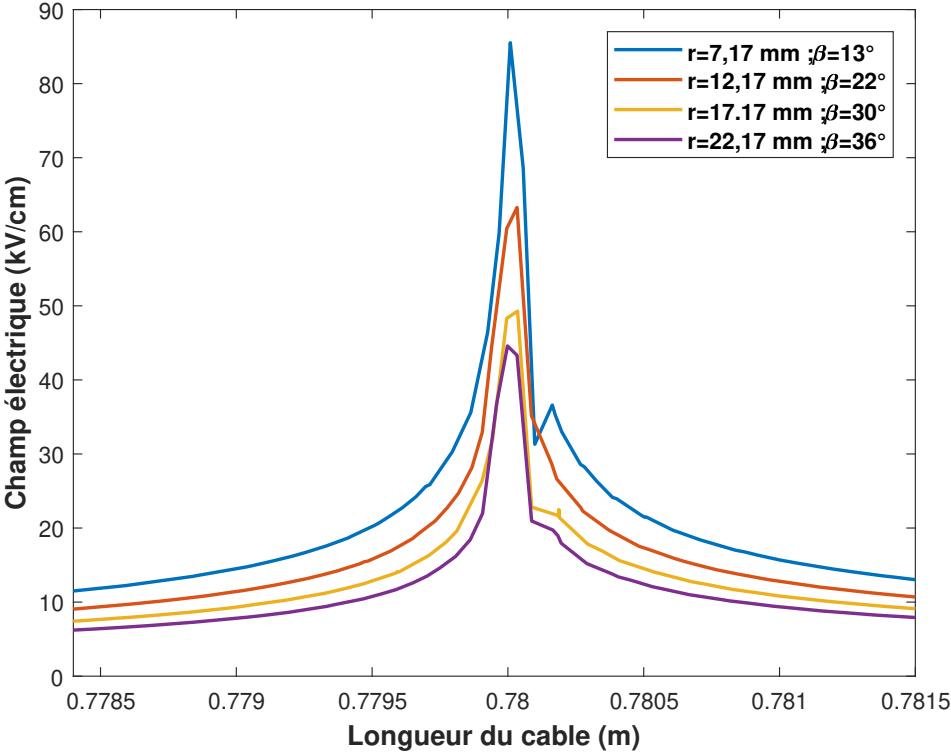


Figure 4.20 – Variation du champ électrique au sommet du cône pour différents rayons R_g

De la figure 4.19, nous remarquons le champ maximal est pratiquement constant et égal à 9 kV/cm et ce pour tous les rayons adoptés. En effet, dans les limites des valeurs sélectionnées, le rayon R_g du cône, et donc l'angle de départ β , n'ont pratiquement aucune influence sur le champ électrique maximal le long de la longueur de la surface extérieure du câble. Il est à noter que lors de l'utilisation d'un rayon de 7,17 mm, nous avons enregistré un deuxième pic d'amplitude 8,26 kV/cm observé en $z = 0,78$ m.

Relatif à la variation du champ au sommet du cône en $z = 0,78$ m, la figure 4.20 montre que l'augmentation du rayons R_g (et donc de l'angle β) engendre une diminution considérable du champ électrique maximal. A titre d'exemple, pour un rayon $R_g = 7,17$ mm ($\beta = 13^\circ$) correspondant à la plus faible valeur adoptée, une valeur excessive du champ électrique maximal de l'ordre de 85,53 kV/cm est observée. Cette dernière diminue en augmentant le rayon du cône jusqu'à atteindre une valeur de 44,58 kV/cm. Cependant, pour des raisons de conception des accessoires de raccordement et les dimensions du cône qui sont limitées, nous nous pouvons augmenter le rayon du cône indéfiniment. Par voie de conséquence, la concentration du champ électrique au niveau du sommet de cône ne peut être éliminer en augmentant le rayon du cône. De ce fait, nous proposons d'envisager l'alternative suivante.

4.4 Méthode Géométrique avec Déflecteur

Le renforcement du champ électrique observé précédemment au niveau du sommet du cône, à cause de l'effet de pointe de l'écran déposé sur l'apothème du cône, incite les chercheurs à développer d'autres alternatives géométriques. Pour ce faire, certains chercheurs ont envisagé de modifier la forme et l'emplacement de l'écran mis à la terre, permettant ainsi de minimiser le champ électrique au niveau de la discontinuité de l'écran. Il s'agit, entre autres, d'utiliser un écran de terre spécifique appelé déflecteur [1, 48, 56]. Ce dernier est conçu à base de semi-conducteur [48]. Notons qu'il n'y a pas de normes ou techniques qui précisent la forme et les dimensions du déflecteur. Par contre, il est recommandé d'allonger l'écran de terre suivant une allure logarithmique et un angle de départ proche de zéro degré [3].

En adoptant une telle alternative, notre nouvelle géométrie est donc constituée d'un déflecteur à l'intérieur du cône diélectrique solide. Le cône supposé dans cette section possède une permittivité relative $\epsilon_r = 7$, un rayon $R_g = 12,17$ mm, une longueur $L_g = 6$ cm et un angle de départ $\beta = 22^\circ$ avec l'axe z. Les paramètres électro-géométrique du cône sont maintenus fixes le long de toutes les simulations développées. Quant au déflecteur, sa permittivité relative $\epsilon_r = 1000$ et un angle de départ $1,72^\circ$. Les géométries ainsi que les dimensions du déflecteur sont présentées sur la figure 4.21. Les paramètres géométriques du déflecteur ont été inspirés d'autres travaux de recherche [58, 67]. Les géométries ainsi que les dimensions de la terminaison du câble contenant le déflecteur sont illustrées sur la figure 4.22.

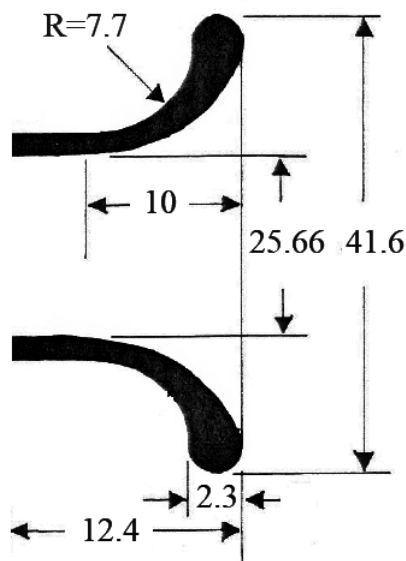


Figure 4.21 – Géométrie et dimensions (en mm) du déflecteur

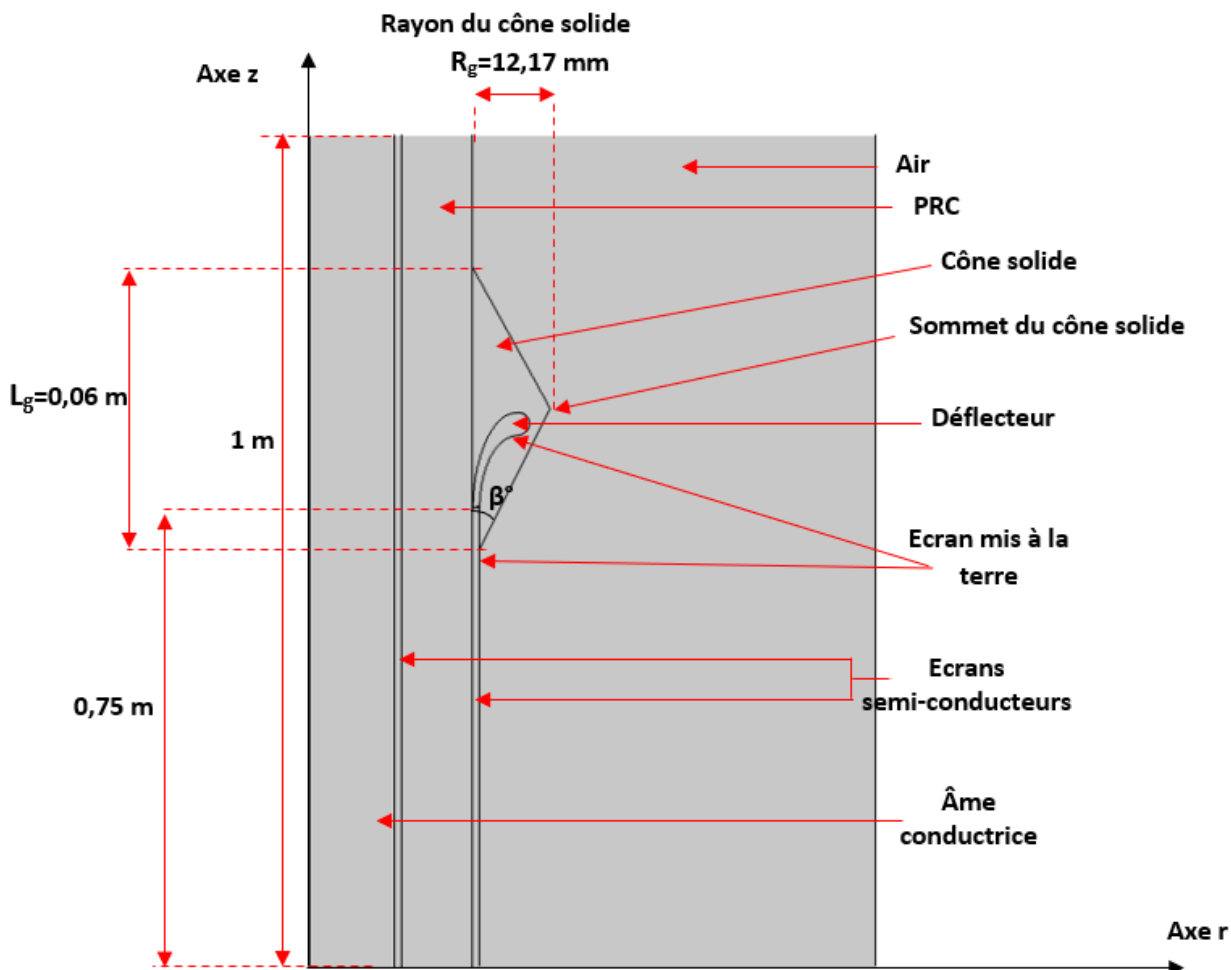


Figure 4.22 – Géométries et dimensions de la terminaison du câble contenant le déflecteur

4.4.1 Distribution du potentiel

Dans le but d'analyser l'effet du déflecteur sur le potentiel électrique, une simulation sous environnement COMSOL a été effectuée sur la terminaison notre câble de 20 kV isolé au PRC.

Les résultats relatifs à la distribution du potentiel, les lignes équipotentielles et la variation du potentiel tout au long de la longueur de la surface extérieure du câble, obtenus lors de cette simulation, sont présentés sur les figures 4.23, 4.24 et 4.25 respectivement.

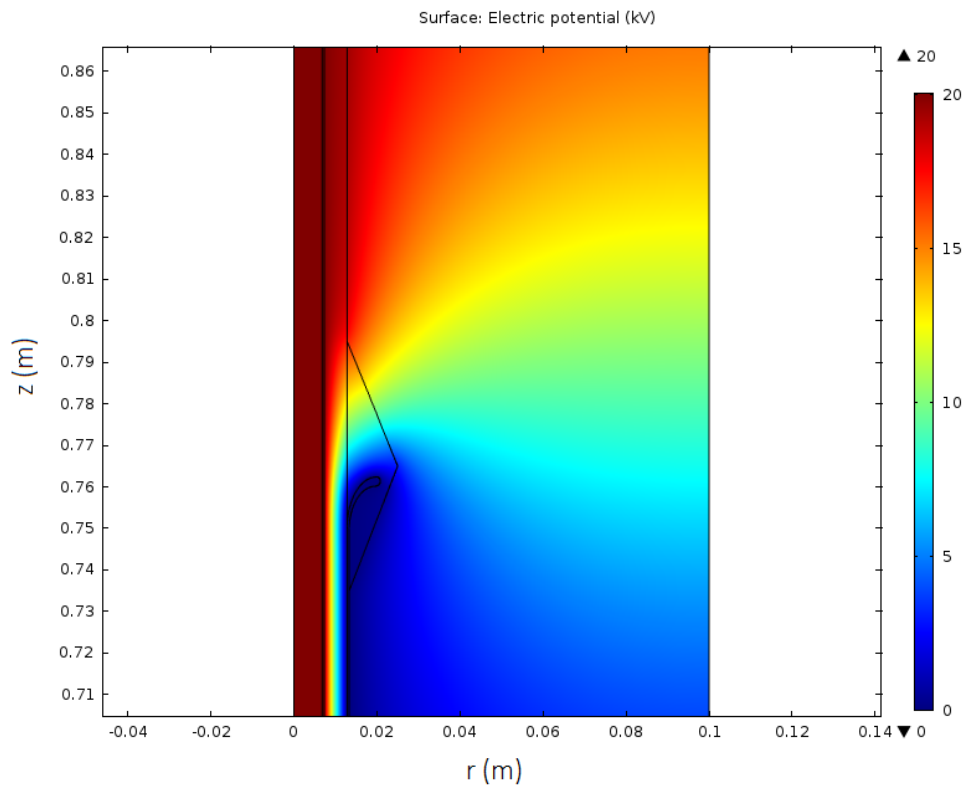


Figure 4.23 – Distribution surfacique de potentiel lors de l'application de la méthode de contrôle géométrique avec déflecteur

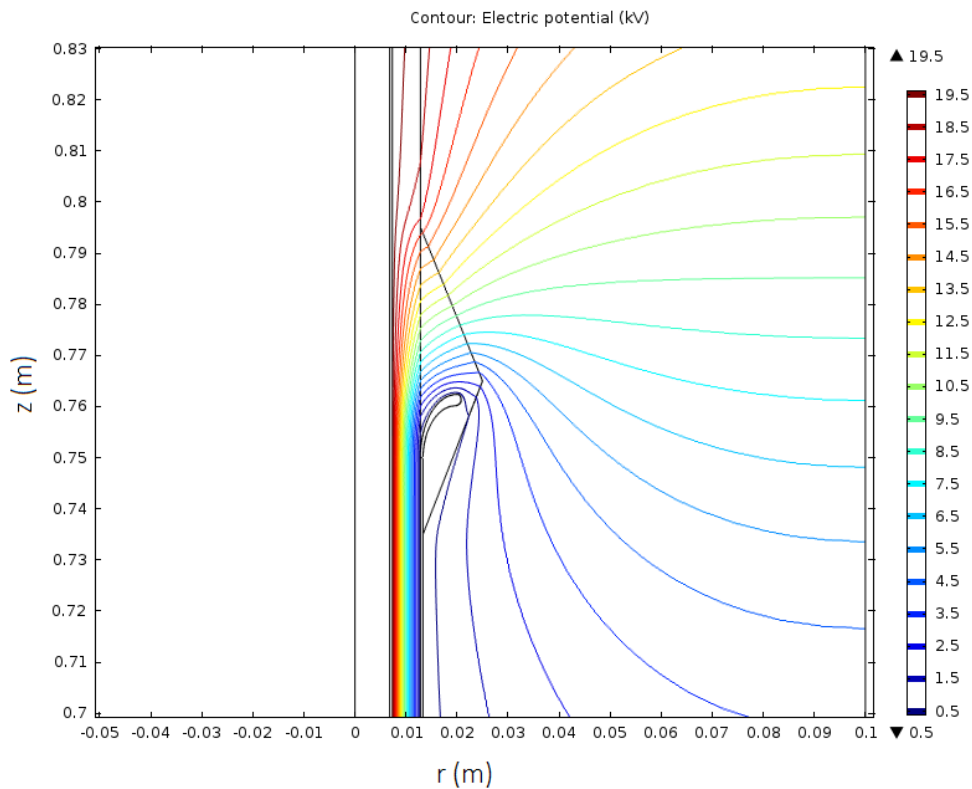


Figure 4.24 – Distribution des lignes équipotentielles lors de l'application de la méthode de contrôle géométrique avec déflecteur

