

Université des Sciences et de la Technologie
HOUARI BOUMEDIENE

Faculté d'Electronique et d'Informatique



THESE

Pour l'obtention du Grade du :

DOCTORAT

En Electronique

Spécialité : Instrumentation et Génie des Systèmes.

Par : **Salah BELKHIR**

THEME :

Etude des Distances Minimales d'Approche pour Travaux sous Tension dans les Ouvrages à Haute Tension

Soutenue publiquement, le 17 Janvier 2011, devant le jury composé de :

| | | |
|---------------------------------------|--|--------------------|
| M ^f . BOUBAKEUR Ahmed | Professeur à l'ENP | Président |
| M ^f . MOULAI Hocine | Maitre de conférences/A à l'USTHB | Directeur de Thèse |
| M ^f . MEKHALDI Abdelouahab | Professeur à l'ENP | Examineur |
| M ^f . TEGUAR Madjid | Professeur à l'ENP | Examineur |
| M ^f . BOUAZABIA Slimane | Maitre de conférences/A à l'USTHB | Examineur |
| M ^f . NACER Azzeddine | Maitre de conférences/A à l'USTHB | Examineur |
| M ^f . SOUKEUR Fath-Allah | Directeur de Maintenance à GRTE-Sonelgaz | Invité |

Remerciements.

Le travail de cette thèse de Doctorat a été réalisé à l'Université des Sciences et de la Technologie Houari Boumediene d'Alger "USTHB" sous la direction de Monsieur Hocine MOULAI, maître de conférences à l'USTHB, que je tiens à remercier pour sa disponibilité, son soutien, ses encouragements, sa rigueur, son esprit visionnaire, ses qualités humaines et sa fidélité dans le travail envers ma personne.

J'adresse mes vifs remerciements à Monsieur Ahmed BOUBAKEUR, Professeur à l'Ecole Nationale Polytechniques d'Alger "ENPA", pour avoir accepté de juger ce travail et m'avoir fait l'honneur de présider le jury de soutenance.

Aussi, mes sincères remerciements vont à l'adresse de Messieurs Abdelouahab MEKHALDI et Madjid TEGUAR, Professeurs à l'Ecole Nationale Polytechniques d'Alger "ENPA" et Slimane BOUAZABIA et Azzeddine NACER, maîtres de conférences à l'USTHB pour leur disponibilité à m'aider et avoir accepté d'examiner ce travail et de faire partie du jury de soutenance.

Mes remerciements vont à l'adresse de Monsieur Fath-Allah SOUKEUR, Directeur de la maintenance GRTE-SONELGAZ ainsi que Monsieur Mohamed DJEHA, responsable des Travaux sous Tension, pour l'intérêt qu'ils ont bien voulu accorder à ce travail en acceptant notre invitation à faire partie du jury de soutenance.

Que mes ami(e)s et collègues trouvent ici l'expression de mon estime et mes remerciements pour leurs encouragements sincères.

Avec les mêmes sentiments, j'adresse mes remerciements à Madame MOULAI, ses adorables enfants pour l'accueil chaleureux qu'ils m'ont réservé lors de mes rencontres avec Monsieur Moulai à sa résidence.

Enfin, je remercie tous les membres de ma famille notamment mon épouse Zahia, mes jolies Amina et Sarah et mes grands Adel et Lamine pour leur soutien permanent et leur patience pendant les moments parfois difficiles, vécus durant la préparation de ce travail.

Que la santé, le courage, le travail et la réussite nous accompagnent "IN CHAA ALLAH"

Salah Belkhir

SOMMAIRE

| | |
|--|----|
| <u>Introduction Générale.</u> | 1 |
| <u>CHAPITRE1 : Travaux sous tension et distance de sécurité.</u> | 3 |
| Introduction | 3 |
| I-Différents travaux exécutés sous tension. | 4 |
| II- Méthodes d'intervention sous tension | 4 |
| II.1-Travail à distance | 4 |
| II.2-Travail au potentiel | 4 |
| II.3-Travail au potentiel intermédiaire (potentiel flottant) | 5 |
| II.4-Travail au contact | 5 |
| III- Conditions de travail sous tension sécurisé | 7 |
| IV- Distances de sécurité et modes de calcul | 7 |
| IV.1- Calcul des distances minimales d'approche | 7 |
| IV.2-Distance minimale d'approche (D_A) | 8 |
| IV.3- Méthodologie | 9 |
| V-Calcul de la distance minimale d'approche par la norme CEI 61-472 | 9 |
| V.1- Calcul de la distance minimale d'approche par la norme CEI 61-472 | 10 |
| V.2- Calcul de la distance électrique D_U selon la norme IEEE | 17 |
| Conclusion | 18 |
| <u>CHAPITRE 2 : Claquage des grands intervalles d'air</u> | 19 |
| Introduction | 19 |
| I- Le champ disruptif | 19 |
| II-Evaluation des tensions de décharge | 19 |
| III- Caractéristiques relatives à la décharge disruptive | 24 |
| IV-Méthodes expérimentales de mesure de la tension disruptive | 25 |
| V- Contraintes des surtensions | 26 |
| VI-Surtensions de manœuvres | 27 |
| VII-Relations empiriques des tensions statistiques de tenue U_{50} | 29 |
| VII.1- Relations expérimentales | 29 |