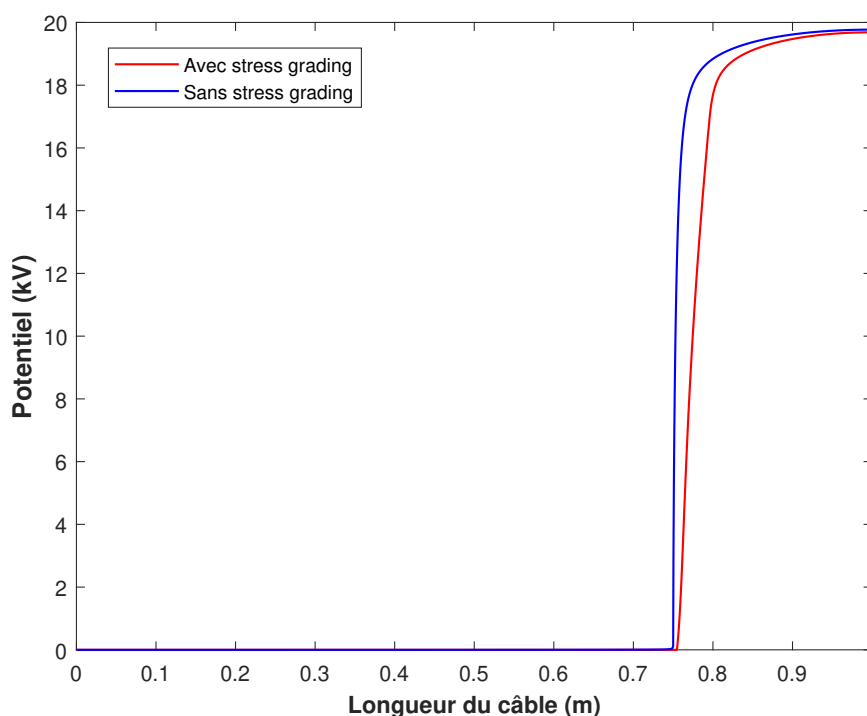


Figure 4.25 – Variation du potentiel électrique le long de la longueur de la surface extérieure du câble avant et après l’application de la méthode géométrique avec déflecteur

Les figures 4.23 et 4.24 montrent clairement que les potentiels et les lignes équipotentielles sont plus espacés après l’application de la méthode géométrique avec déflecteur comparés aux mêmes distributions (Figures 3.7 et 3.8, respectivement) enregistrées en absence de toute méthode de contrôle de champ. La combinaison du déflecteur et de l’isolation supplémentaire assurée par le cône solide, donne une plus grande surface de répartition des lignes équipotentielles. Nous constatons aussi que les lignes équipotentielles suivent la forme du déflecteur, ce qui permet d’éviter la concentration de ces lignes au niveau du sommet de cône.

De la figure 4.25, nous remarquons que le gradient de potentiel a subi une diminution considérable après l’application de la méthode géométrique avec déflecteur. Par exemple, le potentiel décroît de 14,71 kV à 1,04 kV au point $z = 0,7578$ m, soit une diminution de 82,90%, évidemment après l’application de cette méthode de contrôle.

4.4.2 Distribution du Champ électrique

Afin d’analyser l’effet du déflecteur sur le champ électrique au niveau de la terminaison du câble de 20 kV, précisément à la surface du câble et au niveau du sommet du cône solide, une simulation, sous environnement COMSOL, a été effectuée en vue de déterminer la distribution en 2D et en 3D du champ électrique en tout point du câble. La première (respectivement la deuxième) distribution en 2D (respectivement en 3D) est illustrée sur la figure 4.26 (respectivement la figure 4.27). Finalement, la figure 4.28 présente l’évolution du champ électrique tout au long de la longueur de la surface extérieure du câble.

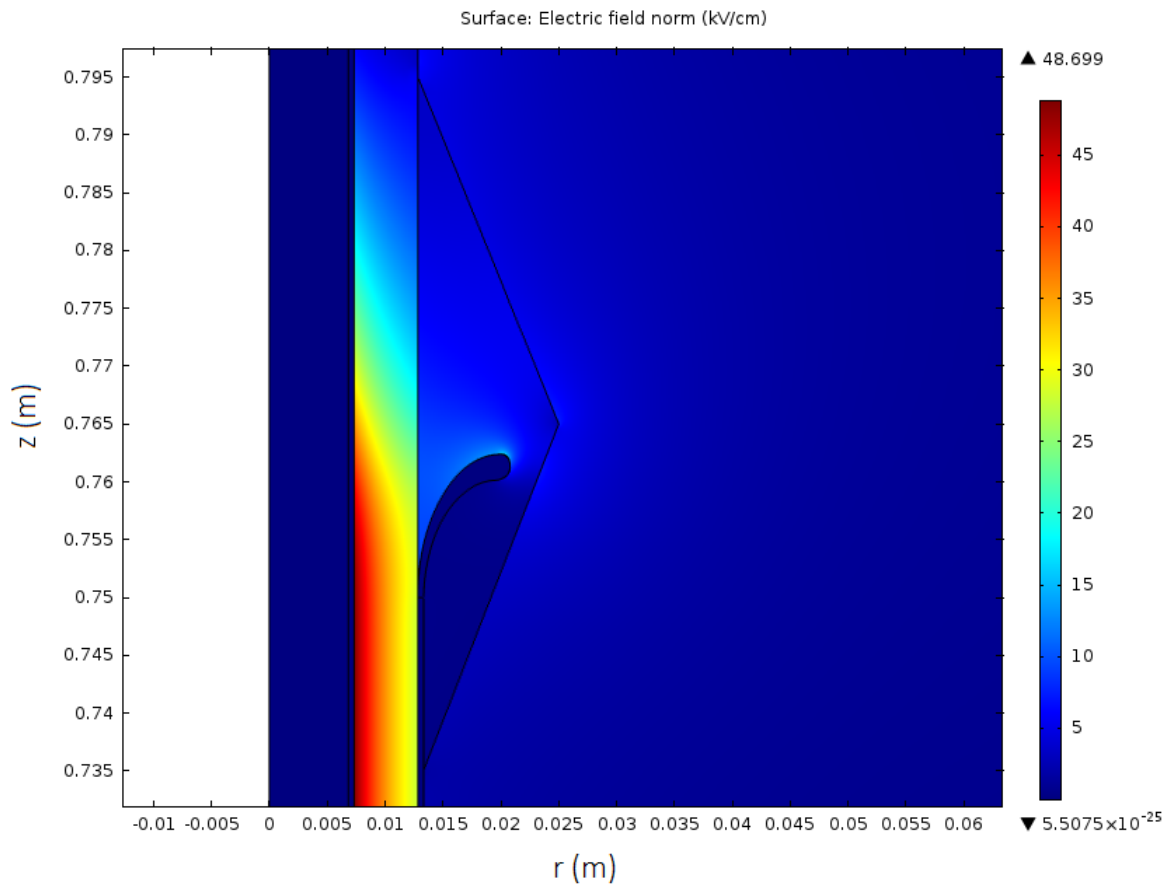


Figure 4.26 – Distribution surfacique du champ électrique lors de l'application de la méthode géométrique avec déflecteur

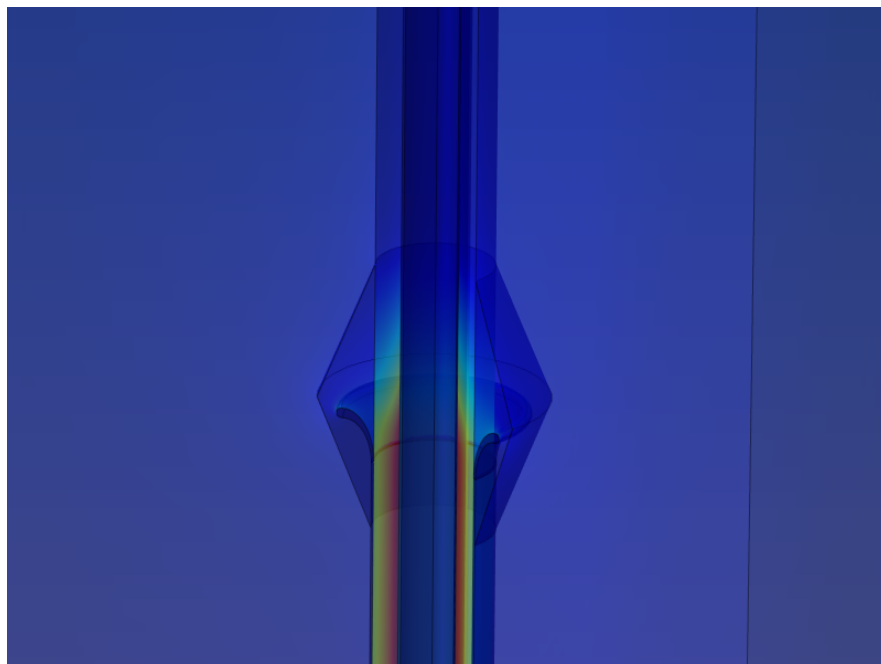


Figure 4.27 – Distribution du champ électrique en 3D lors de l'application de la méthode géométrique avec déflecteur

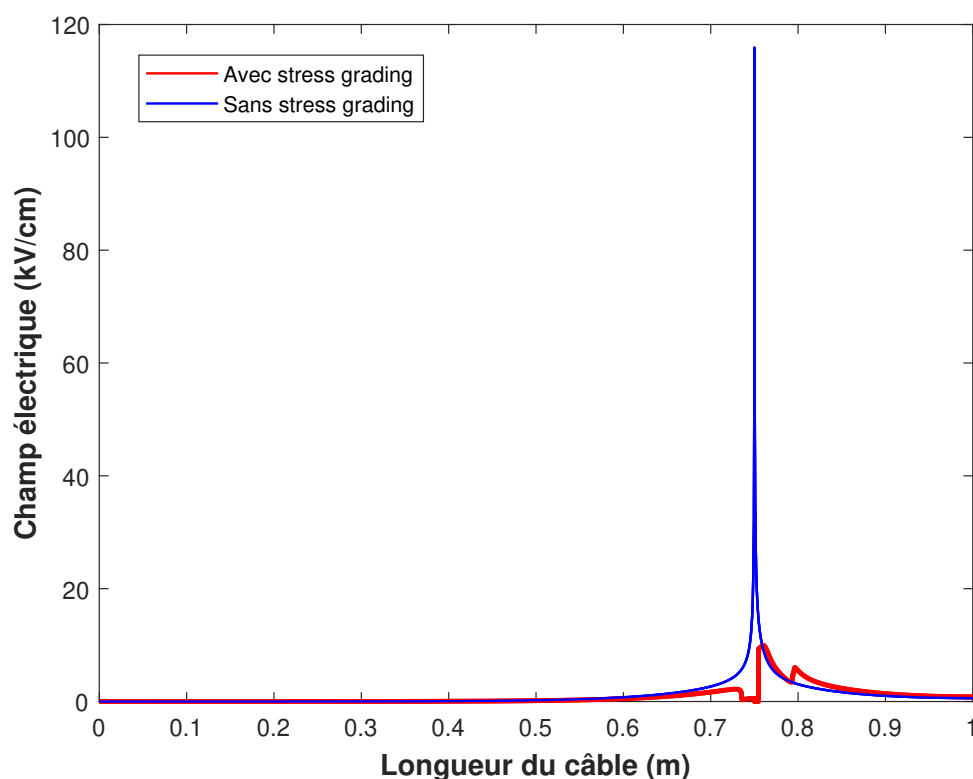


Figure 4.28 – Variation du champ électrique le long de la longueur la surface extérieure du câble avant et après l'application de la méthode géométrique avec déflecteur

Nous remarquons, des figures 4.26 et 4.27, une diminution considérable du champ électrique au niveau de la surface du câble. Par ailleurs, nous constatons une légère concentration du champ électrique d'environ 9 kV/cm au niveau de la surface du déflecteur.

De la figure 4.28, une énorme diminution de 117 kV/cm à 9,95 kV/cm soit 91,49% après l'application de cette méthode de contrôle du champ. De plus, un nouveau pic de champ électrique d'intensité de 6,06 kV/cm est enregistré à $z = 0,795$ m. Ce point représente, en fait, la terminaison du cône solide. Cette diminution du champ électrique en module au niveau de la terminaison est due à la fois, à la forme géométrique de l'écran de terre et l'isolation supplémentaire assurée par le cône solide. La décroissance du module du champ électrique est due au fait à l'atténuation simultanée des composantes tangentielle et radiale du champ électrique le long de la longueur de la surface extérieure du câble, comme illustré respectivement sur les figures 4.30 et 4.31.

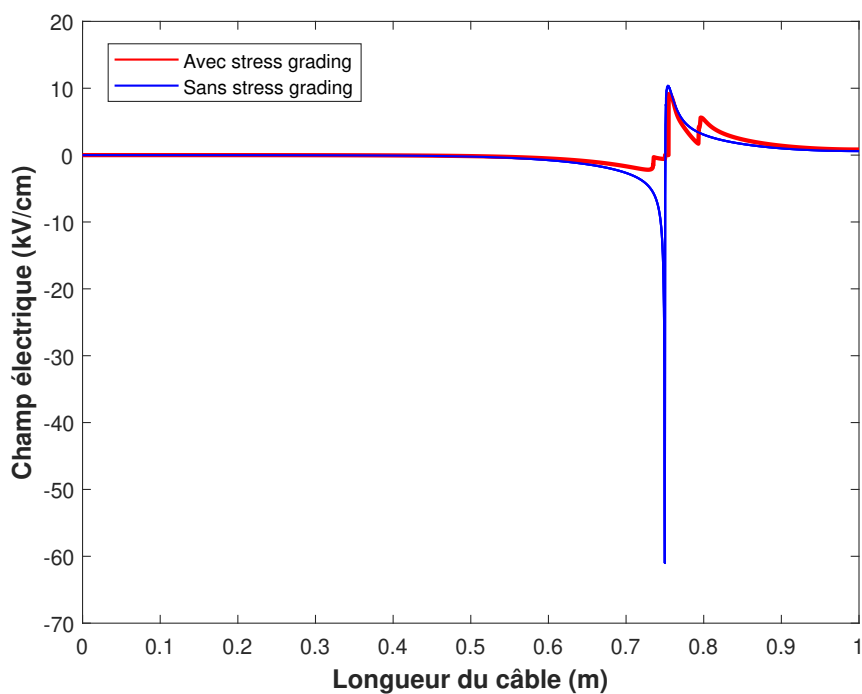


Figure 4.29 – Variation de la composante radiale du champ électrique le long de la longueur la surface extérieure du câble avant et après l'application de la méthode géométrique avec déflecteur

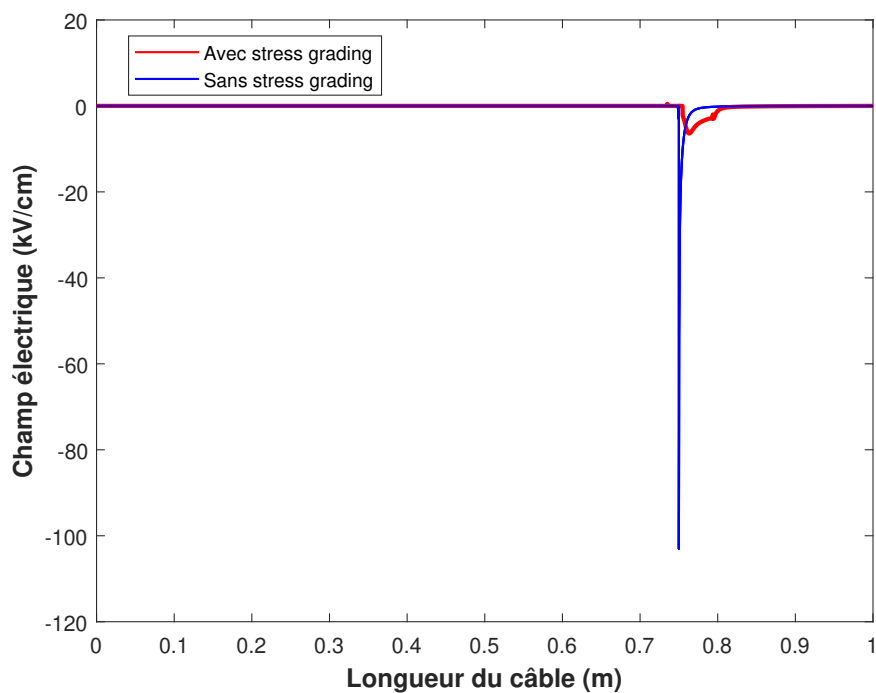


Figure 4.30 – Variation de la composante tangentielle du champ électrique le long de la longueur la surface extérieure du câble avant et après l'application de la méthode géométrique avec déflecteur

Suite à application de la méthode géométrique avec déflecteur, nous remarquons, d'après les figures 4.29 et 4.30, une diminution considérable des deux composantes du champ électrique à savoir radiale et tangentielle. Par ailleurs, le premier pic de la composante radiale, dont la variation est montrée sur la figure 4.29, a été pratiquement éliminé. Le champ radial en ce point a fortement diminué de 61 kV/cm à 0,55 kV/cm, ce qui correspond une décroissance de 99,9%. Par contre, le deuxième pic a subi une légère diminution de 11,53%, soit de 10,32 kV/cm à 9,13 kV/cm. Cependant, un nouveau pic de 5,65 kV/cm prend naissance au point où le cône se termine, soit en $z = 0,795$ m.

De la figure 4.30, nous pouvons remarquer une très grande diminution de la composante tangentielle du champ électrique. Le pic observé a été significativement atténué de 103 kV/cm à 6,4 kV/cm, évidemment après application de la méthode géométrique avec déflecteur. Cette valeur maximale de 6,4 kV/cm diminue progressivement jusqu'à atteindre une valeur pratiquement nulle au point $z = 0,795$ m (là où le cône se termine).

Quant aux résultats du champ électrique au niveau du sommet du cône solide, nous remarquons, d'après les figures 4.26 et 4.27, que le déflecteur permet d'éliminer le problème de concentration du champ électrique au niveau ce sommet déjà observé précédemment sur les figures 4.14 et 4.16.

Afin d'analyser l'effet de la géométrie de l'écran mis à la terre, nous illustrons, sur la figure 4.31, les variations du champ électrique au sommet du cône solide pour deux situations : écran située sur apothème du cône solide (méthode géométrique traditionnelle) et écran sous forme de déflecteur (méthode géométrique avec déflecteur). La figure 4.31 présente, en fait, des caractéristiques permettant de comparer les évolutions du champ électrique au sommet du cône solide obtenues lors de l'application des deux méthodes géométriques susmentionnées, et ce pour différents rayons (et donc angles de départ) du cône solide.

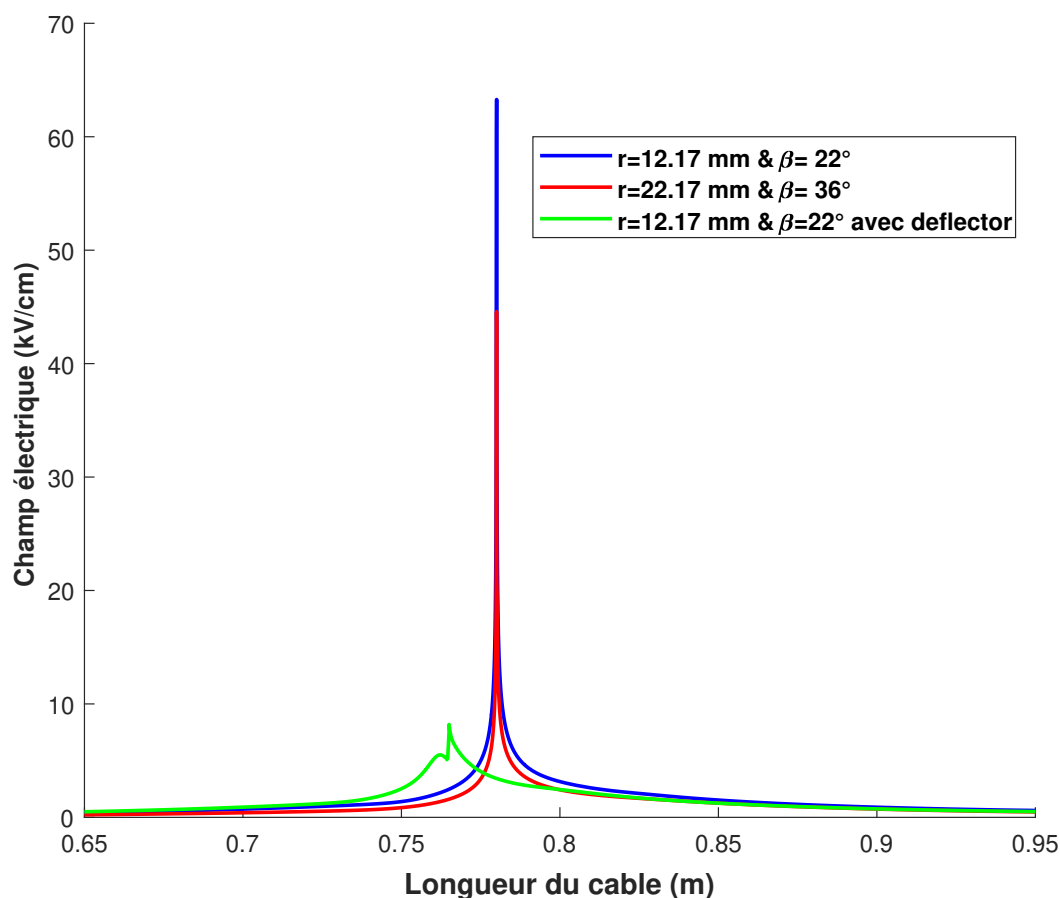


Figure 4.31 – Champ électrique au sommet du cône lors de l'application des deux méthodes géométriques, pour différents rayons du cône

L'utilisation d'un écran de terre sous forme de déflecteur permet de réduire considérablement le champ électrique au niveau du sommet du cône diélectrique solide. Nous remarquons que, pour le même rayon $R_g = 12,17$ mm (et donc le même angle $\beta = 22^\circ$) du cône solide avec et sans déflecteur (méthode traditionnelle), le champ décroît de 63,82 kV/cm à 8,19 kV/cm, soit une diminution de 87,16% après l'insertion du déflecteur.

A titre d'exemple, l'insertion d'un déflecteur dans un cône solide de rayon $R_g = 12,17$ mm (et donc d'angle $\beta = 22^\circ$) permet une réduction de 81,63% du champ maximal enregistré lors de l'utilisation d'un cône sans déflecteur (méthode traditionnelle) avec un rayon relativement important de 22,17 mm (et donc d'un angle $\beta = 36^\circ$). Ainsi, l'utilisation d'un déflecteur permet de diminuer le volume du cône solide. Il s'agit d'un avantage parmi d'autres de la deuxième méthode géométrique faisant intervenir un déflecteur. Ce dernier améliore la répartition du champ électrique en réduisant la concentration du champ électrique au sommet du cône solide.

4.5 Comparaison entre les méthodes de contrôle géométrique et par réfraction

A travers toute cette étude, nous constatons que les méthodes capacitatives de contrôle géométriques et par réfraction sont capables non seulement de réduire le champ électrique mais aussi d'uniformiser sa distribution. Ainsi, chaque méthode présente ses propres avantages et inconvénients. Le choix de la méthode de contrôle du champ électrique est conditionné par plusieurs paramètres. Nous citons, entre autres, la réduction du champ électrique, la distribution du potentiel, la valeur des permittivités relatives du cône des méthodes géométriques et de la couche additive assurant la réfraction du champ, le volume de la couche additive ou du cône solide, le coût d'installation (de la couche de haute permittivité, le cône, le déflecteur, ...), etc. Une comparaison entre ces méthodes capacitatives (géométriques et par réfraction) est présentée dans le tableau 4.2 récapitulatif.

Table 4.2 – Tableau comparatif entre les deux méthodes de contrôle du champ électrique géométrique et par réfraction

Méthode de contrôle		Géométrique	Réfraction
Champ électrique	Surface du câble	Très bonne réduction	Bonne réduction
	Sommet du cône	Concentration importante du champ électrique nécessitant l'utilisation d'un écran déflecteur	
Lignes équipotentielles		Bien espacées et suivent la géométrie de l'écran de terre	Bien espacées réparties tout au long de la surface de la couche de haute permittivité
Permittivité relative		Du cône solide $2,7 \leq \epsilon_r \leq 10$	De la couche additive $10 \leq \epsilon_r \leq 40$
Coût d'installation		Relativement faible	Relativement élevé
Volume		Important	Réduit

NB. Bonne : réduction entre : 70% et 80% Très bonne : entre 80% et 90%

D'après les résultats obtenus, nous constatons que les deux méthodes de contrôle assurent une bonne distribution des lignes équipotentielles. Dans les méthode géométrique, ces lignes suivent la forme géométrique de l'écran mis à la terre. Dans la méthode par réfraction, cette distribution est assurée par la couche supplémentaire de haute permittivité.

Le champ électrique maximal initialement enregistré au niveau de la surface du câble est atténué d'une manière considérable lors l'application des deux méthodes du contrôle du champ électrique, à savoir géométrique et par réfraction. Ces deux méthodes permettent de réduire la concentration du champ au niveau de la surface du câble. Cependant, l'application de la méthode géométrique inflige une concentration du champ électrique au niveau du sommet de cône. Afin de réduire cette concentration, le changement de géométrie d'écran de terre est recommandé. D'où la proposition de la méthode géométrique avec écran déflecteur. L'efficacité de cette méthode est étroitement liée au

dimensionnement à la fois de l'écran déflecteur et du cône solide. Un dimensionnement géométrique et diélectrique adéquat pour la couche additive et le cône solide est nécessaire pour le bon fonctionnement de ces deux méthodes [51, 58, 67].

La permittivité relative est un paramètre important qui affecte l'efficacité de toute méthode capacitive. Outre de l'épaisseur et la longueur de la couche additive, la permittivité de celle-ci est nécessaire pour trouver la configuration optimale de cette couche lorsqu'il s'agit d'appliquer la méthode de contrôle par réfraction. L'augmentation d'une telle permittivité engendre la réduction du champ maximal au niveau de discontinuité de l'écran mis à la terre et l'augmentation des pertes diélectriques. Devant un tel compromis, le choix de la permittivité relative de la couche de haute permittivité est délicat car il s'agit d'assurer une meilleure réduction du champ électrique maximal avec moins de pertes diélectriques possibles. Il est recommandé donc de prendre une constante diélectrique entre 30 et 40. Par contre, dans le cas de la méthode de contrôle géométrique, le choix de la constante diélectrique demeure plus simple, car cette méthode est principalement basée sur la forme géométrique des électrodes. Généralement, dans les méthodes géométriques, les cônes sont en caoutchouc de silicone d'une constante diélectrique variant entre 2,7 et 10 [68].

Le coût de de la méthode géométrique s'avère plus faible que celui de la méthode de contrôle par réfraction et cela est dû à la complexité de la conception des matériaux de haute permittivité [65].

L'avantage de la méthode de contrôle par réfraction consiste en son volume relativement réduit qui permet d'avoir des accessoires de raccordement plus petits et plus compacts, contrairement à la méthode géométrique qui nécessite des volumes relativement importants.

4.6 Conclusion

A travers les simulations effectuées dans ce chapitre sous environnement Comsol, nous pouvons déduire que les méthodes capacitatives de contrôle du champ électrique (par réfraction et géométriques) assurent une distribution approximativement uniforme suivant l'axe z et une réduction du champ électrique maximal au niveau des terminaisons de câbles MT et HT. Afin de garantir l'efficacité de la méthode de contrôle par réfraction, un choix judicieux des paramètres optimaux géométriques à savoir l'épaisseur e_c et la longueur L_c ainsi que diélectrique consistant en la permittivité relative de la couche de haute permittivité doit être envisagé. L'avantage majeur de cette méthode est sa compacité, tandis que son inconvénient reste la complexité et le coût de fabrication des matériaux de haute permittivité. Malgré que la méthode de contrôle géométrique du champ électrique donne de très bonne réduction du champ maximal au niveau de la surface du câble, elle crée, par contre, un renforcement du champ électrique au niveau du sommet du cône. Ce renforcement peut être réduit en utilisant un écran déflecteur adéquat qui permet de mieux distribuer le champ électrique. L'inconvénient de cette méthode est sa géométrie volumineuse et aussi sa sensibilité car une petite déformation de la forme du déflecteur et du cône solide peut causer un dysfonctionnement de la méthode.