| | |
|---|----|
| VII.2. Variations de la caractéristique $U_{50} = f(Du)$ | 35 |
| Conclusion..... | 36 |
| <u>CHAPITRE 3 : Intensité et variations du champ électrique : Approche Analytique.</u> .. | 37 |
| Introduction..... | 37 |
| I-Définitions..... | 37 |
| I.1-Intensité du champ électrique..... | 37 |
| I.2-Champs électriques en haute tension..... | 37 |
| II- Calcul Analytique..... | 38 |
| II.1-Les formules fondamentales..... | 39 |
| II.2- Système pointe-plan..... | 42 |
| II.3- Influence des paramètres : tension, distance inter –électrode et rayon de courbure sur le champ électrique | 44 |
| III- Champ électrique entre deux conducteurs aériens..... | 46 |
| IV- Champ électrique produit par un conducteur au voisinage du sol..... | 48 |
| V- Champ électrique autour des conducteurs de lignes..... | 49 |
| V.1- Système de deux conducteurs cylindriques..... | 49 |
| V.2- Champs électriques engendrés par les lignes aériennes..... | 52 |
| VI-Application: Calcul du champ électrique engendré par les lignes aériennes triphases à haute tension 220kV et 400kV..... | 56 |
| VI.1-Influence de la tension de la ligne sur le champ électrique..... | 58 |
| VI.2- Influence des dimensions du pylône sur le champ électrique..... | 59 |
| VI.3-Influence de la position des indices de phase sur le champ électrique..... | 61 |
| VII- Variations du champ électrique autour des conducteurs des lignes Aériennes triphasées..... | 62 |
| Conclusion | 66 |
| <u>CHAPITRE 4 : Intensité, variation et distribution du champ électrique</u> <u>Approche Numérique</u> | 67 |
| Introduction | 67 |
| I- Système pointe- plan | 67 |
| II- Système cylindre –paroi –plan..... | 73 |
| III- Configuration opérateur avec extension –paroi –plan | 76 |

| | |
|--|------------|
| IV-Configuration plan (pylône)-tige (conducteur) | 78 |
| IV.1- Influence de l'amplitude de la tension sur le champ électrique | 80 |
| IV.2- Influence de la distance inter-électrodes sur le champ électrique | 81 |
| V-Configuration plan (pylône) avec extension -tige (conducteur) | 82 |
| VI- Système à trois conducteurs cylindriques..... | 84 |
| VI.1- Champ Electrique au niveau de lignes électriques triphasées..... | 84 |
| VI.2 - Champ Electrique au niveau des postes électriques triphasés..... | 86 |
| Conclusion..... | 87 |
| <u>CHAPITRE 5 : Résultats, Discussions et Perspectives.</u> | 89 |
| Introduction..... | 89 |
| I- Distribution du champ dans un système corps-plan-paroi..... | 89 |
| II-Variations des lignes équipotentiellles..... | 94 |
| III-Configuration disjoncteur – opérateur dans un environnement de poste..... | 96 |
| IV. Comparaison entre les différentes normes pour la détermination du champ électrique maximum..... | 99 |
| IV- Relations entre champ électrique et distance minimale d’approche (DMA)..... | 99 |
| V- Influence du rayon de courbure sur la distance minimale d’approche..... | 101 |
| VI-Discussions..... | 102 |
| Conclusion..... | 103 |
| <u>CONCLUSION GENERALE.</u> | 104 |
| <u>BIBLIOGRAPHIE.</u> | 106 |

En haute et très haute tension, le champ électrique existant autour des ouvrages de transport d'énergie électrique, lignes aériennes et postes atteint des valeurs tellement importantes qu'il pose des contraintes dans la conception des ouvrages, le tracé des lignes de transport et les travaux sous tension.