Chapitre 5 :

Réduction du champ électrique par le biais d'une jonction

Chapitre 5

Réduction du champ électrique par le biais d'une jonction

5.1 Introduction

Les accessoires de raccordements font partie des systèmes de transmission d'énergie électrique. Ces accessoires à savoir les jonctions et les extrémités doivent remplir les fonctions de base (telles que la connexion des conducteurs, l'isolation, l'étanchéité et la protection mécanique) que le câble [1]. Ces accessoires doivent impérativement fournir un contrôle et une réduction du champ électrique au niveau du câble [1, 69]. Ce contrôle de champ à l'intérieur de ces accessoires est assuré en utilisant les différentes techniques à savoir capacitatives et résistives de contrôle de champ détaillées dans le chapitre 3. En fait, tous les accessoires de raccordements de câble sont dotés d'un système de contrôle du champ au-delà d'une tension de 6,6 kV [1, 3].

Dans ce chapitre, nous avons d'abord présenté les accessoires de raccordement (extrémités et jonctions) ainsi que leurs différents composants. Ensuite, une simulation d'une jonction de 20 kV a été effectuée sous environnement COMSOL. Enfin, nous nous sommes intéressés à la variation du champ électrique à l'intérieur de cette jonction en fonction des différentes permittivités de ses composantes à savoir la couche de haute permittivité, l'isolation en caoutchouc et la couche semi-conductrice.

5.2 Accessoires de Raccordement

Dans cette section, nous présentons ces accessoires et leurs composants ainsi que leurs fonctions.

5.2.1 Jonctions

La longueur maximale d'un tronçon de câble à haute tension est de 500 à 1000 m. Pour réaliser des lignes de plusieurs kilomètres ces tronçons doivent être raccordés par des jonctions. La figure 5.1 présente une disposition d'une jonction de type monophasé et ses principaux composants. Comme le montre cette figure, la jonction comporte une plaque semi-conductrice avec mastic capacitif (couche de haute permittivité) assurant le contrôle ainsi que la réduction du champ électrique.

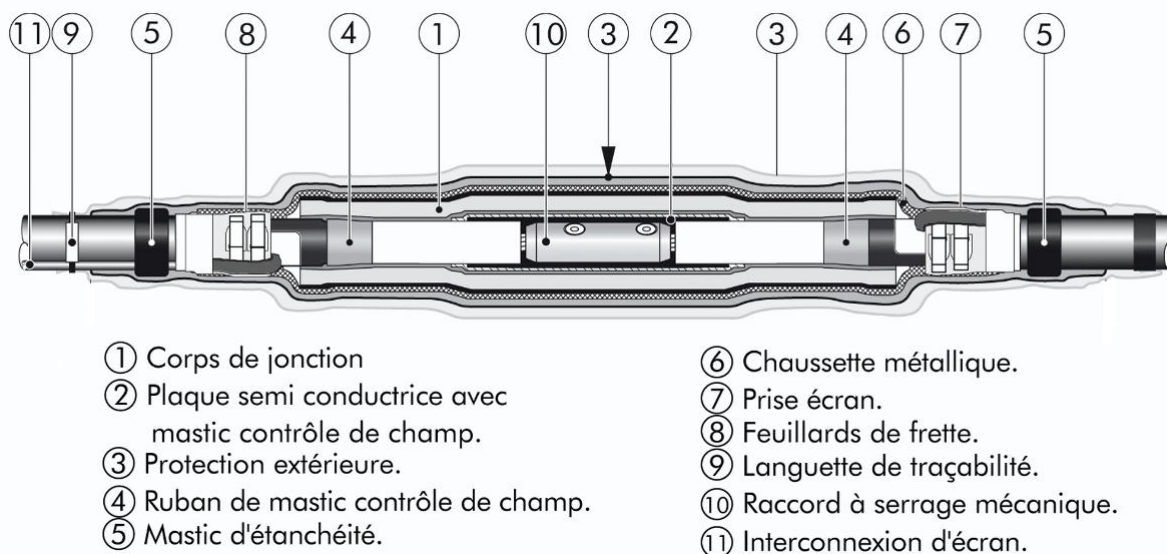


Figure 5.1 – Disposition d'une jonction monophasée et ses composants [70]

Le but principal d'une jonction est de connecter deux câbles ensemble pour assurer la continuité de service [5]. Les jonctions sont utilisées lors d'une réparation après une défaillance ou un dommage externe, un détournement d'un circuit installé existant, une jonction de deux câbles, une division d'un câble triphasé en trois câbles monophasés selon le besoin, etc.

Les jonctions doivent résister à toutes les contraintes notamment électriques, thermiques et mécaniques affectant le câble. En outre, la conception d'une jonction soit capable d'empêcher l'humidité d'y pénétrer depuis son environnement [1]. Malgré le plus haut niveau d'attention accordée à la qualité de fabrication et d'installation, 60% des pannes sont enregistrées au niveau des jonctions ; ces dernières restent donc le maillon le plus faible de toute l'installation [48, 69].

L'exigence la plus fondamentale pour une jonction est la connectivité des conducteurs. Les conducteurs peuvent être connectés à travers un connecteur. Pour ce faire, diverses techniques sont appliquées dont la plus simple est la compression mécanique dans un manchon métallique, généralement à l'aide d'un outil de compression actionné hydrauliquement. Parfois, la jonction entre câbles se fait par soudage. Les conducteurs en aluminium sont difficiles à être connectés en employant les méthodes susmentionnées, et sont souvent connectés par un soudage sous gaz inerte (MIG). Le soudage exothermique est également considéré comme étant une autre alternative de connexion très utilisée dans le domaine [69]. Le métal du connecteur doit être le même que le câble lorsque cela est possible. Il y a des situations où cela ne peut pas être fait, comme le cas où un conducteur en cuivre doit être connecté à un conducteur en aluminium. Il est acceptable d'utiliser un connecteur en aluminium sur un conducteur en cuivre. Cependant, un connecteur en cuivre ne doit pas être utilisé sur un conducteur en aluminium car pendant fonctionnement, le coefficient de dilatation thermique de l'aluminium est plus grand que de celui de du cuivre. Ceci peut provoquer l'extrusion du cuivre et entraîne une mauvaise connexion [5].

5.2.2 Extrémités de câbles

Les extrémités servent à terminer le câble et permettent le raccordement du câble à des pièces nues du poste, des lignes aériennes, aux jeux de barres, aux appareils et aux tableaux électriques [3]. La figure 5.2 présente une disposition d'une extrémité de type monophasé et ses principaux composants.

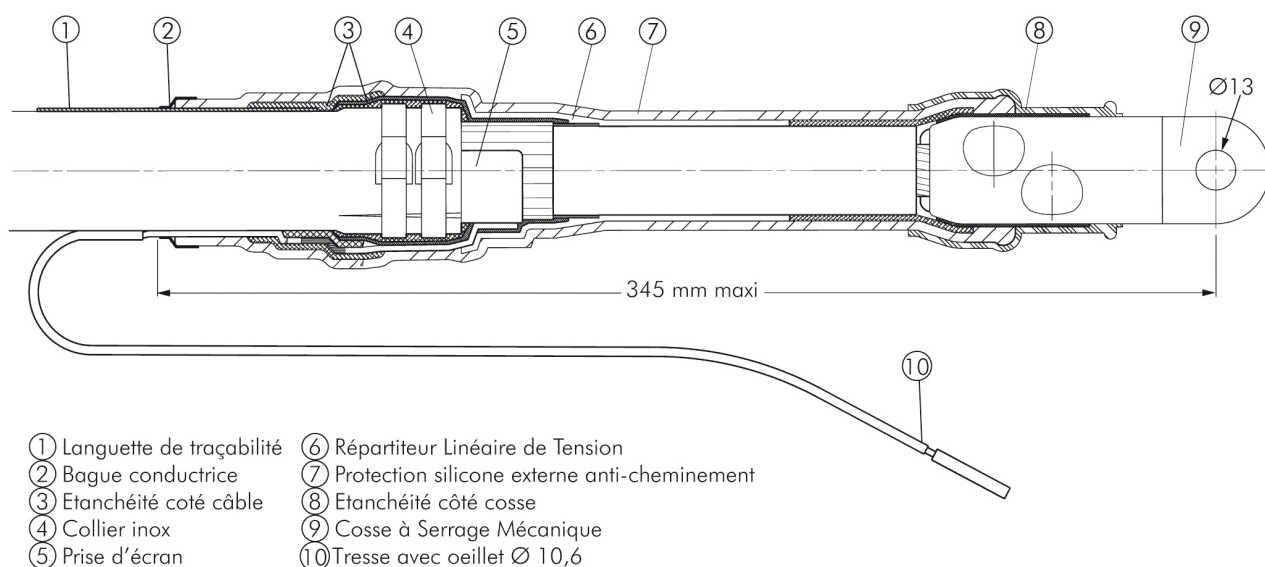


Figure 5.2 – Disposition d'une extrémité monophasée et ses composants [71]

L'extrémité protège le câble mécaniquement et empêche l'humidité d'y pénétrer. Les extrémités doivent être capables de résister aux effets des conditions climatiques (rayonnement ultraviolet, température, humidité,...) et atmosphériques (pollution, ...) [1]. L'installation d'une extrémité de câbles nécessite (i) une faible résistance de connexion entre l'extrémité et l'équipement électrique pour ne pas provoquer une augmentation excessive de la température, (ii) une connexion mécanique suffisantes pour maintenir le câble en position contre les forces thermiques, magnétiques et environnementales [69]. L'extrémité du câble doit résister à la même contrainte électrique que le câble, et nécessite une méthode de contrôle du champ électrique [3], comme montré sur la figure 5.3. L'extrémité doit fournir une isolation externe suffisante pour maintenir les performances du système d'isolation dans l'environnement dans lequel elle est installée [69]. La structure d'une extrémité dépend du type de câble, de la tension utilisée et de l'environnement dans lequel elle est installée [3]. Deux grandes catégories se présentent à savoir les extrémités extérieures et celles intérieures [1].

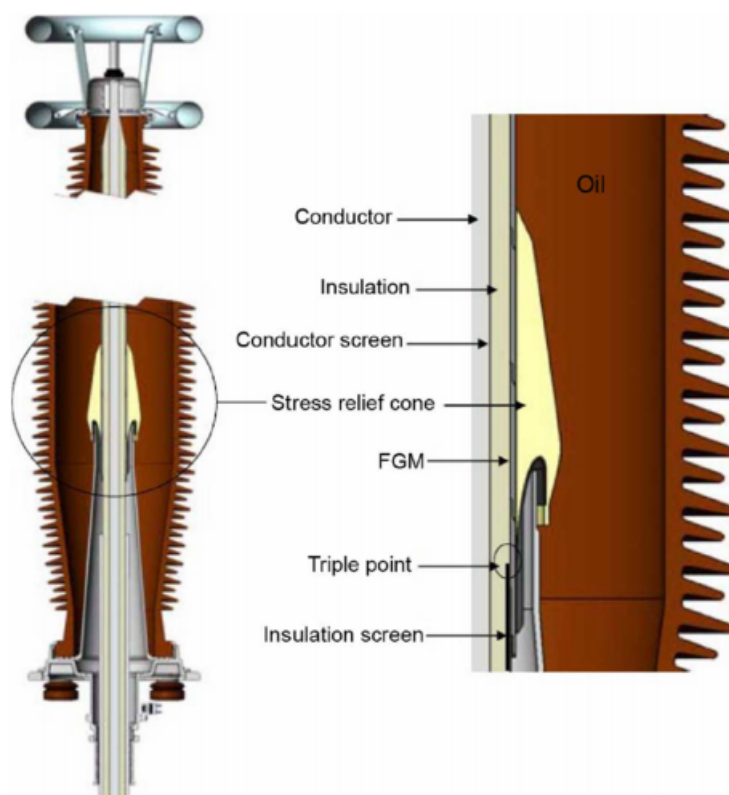


Figure 5.3 – Vue schématique d'une extrémité avec méthode capacitive de contrôle du champ [48]

5.2.2.1 Extrémités Extérieures

L'extrémité extérieure la plus courante est celle isolée à l'air. Il s'agit d'une extrémité très volumineuse pour réduire les fuites au maximum [69]. En effet, la surface des extrémités extérieures doit être hydrophobe [1]. Pendant longtemps, les extrémités extérieures étaient conçues à partir de porcelaine. Une approche de plus en plus courante consiste à utiliser des matériaux composites (polymères) sophistiqués telles que le caoutchouc silicone [1, 69]. Les raisons du choix des extrémités composites plutôt que ceux en porcelaines sont plusieurs telles qu'un poids plus léger et moins de fragilité, pour un transport, une manipulation et une installation plus faciles. Les extrémités composites sont moins vulnérables aux dommages mécaniques pour cause de leur flexibilité. En cas d'un défaut interne, les extrémités composites présentent un risque réduit pour le personnel ou d'autres équipements si elles sont détruites, car aucun projectile de porcelaine lourd n'est jeté. Ces raisons peuvent justifier leur coût relativement plus élevé [69]. La figure 5.4 présente des extrémités en porcelaine et en composites (synthétiques).

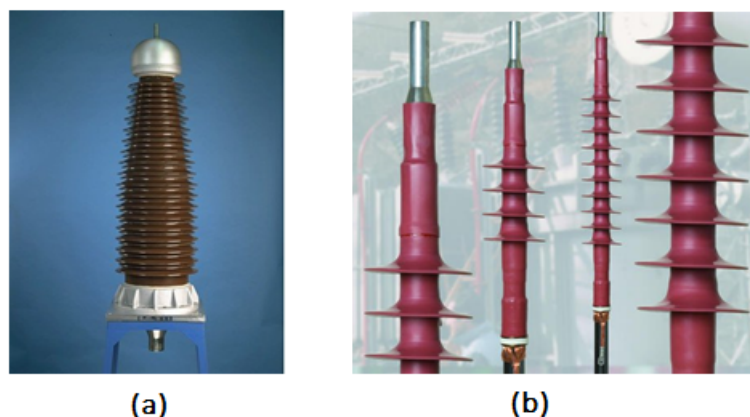


Figure 5.4 – Extrémités extérieures : (a) en porcelaine [72] ; (b) composites [73]

5.2.2.2 Extrémités Intérieures

Les extrémités intérieures se trouvent généralement dans un boîtier ou bien un hangar (Figure 5.5). L'isolation à l'intérieur de ces derniers peut être de l'air ou bien un diélectrique liquide ou alors gazeux [69]. Les extrémités intérieures isolées à l'air sont similaires aux types extérieurs [1]. L'isolation à l'air est obtenue en utilisant un boîtier suffisamment grand pour permettre des espacements adéquats entre phases et entre phases et terre. Les extrémités intérieures doivent être conçues pour résister à l'humidité, qui est présente dans l'air ou bien le diélectrique [69].