Ces contraintes sont imposées par les décharges électriques entre électrodes (phase-terre, phase-phase, phase-pylône ...) suite à des surtensions de manœuvres et/ou de foudre survenues sur le réseau électrique ou d'autres phénomènes dus surtout à la pollution. Dans une telle situation, le champ électrique peut atteindre des valeurs tellement importantes, dépassant le champ disruptif de l'air, et provoquer ainsi un arc électrique dans la zone de travail.

En conséquence, la qualité et le service continu de l'énergie électrique, facteurs importants que ce soit en développement économique qu'en vie sociale se trouvent affectés. En plus de cela, le manque à gagner causé par la mise hors service d'un ouvrage électrique pour une intervention fait que les distributeurs d'énergie électrique se sont vus obligés de réaliser des ouvrages électriques en tenant compte des nouvelles exigences de qualité et de continuité, et d'effectuer un maximum de travaux d'entretien et de réparation sur les ouvrages tout en étant sous tension. D'où l'introduction des travaux sous tension.

Ces travaux peuvent contribuer à éviter les coupures de courant qui créent des désagréments aux utilisateurs et représentent donc des coûts aussi bien pour les distributeurs que pour les consommateurs. De plus, ils peuvent diminuer les effets néfastes causés par les coupures de courant sur les performances des réseaux.

Aujourd'hui, l'utilisation de nouvelles techniques expérimentales et numériques ayant permis une meilleure compréhension des phénomènes de pré-décharge électrique dans l'air, de l'évaluation des tensions de décharge et l'analyse de la distribution du champ électrique ont rendus possibles les travaux sous tension ainsi que la réalisation d'ouvrages neufs plus performants et de qualité meilleure.

Dans le présent travail, nous étudions le champ électrique autour de structures haute tension. Une démarche analytique sera suivie pour estimer les valeurs du champ dans un domaine autour d'objets de formes relativement complexes soumises à la haute tension, notamment les configurations géométriques les plus rencontrées dans les lignes aériennes et postes électriques. Ce travail sera comparé aux simulations qui seront effectuées en utilisant des logiciels de calcul numérique.

Les résultats confortés seront exploités dans la détermination des distances minimales d'approche à respecter lors des travaux sous tension, conformément aux dispositions des normes CEI 61-472 et IEEE Std 516 [1, 2].

Actuellement, la distance minimale d'approche est évaluée par des relations empiriques déterminées à partir d'expériences réalisées sur des systèmes d'électrodes tige-plan, où l'électrode active est de forme cylindrique avec un rayon normalisé égal ou supérieur à 6.25 mm [1, 3].

Alors que le développement technologique et économique exige de plus en plus la miniaturisation des ouvrages et outils de travail, les relations recommandées par les normes et protocoles en vigueur comme la CEI et IEEE, utilisées jusqu'à présent, se trouvent non valides pour des configurations d'électrodes de rayons inférieurs à 6.25 mm et de niveau de tension très élevé [4].

L'un des objectifs attendus au terme de ces travaux de recherche est d'évaluer le champ électrique disruptif et les distances de sécurité pour des configurations proches des systèmes d'électrodes de rayon faible (inférieurs à 6.25 mm) pouvant être nécessaires lors de travaux sous tension exceptionnels, et de définir la distance de sécurité permettant à l'opérateur d'œuvrer en toute sécurité sur les ouvrages électriques avec des outils non normalisés.

Ainsi, nous apportons une contribution à la conception des ouvrages haute tension et d'outillages utilisés dans les travaux sous tension. Ceci est d'autant plus d'actualité que les opérations de travail sous tension ont tendance à devenir de plus en plus nombreuses, pouvant nécessiter parfois l'usage d'outils de précision dont les dimensions peuvent être assez acérées par rapport à celles communément considérées.

Les travaux de cette thèse sont répartis en cinq chapitres. Dans le premier, nous présentons les travaux sous tension, les différentes méthodes d'intervention et les recommandations et règles préconisées par les normes en vigueur.

Le deuxième, traite les phénomènes des décharges électriques dans l'air, les essais de claquage et l'approche des tensions statistiques de rupture diélectrique de l'air. Les relations empiriques obtenues par ses essais sont présentées.