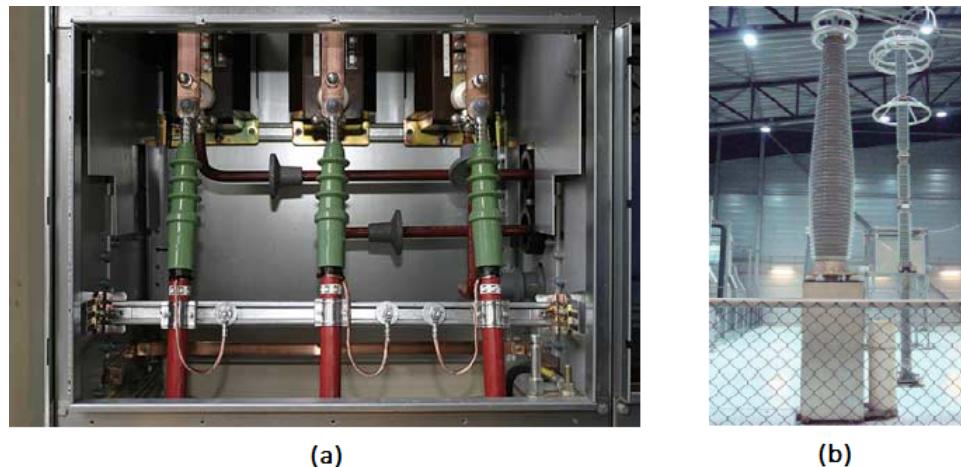


Figure 5.5 – Extrémités intérieures : (a) Dans un boîtier [74] ; (b) Dans un Hangar [29]

5.3 Simulation d'une jonction

Les câbles de haute tension sont nécessaires au transport de l'énergie électrique. Etant donné sa longueur, de tels câbles sont constitués de différents tronçons. Des jonctions de raccordement entre les différents tronçons de câbles, de l'ordre de 500 à 1000 m, sont utilisées [15].

Dans cette partie, nous nous sommes intéressés, plus particulièrement, à l'étude d'une jonction de câbles de 20 kV, dotée d'une couche de haute permittivité (technique capacitive

de contrôle par réfraction) permettant la réduction du champ électrique. Cette étude consiste à analyser la distribution du champ électrique à l'intérieur de cette jonction. Les effets des permittivités relatives des différents composants de cette jonction, à savoir la couche de haute permittivité, l'isolation en caoutchouc et la couche semi-conductrice, sur le champ électrique à l'intérieur de cette jonction sont analysés.

5.3.1 Description du Modèle

La figure 5.7 montre un modèle géométrique en 2D axisymétrique de la jonction de 20 kV d'une longueur de 30 cm (suivant l'axe z). Ce modèle est inspiré de la littérature [75]. Il est utilisé pour simuler les distributions du champ et du potentiel électriques dans la jonction.

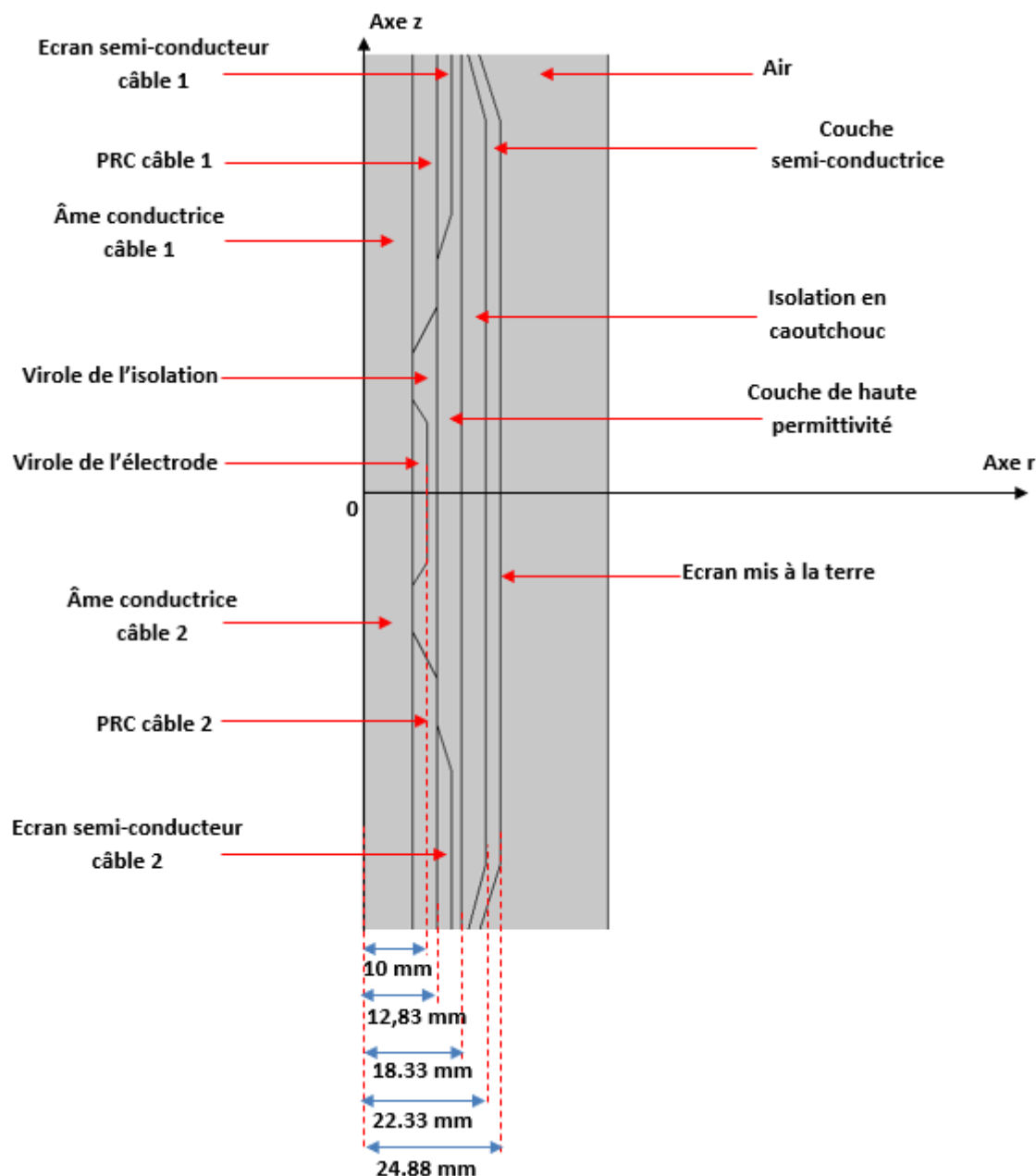


Figure 5.6 – Modèle en 2D axisymétrique de la jonction de 20 kV

Cette jonction est conçue afin de connecter deux câbles de 20 kV constitués d'âmes conductrices d'épaisseur de 7,33 mm, d'isolations synthétiques en PRC d'épaisseur de 5,5 mm et des écrans semi-conducteurs d'épaisseur de 0,5 mm. Afin d'assurer la liaison entre les deux âmes conductrices et les deux isolants synthétiques, nous utilisons respectivement une virole d'électrode d'une épaisseur 2,77 mm et une virole d'isolation d'épaisseur de 5,5 mm. Une couche de haute permittivité d'épaisseur de 5,5 mm est utilisée pour contrôler le champ, suivie d'une isolation en caoutchouc d'épaisseur de 4 mm. Le tout est recouvert d'une couche semi-conductrice d'épaisseur de 2 mm. L'écran mis à la terre est situé sur la surface extérieure de la couche semi-conductrice. Les constantes diélectriques de ces différentes parties de la jonction sont présentées dans le tableau 5.1.

Table 5.1 – Constantes diélectriques des différents composants de la jonction [75]

Composant	Constante diélectrique ϵ_r
Ame conductrice (Al/Cu)	10000
PRC des câbles 1 et 2	2,3
Ecrans semi-conducteurs des câbles 1 et 2	1000
Couche de haute permittivité	25
Couche semi-conductrice	1000
Air	1
Isolation en caoutchouc	3,4
Virole de l'électrode	10000
Virole de l'isolation	50

5.3.2 Résultats et Discussions

Nous avons commencé par simuler deux terminaisons de notre câble de 20 kV, connectées directement entre elles (en absence de jonction). Nous avons constaté que le champ au niveau de ces deux terminaisons est très intense. Sa valeur (de 117 kV/cm) est la même que celle trouvée au chapitre 3. Pour réduire le champ électrique, nous avons donc utilisé une jonction de 20 kV. Cette dernière est dotée d'une couche de haute permittivité (technique capacitive de contrôle par réfraction).

Les résultats de la simulation relatifs aux champ et au potentiel électriques dans cette jonction de câble de 20 kV sont présentés dans cette section. Les figures 5.7 et 5.8 présentent respectivement les distributions du potentiel électrique en 2D et en 3D dans la jonction

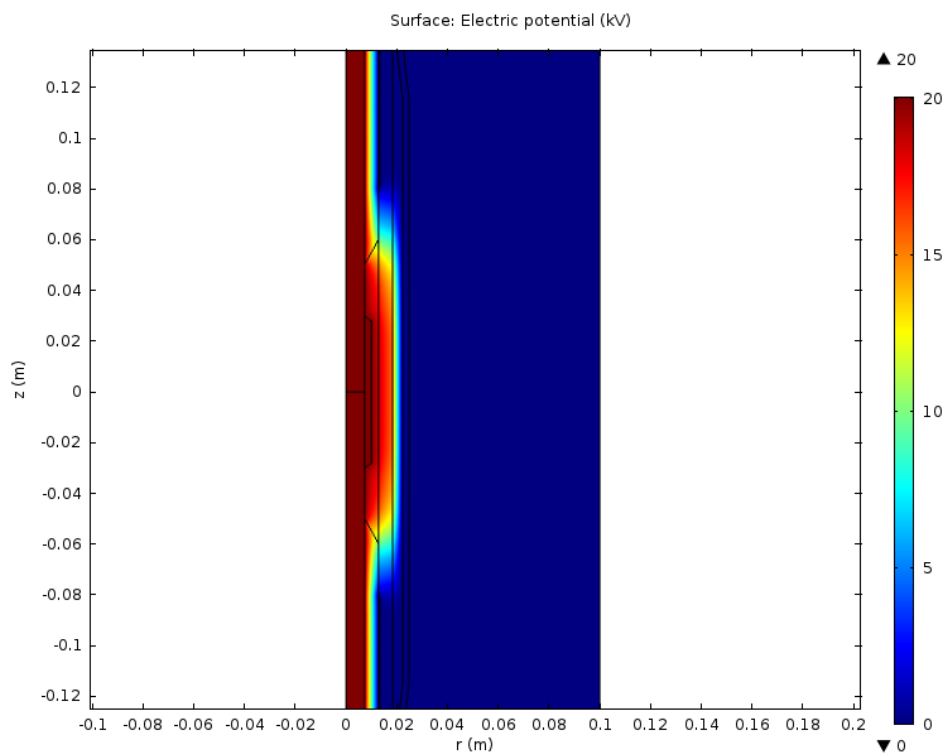


Figure 5.7 – Distribution surfacique du potentiel électrique

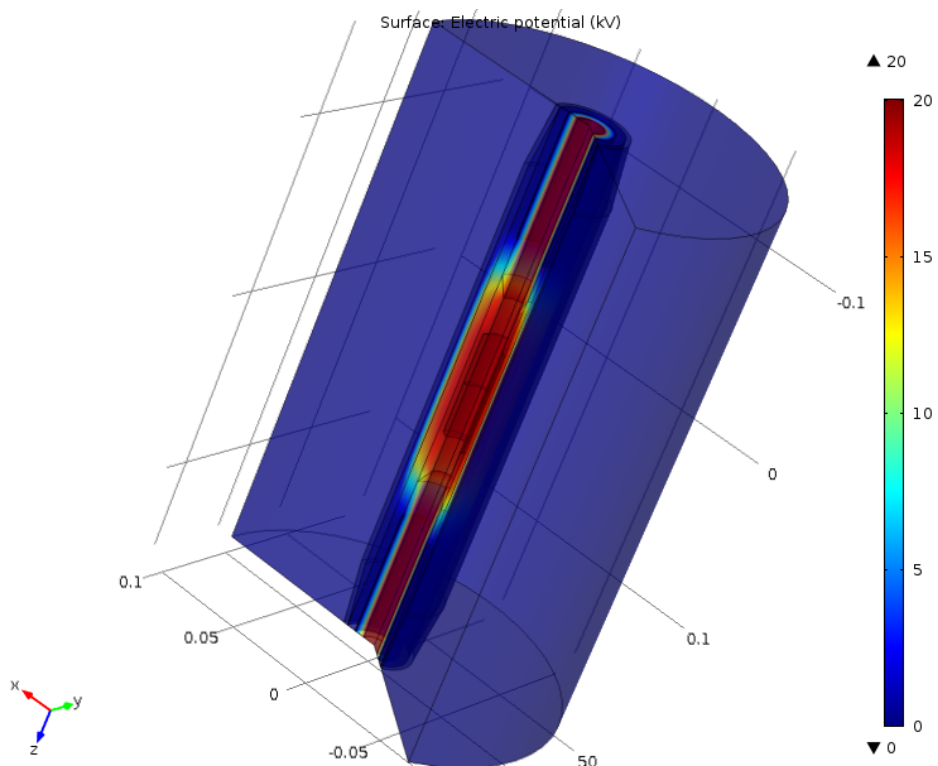


Figure 5.8 – Distribution du potentiel en 3D

A partir des figures 5.7 et 5.8, nous remarquons que les potentiels élevés se situent du côté de l'âme conductrice et la virole d'électrode. Le potentiel diminue en allant vers l'écran mis à la terre, situé sur la surface externe de la couche semi-conductrice.

Afin d'analyser le champ électrique à l'intérieur de la jonction, nous présentons respectivement les distributions du champ électrique en 2D et 3D sur les figures 5.9 et 5.10.