Les chapitres trois et quatre sont respectivement réservés au calcul analytique et numérique du champ électrique pour diverses configurations géométriques des électrodes et différents niveaux de tension. Dans ces chapitres, nous montrons par une étude comparative que les résultats obtenus par des deux méthodes de calcul, analytique et numérique sont en bon accord. Cela nous permet d'étendre l'utilisation des logiciels numériques au calcul des distances de sécurité pour des configurations spécifiques non traitées par les normes et protocoles existants.

Enfin, dans le chapitre cinq, les résultats obtenus feront l'objet de développement de la techniques adoptée pour la détermination des distances d'approche pour les rayons d'outils non conventionnels. Il contient également des discussions et perspectives.

En conclusion générale, les travaux de recherche menés traitent les phénomènes du champ électrique, sa création et le calcul des valeurs critiques pouvant causées des décharges électriques dans l'air pour des configurations géométriques d'électrodes proches de celles rencontrées dans les ouvrages électriques hautes tensions. Les résultats obtenus trouvent leurs applications dans la détermination de la distance minimale d'approche assurant la sécurité de l'opérateur menant des travaux sur une ligne haute tension en service.

Introduction.

De nos jours, de nombreux travaux s'effectuent sur les ouvrages électriques haute tension en service par des opérateurs qualifiés. Les travaux sous tension peuvent contribuer à éviter les coupures de courant qui créent des désagréments aux utilisateurs et représentent des coûts aussi bien pour les distributeurs que les consommateurs.

Les travaux sous tension sont effectués dans les zones mises sous tension électrique, notamment lignes aériennes et postes de transformation HT et THT. Les opérations de travail sont basées sur des techniques et méthodes adoptées par des associations et/ou centres de recherche dans le domaine, comme [1, 2] :

La **CEI**: Commission d'Electrotechnique Internationale.

La **IEEE**: Institute of Electrical and Electronics Engineers.

En plus des techniques et méthodes utilisées, nous avons besoin d'outillages et équipements qui s'adaptent aux conditions de sécurité du personnel comme les perches isolantes, gants, pinces etc.

Dans ce cadre, la normalisation des outillages, matériels et dispositifs utilisés pour effectuer des travaux sous tension contribuent à l'amélioration des conditions de sécurité des travailleurs [3, 4].

A cet effet, des procédures normalisées sont strictement appliquées selon la situation de l'opérateur par rapport aux pièces et conducteurs sous tension (actifs) et des moyens matériels de protection qu'il emploie pour se prémunir contre les risques d'électrocution et de court circuit. On distingue trois méthodes de travaux sous tension utilisées en HT et THT: travail à distance, au potentiel et au potentiel intermédiaire (figures 1.1a, 1b et 1c) [1].

Chaque méthode considère que l'opérateur risque d'être soumis à une différence de potentiel disruptive. Il convient alors de le protéger soit par respect d'une distance supplémentaire à la distance électrique, soit à l'aide des outils et matériels agréés, contre les risques de contact et d'amorçage avec les pièces conductrices portées à un potentiel autre que celui des pièces situées dans son environnement [5,6].

Chaque méthode a ses propres techniques et est utilisée de manière appropriée où elle présente le plus de sécurité et la facilité ou la simplicité d'exécuter les travaux.

A cet effet, des zones de travail sont délimitées pour chaque méthode par la distance minimale d'approche (DMA) notée D_A . Cette dernière est définie comme la somme de la distance de tension D_u dépendant directement de la tension et d'une distance D_E de garde, ou ergonomique, ayant pour objet de libérer l'opérateur du souci du respect de la distance de tension [1,7].

I- Différents travaux exécutés sous tension.

L'utilisation des trois méthodes de travail sous tension a permis de réaliser la quasi-totalité des travaux d'entretien et de réparation des lignes aériennes du réseau de distribution publique et des postes de transformation [8-11].

On peut citer :

- ✦ Nettoyages des chaînes d'isolateurs pour les lignes aériennes, sectionneurs et disjoncteurs.
- ✦ Le remplacement des isolateurs, en ancrage et en alignement.
- ✦ La pose ou le remplacement des pinces d'ancrage et d'alignement.
- ✦ Le réglage et la réparation des conducteurs.
- ✦ La modification d'un armement.
- ✦ Le remplacement ou la réparation d'un matériel tel qu'un interrupteur aérien ou un transformateur sur poteau.
- ✦ Le remplacement des disjoncteurs et sectionneurs.
- ✦ Le remplacement d'un support.
- ✦ Le raccordement ou l'ouverture et la fermeture d'un circuit.