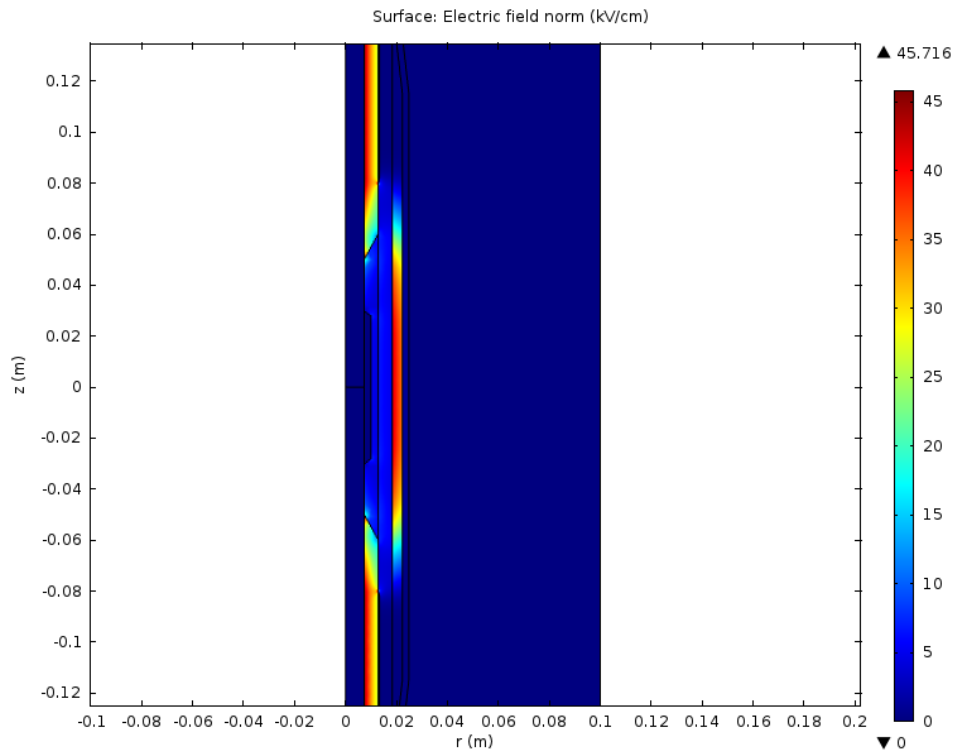


Figure 5.9 – Distribution surfacique du champ électrique en 2D

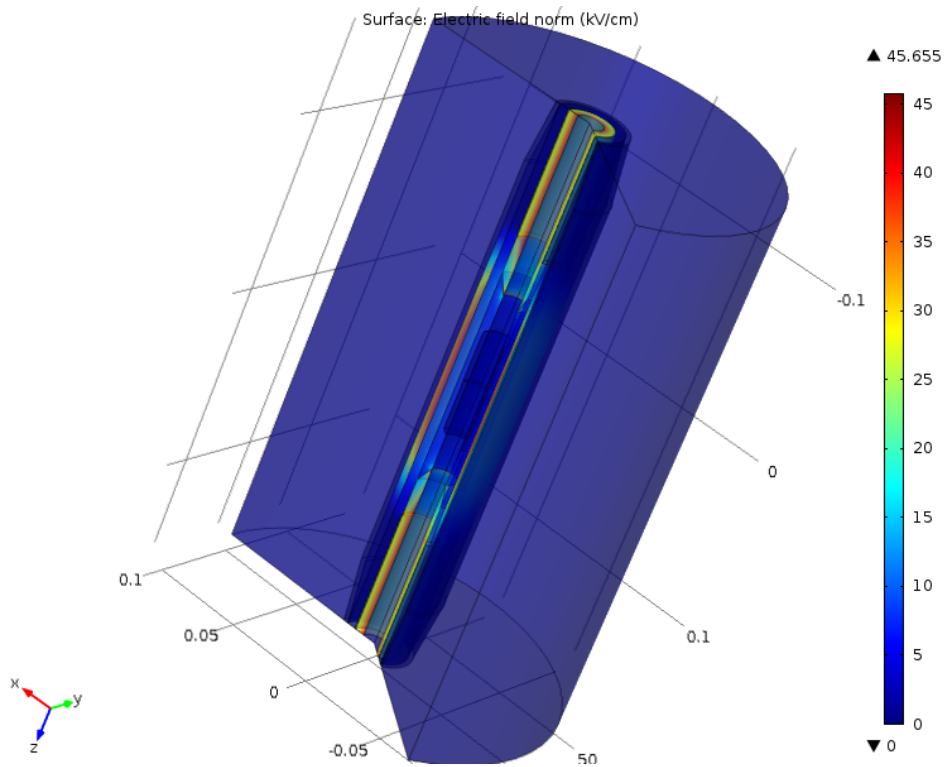


Figure 5.10 – Distribution du champ électrique en 3D

A partir des figures 5.9 et 5.10, il est évident que le champ électrique à l'intérieur de l'âme conductrice et de la virole d'électrode est nul, car il s'agit des conducteurs. Par ailleurs, nous pouvons remarquer que le champ électrique est faible d'environ 4,5 kV/cm dans la virole d'isolation et environ 6 kV/cm dans la couche de haute permittivité. Cependant, une valeur intense du champ électrique est enregistrée au niveau de l'isolation en caoutchouc. La variation du champ électrique à l'intérieur de l'isolation (PRC) des deux câbles diminue d'une valeur maximale de 45,5 kV/cm du côté de l'âme conductrice à une valeur minimale de 24 kV/cm du côté l'écran semi-conducteur.

La variation du champ électrique à travers la largeur de la jonction (suivant l'axe r) est présentée sur la figure 5.11.

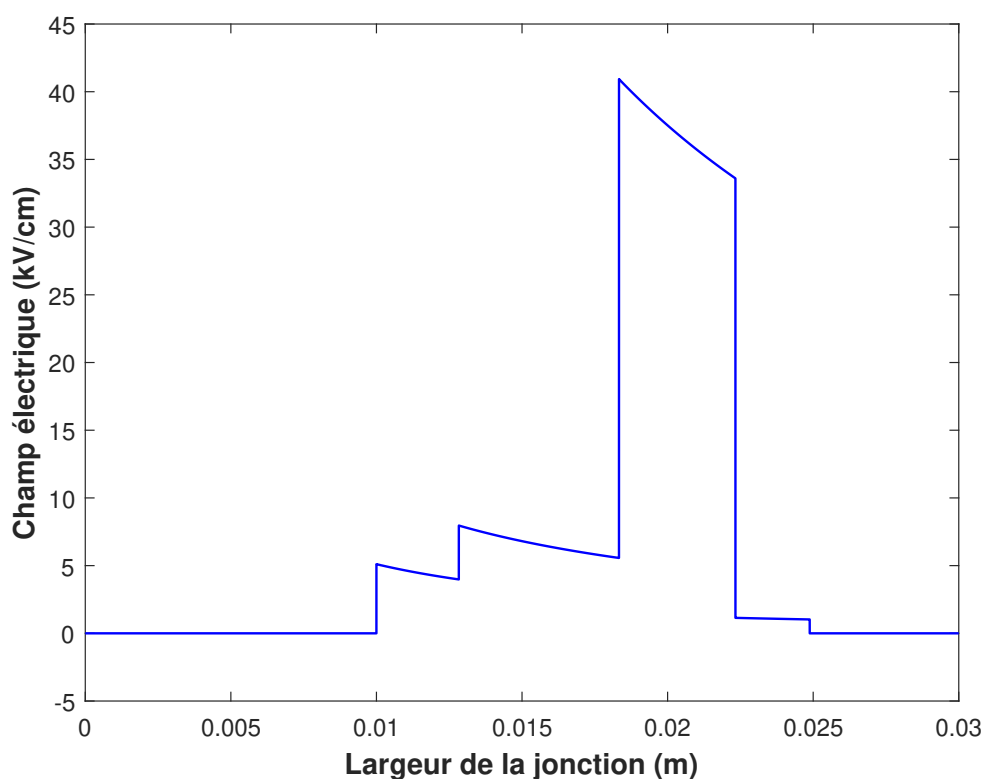


Figure 5.11 – Variation du champ électrique à travers la largeur de la jonction

Nous constatons, d'après cette figure, que le champ électrique est nul le long des deux parties conductrices à savoir l'âme des deux câbles et la virole de l'électrode, soit pour $0 \leq r < 10$ mm. De tels résultats sont en accord avec ceux déduits des figures 5.10 et 5.11. Le point $r = 10$ mm représente le début de la virole d'isolation. En ce point, le champ électrique vaut 5,1 kV/cm. Ce champ diminue lentement le long de la virole d'isolation, soit pour $10 \leq r < 12,83$ mm. La valeur enregistrée à la fin de la virole d'isolation est de 3,98 kV/cm. Ceci correspond à une décroissance de 21,96%.

La partie suivante consiste en la couche de haute permittivité. Elle est délimitée par $12,83 \leq r < 18,33$ mm. De même que précédemment, le champ électrique décroît le long de cette couche de la 7,96 kV/cm à 5,56 kV/cm, soit une réduction de 30,15%.

Une augmentation remarquable du champ électrique est observée au niveau de l'isolation en caoutchouc, soit pour $18,33 \leq r < 22,33$ mm. Le champ électrique vaut 40,93 kV/cm en $r = 18,33$ mm et diminue graduellement à travers cette isolation jusqu'à atteindre 33,6 kV/cm, soit une atténuation de 17,90%.

Relativement au champ électrique trouvé le long de l'isolation en caoutchouc, une chute brutale de celui-ci est enregistrée au début de la couche semi-conductrice, soit en $r = 22,33$ mm où la valeur du champ vaut 1,14 kV/cm. Le long de cette couche semi-conductrice correspondant à $22,33 \leq r < 24,88$ mm, le champ électrique décroît de 8,9% pour atteindre la valeur de 1,02 kV/cm.

Finalement, le long de l'écran (à partir de $r = 24,88$ mm) le champ s'annule. Ceci est évident puisque cet écran est mis à la terre.

Il est à noter que les différences dans les permittivités relatives des différents composants de la jonction sont responsables des variations susmentionnées du champ électrique. Autrement dit, la discontinuité du champ électrique est régie par la condition de passage d'un milieu à un autre faisant intervenir les constantes diélectriques de ces deux milieux. La discontinuité du champ s'accroît au fur et à mesure que le rapport entre les constantes diélectriques des deux milieux est important. A titre d'exemple, le champ électrique enregistré à la fin de la virole d'isolation est de 3,98 kV/cm, et celui au début de la couche de haute permittivité est de 7,96 kV/cm; le champ au début de cette couche a été doublement amplifié car la permittivité relative ($\epsilon_r = 25$) de celle-ci est deux fois moins importante que celle ($\epsilon_r = 50$) de la virole d'isolation. Cette procédure est valide pour toutes valeurs du champ électriques enregistrées en différents points de discontinuité.

5.3.3 Analyse Paramétrique

Dans cette partie, nous nous intéressons à l'analyse de l'influence de la permittivité relative de chaque composant de la jonction sur la variation du champ électrique à travers la jonction. Pour cela, nous avons varié la constante diélectrique ϵ_r de la couche de haute permittivité (de 5 à 45 par pas de 10), celle de l'isolation en caoutchouc (2; 3,4; 5; 10; 20) et celle de la couche semi-conductrice (de 40 à 120 par pas de 20). Les variations du champ électrique à travers la jonction pour ces différentes permittivités relatives sont présentées respectivement sur les figures 5.12, 5.13 et 5.14.

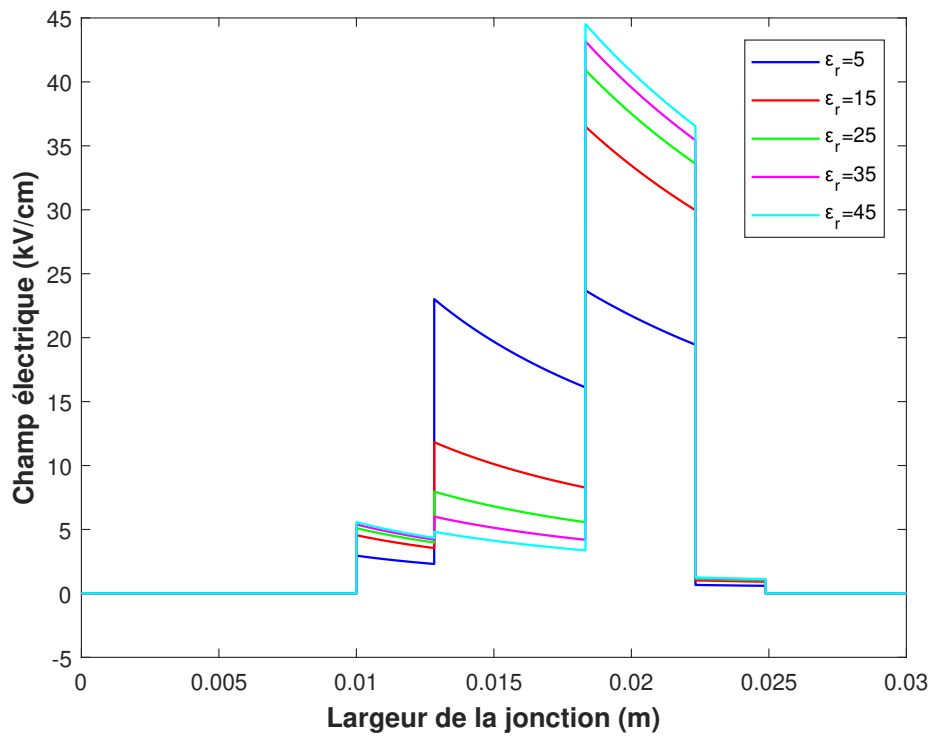


Figure 5.12 – Variation du champ électrique en fonction de la constante diélectrique de la couche de haute permittivité

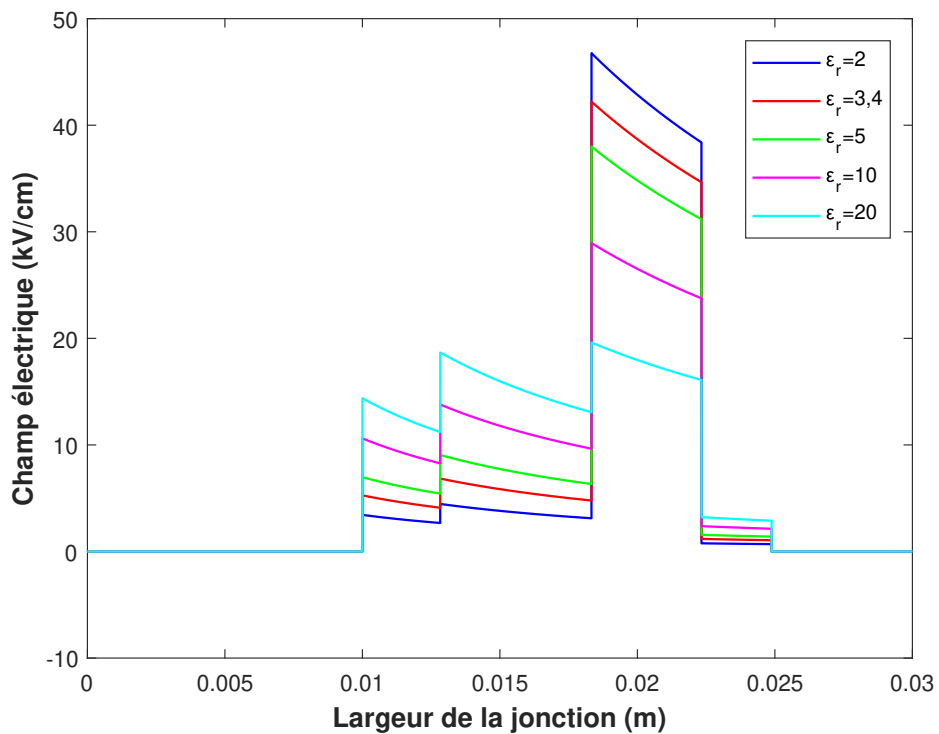


Figure 5.13 – Variation du champ électrique en fonction de la constante diélectrique de l'isolation en caoutchouc

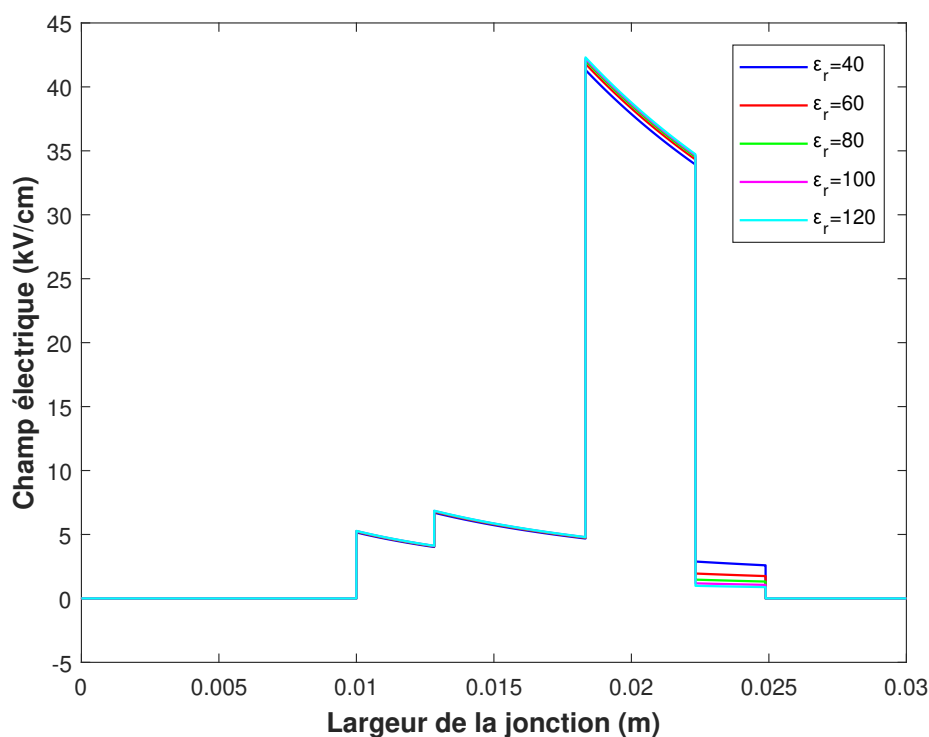


Figure 5.14 – Variation du champ électrique en fonction de la constante diélectrique de la couche semi-conductrice

Nous remarquons, de la figure 5.12, que l'augmentation de la permittivité relative de la couche de haute permittivité (délimitée par $12,83 \leq r < 18,88$ mm) engendre une diminution du champ électrique à l'intérieur de cette couche et des augmentations du champ au niveau de toutes les autres couches à savoir la virole d'isolation ($10 \leq r < 12,83$ mm), l'isolation en caoutchouc ($18,33 \leq r < 22,33$ mm) et la couche semi-conductrice ($22,33 \leq r < 24,88$ mm). De telles diminutions et augmentations dépendent étroitement des permittivités relatives des différents milieux de la jonction. Par exemple, en augmentant la permittivité relative de la couche de haute permittivité de 5 à 20, le champ électrique électrique diminue de 22,88 kV/cm à 9,46 kV/cm. Par ailleurs, le champ électrique augmente de 2,63 kV/ à 4,35 kv/cm, de 23,45 Kv/cm à 38,76 kV/cm et de 0,64 kV/cm à 1,06 kV/cm au niveau de la virole d'isolation, l'isolation en caoutchouc et la couche semi-conductrice respectivement.

Les mêmes constatations sont valables pour les caractéristiques de la figure 5.13. En effet, l'augmentation de la permittivité relative de l'isolation en caoutchouc (délimitée par $18,33 \leq r < 22,33$ mm) engendre une diminution du champ dans cette couche et une augmentation au sein des autres couches, à savoir la virole d'isolation, la couche de haute permittivité et la couche semi-conductrice. Quantitativement parlons, lors de l'augmentation de la constante diélectrique de l'isolation en caoutchouc de 3,4 de 10, nous avons enregistré une décroissance du champ électrique dans dans cette couche de 41,79 kV/cm à 28,67 kV/cm et une augmentation du champ de 4,69 kV/cm à 9,44 kV/cm, de 6,80 kV/cm à 13,70 kV/cm et de 1,14 kV/cm à 2,30 kV/cm respectivement au niveau de la virole d'isolation, la couche de haute permittivité et la couche semi-conductrice.

Par ailleurs, l'augmentation de la permittivité relative de la couche semi-conductrice provoque une diminution du champ électrique au sein de la même couche. Par exemple, en augmentant la permittivité relative de 40 à 80, le champ dans cette couche diminue de 2,79 kV/cm à 1,42 kV/cm (correspondant à une réduction de 49,10%). Cependant, l'accroissement de la permittivité relative de la couche semi-conductrice n'affecte pratiquement pas le champ électrique dans les autres différentes couches de la jonction à savoir la virole d'isolation, la couche de haute permittivité et le caoutchouc.

Il est important de noter que nos variations du champ électrique le long de la jonction en fonction des différentes permittivités relatives sont similaires à celles rapportées par Illias et al. [75], ce qui valide les simulations que nous avons effectuées dans cette section.

5.4 Conclusion

Dans ce chapitre, nous nous sommes intéressés à analyser les distributions en 2D et 3D du champ et du potentiel électriques à l'intérieur d'une jonction de 20 kV. Cette dernière comporte une virole d'électrode, une virole d'isolation, une couche de haute permittivité, une isolation en caoutchouc, une couche extérieure semi-conductrice et un écran mis à la terre.

Les résultats montrent que le champ électrique vaut 40,93 kV/cm au niveau de l'isolation en caoutchouc, diminue brutalement au niveau de la couche semi-conductrice jusqu'à atteindre 1,14 kV/cm, avant de s'annuler le long de l'écran mis à la terre. Par ailleurs, l'analyse de l'influence de la variation de permittivité relative de chaque composant de la jonction sur la distribution du champ électrique montre qu'en augmentant la permittivité relative de la couche de haute permittivité (ou celle de l'isolation en caoutchouc), le champ électrique décroît au niveau de cette couche et augmente dans les autres couches de la jonction. L'augmentation de la permittivité relative de la couche semi-conductrice induit seulement à une décroissance du champ électrique au niveau de cette couche ; le champ électrique dans les autres couches n'étant pas affecté. Les résultats que nous avons obtenus lors de cette étude concordent parfaitement avec ceux trouvés par Illias et al. [75].

Conclusion Générale

Conclusion Générale

C E travail a porté sur l'étude du champ et du potentiel électriques au niveau des terminaisons de câbles MT et HT. Pour cela, des simulations ont été effectuées, sous environnement COMSOL Multiphysics, sur une portion de 1 mètre de longueur d'un câble de 20 kV isolé au PRC. Cette portion est constituée d'une âme conductrice en alliage d'aluminium/cuivre, d'un écran semi-conducteur sur l'âme, d'un isolant synthétique (PRC), d'un écran semi-conducteur sur l'isolant, d'un écran métallique en fil de cuivre mis à la terre et d'une gaine de protection extérieure en PVC. La partie dénudée du câble est de 0,25 m.

Selon le profil du potentiel, une importante concentration des lignes équipotentiels au niveau de la discontinuité de l'écran a été enregistrée. Il est évident qu'une telle concentration engendre un gradient de potentiel. Ce dernier provoque, en ce point de discontinuité, un renforcement du champ électrique locale dont la valeur maximale est de 117 kV/cm. Cette dernière est due essentiellement à l'émergence de la composante tangentielle de 103 kV/cm; le champ électrique étant radial en absence de toute discontinuité. Ce renforcement du champ électrique peut engendrer des effets néfastes affectant le câble (génération de décharges partielles, augmentation de pertes diélectriques, création des points chauds, diminution de la durée de vie des câbles, rupture diélectrique causant une panne dans le système de transmission d'énergie...). De ce fait, le champ électrique aux terminaisons de câbles doit être réduit. Pour cela, le recours aux méthodes de réduction du champ électrique est indispensable.

En effet, des simulations ont été faites en 2D axisymétrique en utilisant des techniques capacitives, en l'occurrence la méthode de contrôle par réfraction et celles géométriques avec et sans déflecteur. Nous rappelons que la méthode de contrôle par réfraction consiste principalement à appliquer une couche diélectrique (de permittivité de 40, d'épaisseur de 2 mm et de longueur de 20 cm) au niveau de la terminaison du câble. Ceci a engendré un espacement des lignes équipotentiels et une réduction du gradient de potentiel au niveau de la terminaison du câble. La valeur maximale du champ électrique a été diminuée (de 117 kV/cm) à 27,61 kV/cm (soit une réduction de 76,4%). Dans le but d'analyser l'effet de l'épaisseur, la longueur et la permittivité relative de la couche diélectrique additive sur le champ électrique, une étude paramétrique a été effectuée. La variation de ces paramètres électro-géométriques, à savoir l'épaisseur (de 0,6 à 2 mm), la longueur (de 5 à 25 cm) et la permittivité relative (de 2,3 à 160) de la couche additive, a permis l'obtention d'une configuration optimale, pour laquelle la valeur maximale du champ électrique au niveau de la discontinuité est de 17,57 kV/cm soit une diminution de 85%, obtenue pour une épaisseur de 1 mm, une longueur de 15 cm et une permittivité relative 40.

La deuxième méthode que nous avons appliquée en vue de réduire le champ électrique au niveau de la discontinuité de l'écran est celle géométrique. Deux variantes ont été sélectionnées à savoir traditionnelle et avec déflecteur. La première variante consiste à utiliser, au niveau de la terminaison du câble, un cône solide diélectrique, généralement en caoutchouc de silicone, dont l'apothème est couvert par l'écran mis à la terre; dans ces conditions, la discontinuité coïncide avec le sommet du cône. La caractéristiques électro-géométrique du cône (caractérisé par un rayon de 17,17 mm, une longueur fixe de 6 cm et une permittivité relative de 7) et le prolongement de l'écran sur l'apothème du cône ont renforcé l'isolation du câble en fournissant une isolation supplémentaire à la terminaison de câble. En effet, une meilleure distribution des lignes équipotentielles le long de la surface extérieure du câble a été enregistrée, offrant ainsi une large surface de répartition aux lignes équipotentielles. Dans ces conditions, une diminution de 92,42% de l'intensité maximale du champ électrique a été obtenue, puisque la valeur finale trouvée est de 8,86 kV/cm. Cependant, une concentration des lignes équipotentielles et des lignes du champ électrique a été observée au niveau du sommet de cône (point de discontinuité de l'écran); l'intensité maximale en ce point est de 48 kV/cm. Cette valeur a été diminuée seulement à 44,58 kV/cm en augmentant le rayon du cône jusqu'à 22,17 mm. En effet, pour réduire considérablement le champ électrique, il faut utiliser un cône avec un rayon excessif. Comme cette mesure n'est pas recommandée dans la pratique, l'utilisation d'un écran de terre spécifique appelé déflecteur est une alternative très prometteuse, il s'agit de la deuxième variante de la méthode géométrique.

Dans cette variante, le déflecteur (caractérisé par un rayon de 7,7 mm, un angle de départ de $1,72^\circ$ et une permittivité relative de 1000) est placé à l'intérieur du cône diélectrique solide (caractérisé par un rayon de 12,17 mm, une longueur de 6 cm et une permittivité relative de 7). Au niveau de la surface du câble, le gradient de potentiel a été considérablement diminué suite à l'espacement des lignes équipotentielles. Comme conséquence, l'intensité maximale du champ électrique a été fortement réduite de 91,49%, soit de 117 à 9,95 kV/cm. Au sommet de cône, le champ électrique maximal est de 63,82 kV/cm et 8,19 kV/cm enregistrés respectivement lors de l'application de la première et la deuxième variante de la méthode géométrique.

Il est important de noter que plusieurs tronçons de câbles sont nécessaires pour réaliser des lignes souterraines de plusieurs milliers de kilomètres. Pour la continuité de service, le raccordement se fait en utilisant des jonctions. Bien que ces dernières sont dotées de systèmes permettant la réduction du champ électrique, nous nous sommes intéressés, dans cette deuxième tranche de notre étude, à analyser les distributions en 2D et 3D du champ et du potentiel électriques à l'intérieur d'une jonction utilisée pour raccorder deux terminaisons de câbles de 20 kV isolés en PRC. Cette jonction est constituée d'une virole d'électrode, une virole d'isolation, une couche de haute permittivité assurant le contrôle du champ électrique à l'intérieur de la jonction, une isolation en caoutchouc, une couche extérieure semi-conductrice et un écran mis à la terre.

La simulation de cette jonction a montré que les potentiels élevés se situent du côté de l'âme conductrice et la virole d'électrode. Par ailleurs, le potentiel diminue en allant vers l'écran mis à la terre, situé sur la surface externe de la couche semi-conductrice. En outre, un champ intense a été enregistré au niveau de l'isolation en caoutchouc et vaut 40,93 kV/cm. Cette valeur intense du champ électrique a diminué brutalement au niveau de la couche semi-conductrice atteignant une valeur de 1,14 kV/cm.

Comme les variations du champ électrique sont dues principalement aux différences des constantes diélectriques des différentes couches de cette jonction, nous nous sommes intéressés à analyser l'influence de la variation de permittivité relative de chaque composant de la jonction sur la distribution du champ électrique. Pour cela, nous avons varié la constante diélectrique de la couche de haute permittivité (de 5 à 45), celle de l'isolation en caoutchouc (2 à 20) et celle de la couche semi-conductrice (de 40 à 120). Avec l'augmentation de la permittivité relative de la couche de haute permittivité (ou celle de l'isolation en caoutchouc), le champ électrique a diminué au sein de cette couche et a augmenté ailleurs (dans les autres couches de la jonction). L'augmentation de la permittivité relative de la couche semi-conductrice a engendré une diminution du champ électrique au niveau de cette couche, sans pour autant affecter le champ électrique dans les autres couches de la jonction.