II- Méthodes d'intervention sous tension [1,7].

II.1-Travail à distance.

Un travail est effectué à distance lorsque le monteur est en contact avec la terre, soit directement sur un support, soit par l'entremise d'un dispositif quelconque (fig.1.1a). Le monteur intervient sur la pièce sous tension à l'aide d'outils montés à l'extrémité des perches isolantes. Il doit en permanence maintenir entre lui et la pièce sous tension une distance minimale d'approche. Cette méthode est utilisée sur les réseaux de tensions nominales à partir de 63 kV jusqu'à 400 kV [1, 2, 5].

Les interventions qui s'effectuent sur les lignes à haute et très haute tension consistent entre autres à remplacer les chaînes d'alignement et les chaînes d'ancrage. Pour ces opérations, le monteur est positionné soit sur le pylône, soit sur une échelle qui permet d'améliorer son poste de travail. Pour cela, l'échelle doit être considérée comme étant au potentiel du sol.

Les interventions qui s'effectuent sur les postes à haute et très haute tension se font selon les principes et méthodes utilisés sur les lignes aériennes. On part du même principe sauf que l'outillage sera différent.

II.2-Travail au potentiel.

Dans cette situation, le monteur n'est pas relié à la terre; il est isolé de la masse. Il est plutôt directement en contact avec les pièces sous tension sur lesquelles il intervient et à chaque instant avec les pièces conductrices qu'il manipule (fig.1.1b).

L'opérateur se déplace sur une échelle isolante ou une nacelle isolante. Dans ce cas, le port d'un vêtement conducteur (combinaison conductrice) est nécessaire pour sa protection contre les effets du champ électrique en constituant une cage de Faraday [12-14].

Lorsque le monteur est au potentiel du conducteur, ce sont les pièces métalliques au potentiel du sol qui sont entourées d'une zone interdite et il doit alors maintenir entre lui et ces pièces une distance au moins égale à la distance minimale d'approche.

Cette technique de travail sous tension ne s'applique qu'aux lignes à très haute tension (THT). Elle est couramment employée pour intervenir sur des pièces de lignes aériennes (visite de pinces, remplacement de raquettes de garde, pose de bretelles, etc.). Aussi, on peut changer les sectionneurs, même les disjoncteurs par l'utilisation d'outillages et de techniques spécifiques.

II.3-Travail au potentiel intermédiaire (potentiel flottant).

La troisième méthode de travail utilisée pour les travaux sous tension est celle du travail au potentiel intermédiaire. L'opérateur est isolé de la terre et n'est pas directement au contact avec les pièces sous tension sur lesquelles il intervient (fig.1.1c). Il se déplace sur une échelle isolante, dans une nacelle isolante ou sur une plate-forme isolante; on dit qu'il est à potentiel flottant.

Cette méthode combine les techniques de la méthode à distance et celles de la méthode au potentiel. En effet, le monteur utilise les mêmes outils isolants que ceux employés pour les travaux à distance et il est isolé de la terre, comme dans le cas des travaux au potentiel. Cependant, au lieu de travailler en étant directement en contact avec les pièces sous tension, le monteur se place plutôt sur une partie isolante.

Dans la méthode du travail au potentiel intermédiaire, plus que dans les deux autres méthodes, il est extrêmement important que le monteur ne s'approche pas à plus d'une certaine distance des pièces sous tension. Pour se déplacer à proximité d'une pièce sous tension, le monteur ne doit jamais dépasser une distance minimale appelée distance de tension (D_U).

Par ailleurs, pour travailler, le monteur doit se placer de façon à respecter une autre distance minimale, plus grande que la précédente, celle-ci est appelée distance de travail (D_A). Comme mesure supplémentaire de protection, les perches isolantes sont munies de garde-main c'est-à-dire d'un anneau posé sur la perche et qui fixe la limite que les mains du monteur ne doivent pas dépasser.

II.4-Travail au contact.

Enfin, la dernière méthode est celle du travail au contact. L'opérateur, porté par un élévateur à nacelle isolante ou d'une plate-forme isolante (fig.1.1d), et équipé de gants isolants et de protège-bas isolants, touche les pièces sous tension sur lesquelles il intervient. Il maintient, pour les parties du corps non protégées, des distances dans l'air suffisantes pour assurer une bonne protection. Ce travail est bien adapté pour les domaines de la basse et de la moyenne tension.