Références Bibliographiques

Références Bibliographiques

- [1] G. F. Moore. Electric Cables Handbook. Third Edition. Bristol, UK : Blackwell Science Ltd, 2006.
- [2] M. Pays. Câbles de transport d'énergie : Applications, Techniques de l'ingénieur, Vol. D4521, Décembre 1994.
- [3] W. A. Thue. Electrical Power Cable Engineering. Third Edition. New York, USA : CRC Press, 2011.
- [4] A. Haddad and D. Warne. Advances in High Voltage Engineering. London, UK : The Institution of Engineering and Technology (IET), 2007.
- [5] W. A. Thue. Electrical Power Cable Engineering. Second Edition. New York, USA : MARCEL DEKKER, 2005.
- [6] R. Tellier. Câbles de transport d'énergie. Paris, France : École supérieure d'Électricité, Division électricité et électronique, Université de Paris, 1968.
- [7] Y. Wang et al, "Design of Partial Discharge Test Environment for Oil-Filled Submarine Cable Terminals and Ultrasonic Monitoring", Energies, Vol. 12, pp. 4774-4788, 2019.
- [8] G. Chen et al, "Review of High Voltage Direct Current Cables", CSEE Journal of Power and Energy Systems, Vol. 1, No. 2, pp. 9-21, 2015.
- [9] <http://fr.coppercanada.ca/videos-publications/publications/pub21/21e-section6.html> ; [Consulté le 02/02/2020].
- [10] www.assemblee-nationale.fr/rap-oechst/lignes_elect/i3477.asp ; [Consulté le 02/02/2020].
- [11] I. Klutsch. Modélisation des supraconducteurs et mesures. Thèse de Doctorat : Génie Electrique, Grenoble : Institut national polytechnique de Grenoble, 2003.
- [12] K.Adachi, H.Suganeet al, "Development of superconducting triaxial cable", 12th IEEE International Conference on the Properties and Applications of Dielectric Materials, pp.190-193, Xi'an, China, May 20-24 2018.
- [13] A.T. Bulinski and J.R. Densley, "High Voltage Insulation for Power Cables Utilizing High Temperature Superconductivity", International Conference on Conduction and Breakdown in Solid Dielectrics, pp. 397-400, Sweden, June 22-25 1998.

- [14] www.cder.dz/spip.php?article1812 ; [Consulté le 02/02/2020].
- [15] A. Sayah. Analyse des Terminaisons d'Eau. Thèse de Doctorat : Génie Electrique, Oran : Université des Sciences et de la Technologie d'Oran - Mohamed Boudiaf, 2017.
- [16] T. L. Ying et C. Xiaolong, "A Novel Method for the Insulation Thickness Design of HV XLPE Cable Based on Electrical Treeing", IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, Vol. 21, No. 4, pp.1540-1546, August 2014.
- [17] W. F .B. Powers, "The Basics of Power Cable", IEEE Transactions on Industry Applications, Vol. 30, No. 3, pp. 506-509, May/June 1994.
- [18] L. Cao et S. Grzybowski, "Accelerated Aging Study on 15 kV XLPE and EPR Cables Insulation Caused by Switching Impulses", IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, Vol. 22, No. 5, pp. 2809-2817, October 2015.
- [19] G. Garcia. Le comportement du polyéthylène réticulé chimiquement soumis à l'action des décharges partielles. Thèse de Doctorat : Génie Électrique, Toulouse : Université Toulouse III - Paul Sabatier, 1980.
- [20] Y. Mecheri. Influence du mode de vieillissement thermique sur les propriétés du polyéthylène réticulé chimiquement utilisé dans l'isolation des câbles moyenne tension. Thèse de doctorat : Génie Électrique, Alger : Ecole Nationale Polytechnique, 2008.
- [21] V. Vahedy, "Polymer Insulated High Voltage Cables", IEEE Electrical Insulation Magazine, Vol. 22, No. 3, pp. 13-18, May/June 2006.
- [22] A. Medjdoub. Essais de systèmes de câble et caractérisation des matériaux utilisés dans l'isolation des câbles de haute tension. Thèse de Doctorat : Electrotechnique, Bejaia : Université Abderrahmane Mira, 2010.
- [23] 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 : Génie Électrique, Alger : Ecole Nationale Polytechnique, 2007.
- [24] S. O. Han et al, "Thermal degradation of Crosslinked high density polyethylene", Polymer Degradation and Stability, Vol. 63, No. 2, pp. 237-243, 1999.
- [25] G. C. Derringer et al, "Modeling Of Aging Of Solid Dielectric Materials In Multiple Stress Environment". 7th IEEE/PES Transmission and Distribution Conference and Exposition, pp.126-130, Atlanta, USA, April 1-6 1979.
- [26] E.L. Leguenza et al, "Dielectric behaviour of AC aged XLPE cables", IEE, Dielectric Materials Measurements and Applications, pp. 241-246, Edinburgh, UK, September 17-21 2000.

- [27] R. M. Eichhorn, "A critical comparison of XLPE and EPR for use as electrical insulation on underground power cables", IEEE Transactions on Electrical Insulation, Vol. EI-16, No.6, pp. 469-482, December 1981.
- [28] C. K. EOLL, "Theory of Stress Distribution in Insulation of High-Voltage DC Cables : Part I", IEEE Transactions on Electrical Insulation, Vol. EI-10, No. 1, pp. 27-35, March 1975.
- [29] T. Worzyk. Submarine Power Cables. London, UK : Springer-Verlag, 2009.
- [30] N. H. Malik, F. R. Pazheri et al, "Analytical Calculation of AC and DC Electric Field Distribution at High Voltage Cable Terminations", Arab J Sci Eng, Vol. 39, pp. 3051–3059, 2014.
- [31] C. Volât. Modélisation physique et numérique par la méthode des éléments finis de frontière de la distribution du potentiel et du champ électrique le long d'un isolateur standard de poste 735 kV recouvert de glace. Thèse de Doctorat : Génie Électrique, Chicoutimi : Université du Québec à Chicoutimi, 2002.
- [32] A. Nezzari. Mise en œuvre de modèles électromagnétiques 2D et 3D utilisant la méthode des différences finies dans le domaine temporel (FDTD) dans l'optique d'études d'éléments de circuits pour l'intégration monolithique millimétrique. Thèse de Doctorat : Génie Électrique, Lille : Université de Lille 1, 1993.
- [33] T. ITOH. Numerical Techniques for Microwave and Millimeter Wave Passives Structures. New Jersey, USA : J.Wiley and Sons, 1989.
- [34] S. Bennoud et M. Zergoug. Résolution numérique des équations du maxwell dans le cas quasi-stationnaire. 13ème Congrès de Mécanique, Meknès, Maroc, 11-14 Avril 2017.
- [35]. Z. Ren. Contribution à la modélisation des systèmes électromagnétiques tridimensionnels. Habilitation à diriger des recherches : Génie Électrique, Paris : Université Paris sud, 1997.
- [36] K. Rajagopala, K. P. Vittal et al, "Computation of Electric Field and Thermal Properties of 3-Phase Cable", TELKOMNIKA, Vol.10, No.2, pp. 265-274, June 2012.
- [37] E. Kuffel et al. High Voltage Engineering. Vol. 2, Great Britain : Newnes, 2000.
- [38] G. E. Forsythe and W.R. Wasow. Finite-Difference Methods for Partial Differential Equations. New York, USA : John Wiley, 1960.
- [39] K. J. Binns and P. J. Lawrenson. Analysis and Computation of Electric and Magnetic Field Problems. Second Edition, UK : PergamonPress, 1973.
- [40] V. Manet. Méthode des éléments finis. France : Creative Commons, 2013.
- [41] O. C. Zienkiewicz. The Finite Element Method in Engineering Science. Third Edition, Blacklick, Ohio, USA : McGraw-Hill, 1971.

- [42] N. A. Demerdash and T.W. Nehl. "An evaluation of the methods of finite elements and finite differences in the solution of nonlinear electromagnetic fields in electrical machines", IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems Vol.PAS-98, No.1 , pp. 74–87, 1979.
- [43] P. Unterweger. "Computation of magnetic fields in electrical apparatus", IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, Vol.PAS-93, No. 3, pp. 991–1002, 1973.
- [44] E. F. Fuchs et G. A. McNaughton. "Comparison of first-order finite difference and finite element algorithms for the analysis of magnetic fields. Part 1 : Theoretical analysis, Part II : Numerical results", IEEE Transactions on Power Apparatus and System, Vol.101, No. 5, pp. 1170-1201, 1982.
- [45] W. Janischewskyj et G. Gela, "Finite element solution for electric fields of coronating dc transmission lines", IEEE Transactions on Power Apparatus and System, Vol. PAS-98, No.2, pp. 1000-1012, 1979.
- [46] H. Steinbigler et al. "A charge simulation method for the calculation of high voltage fields", IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, Vol. PAS-93, No.5, pp. 1660-1668, 1974.
- [47] M. Pays. Câbles de transport d'énergie : Technologies. Caractéristiques, Vol. D4520, Techniques de l'ingénieur, Décembre 1994.
- [48] H. Ye et al, "Review on HVDC cable terminations", Institution of Engineering and Technology (IET) Journals, Vol. 3, No.2, pp. 79-89, June 28 2018.
- [50] S. V. Nikolajevic et al. "The Influence Of Some Construction Parameters On Electric Stress Grading In Xlpe Cable Terminations", 14th International Conference and Exhibition on Electricity Distribution. Part 1. Contributions, pp. 3.15.1-3.15.4, Birmingham, UK, June 2-5 1997.
- [51] S. V. Nikolajevic et al. "Optimization Of Cable Terminations", IEEE Transactions on Power Delivery, Vol. 12, No. 2, pp. 527–532, April 1997.
- [52] A. Roberts. "Stress Grading for High Voltage Motor and Generator Coils", IEEE Electrical Insulation Magazine, Vol. 11, No. 4, pp. 26-31, July-August 1995.
- [53] "Installation Instruction, EPP-0277-12/02, Terminations for Screened 3-Core Polymeric Insulated Cables 7.2 kV to 36 kV", Tyco Electronics Raychem GmbH.
- [54] COMSOL Multyphysics User's Guide, version 4.3, 2012.
- [55] CHAMPANEY, Laurent. Attention aux singularités ! : cours [on ligne]. Paris : Ecole Normal Supérieure Paris-Saclay, 2012, contenant 11 pages. [consulté le 20/05/2020]. Disponible sur : <eduscol.education.fr/sti/sites/eduscol.education.fr/sti/files/ressources/pedagogiques/8304/8304-attention-aux-singularites-ensps.pdf>.

- [56] A. Eigner, S.Semino, "50 years of electrical-stress control in cable accessories", IEEE Electrical Insulation Magazine, Vol. 29 , No. 5, pp. 47-55 , August 2013.
- [57] E. Sharifi-Ghazvini. Analysis of Electrical and Thermal Stresses in the Stress Relief System of Inverter Fed Medium Voltage Induction Motors. Doctoral thesis : Electrical and Computer Engineering, Ontario : University of Waterloo, 2010.
- [58] G. Baş. Electric Field Analysis In Stress Controlled High Voltage Cables. Master Of Science : Electrical And Electronics Engineering, Ankara : The Graduate School Of Natural And Applied Sciences Of Middle East Technical University, January 2005.
- [59] K. Väkeväinen. The Effect Of Material Properties To Electric Field Distribution In Medium Voltage Underground Cable Accessories. Degree Thesis : Electrical Engineering, Helsinki : Arcada University of Applied Sciences, 2010.
- [60] J. P. Rivenc, T. Lebey, "An overview of electrical properties for stress grading optimization", IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, Vol. 6 , No. 3, pp. 309-318, Jun 1999.
- [61] M. R. Hesamzadeh et al." An Advanced Optimal Approach for High Voltage AC Bushing Design", IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, Vol. 15, No. 5, pp. 461-466, April 2008.
- [62] T. Christen et al. "Nonlinear resistive electric field grading part 1 : Theory and simulation", IEEE Electrical Insulation Magazine, Vol. 26, No. 6, pp. 47-59, November/December 2010.
- [63] P.N.Nelson, H.C.Hervig. "High Dielectric Constant Materials For Primary Voltage Cable Terminations", IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, Vol. PAS-103, No. 11, pp. 3211-3216, December 2010.
- [64] G.Greshnyakov et al. "Optimization of Capacitive and Resistive Field Grading Devices for Cable Joint and Termination", International Journal Of Energy, Vol. 9, pp. 24-30, 2015.
- [65] L.Donzel et al. "Nonlinear resistive electric field grading Part 2 : Materials and applications", IEEE Electrical Insulation Magazine, Vol. 27 , No. 2, pp. 18-29 , March 2011.
- [66] H. A.Illias et al. "Electric field distribution in 132 kV XLPE cable termination model from finite element method", IEEE International Conference on Condition Monitoring and Diagnosis, Bali, Indonesia, pp. 80-83, September 23-27 2012.
- [67]. Metwally et al. "Reduction of Electric-Field Intensification and Hot-Spot Formation inside Cable Terminations", 17th IEEE Mediterranean Electrotechnical Conference, Beirut, Lebanon, pp.193-197, April 13-16 2014.
- [68] F. Madidi et al. "Dielectric Properties of TiO₂/Silicone Rubber Micro- and Nanocomposites", Advances in Materials Science and Engineering, Vol 2018, pp. 4682076-4682083, 2018.

- [69] H. M. Ryan. High-Voltage Engineering and Testing. Third Edition. London, UK : Institution of Engineering and Technology (IET), 2013.
- [70] www.nexans.fr/eservice/France-fr_FR/navigateproduct_540237610/J3UP_RF_RSM_24_50_240_Al_Cu_Compacte.html#doc_and_info ; [Consulté le 30/05/2020].
- [71] www.nexans.fr/eservice/France-fr_FR/navigateproduct_540166437/E3UIC_RF_RSM_24_50_240_Al_Cu.html#doc_and_info ; [Consulté le 30/05/2020].
- [72] msgy.en.ec21.com/Nexans_High_Voltage_Porcelain_Outdoor-5780284_5780452.html ; [Consulté le 12/05/2020].
- [73] <https://www.indiamart.com/proddetail/extra-high-voltage-ehv-outdoor-termination-up-to-245-kv-20889093648.html> ; [Consulté le 30/05/2020].
- [74] www.industrieregion-hochfranken.de/unternehmen/nexans-power-accessories-germany-gmbh/ ; [Consulté le 30/05/2020].
- [75] H. A.Illias et al." Distribution of electric field in medium voltage cable joint geometry". IEEE International Conference on Condition Monitoring and Diagnosis, pp.1051-1054, Bali, Indonesia, Sept 23-27 2012.