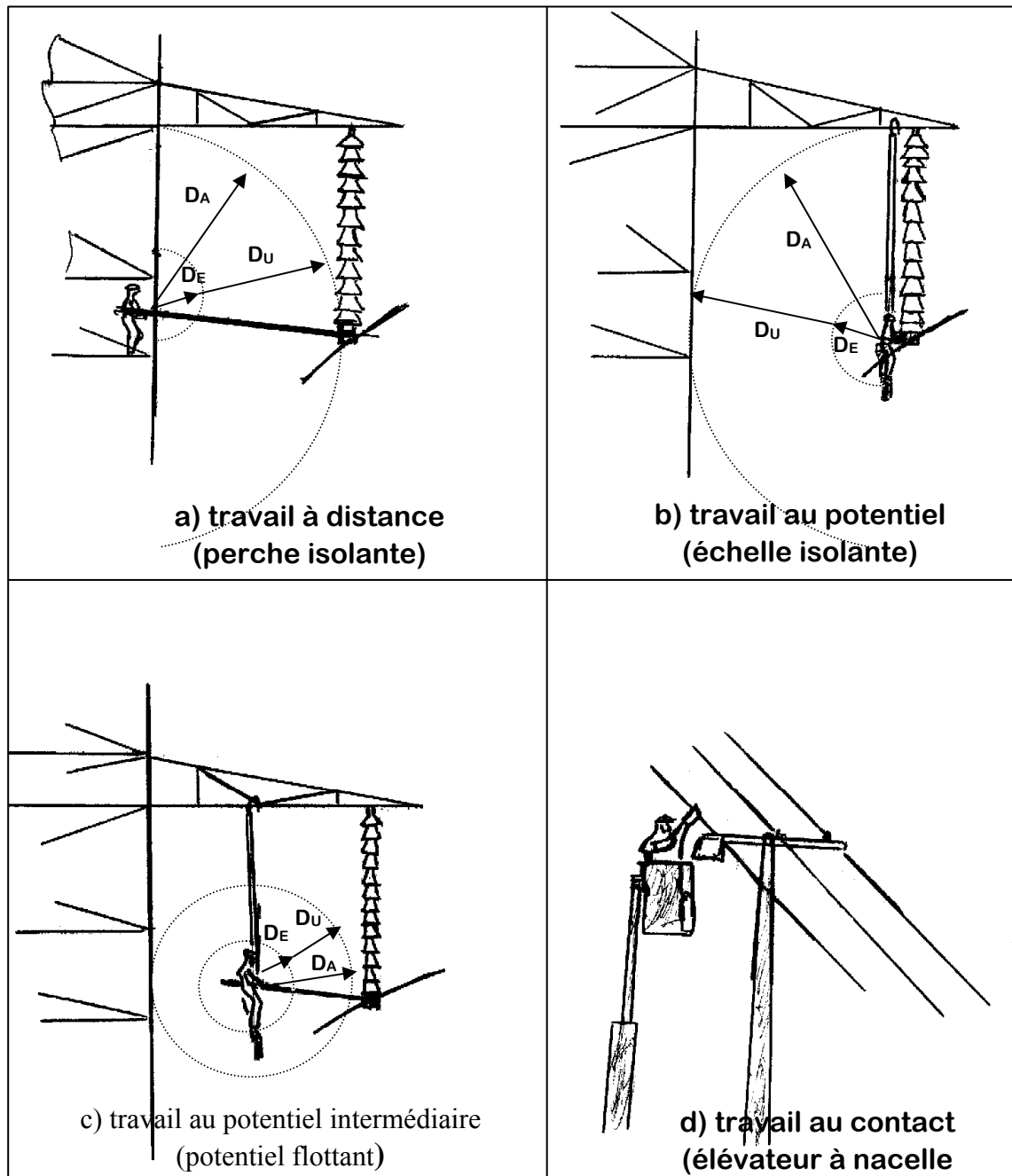


Figure 1.1 : Différentes méthodes de travaux sous tension.

III- Conditions de travail sous tension sécurisé.

Pour rendre le travail sous tension sécurisé, en plus des distances minimales d'approche, on respecte d'autres conditions liées à l'état atmosphérique du site et à la qualification du personnel [1, 2, 4].

1- Conditions liées à l'atmosphère.

Aucun travail sur lignes ne doit être entrepris lorsque les conditions atmosphériques sur le site du travail sont les suivants [1, 2]:

- Orages, soit par apparition d'éclairs, soit perception de tonnerre.
- Brouillard épais, qui réduit la visibilité de telle façon que les opérateurs au sol ne peuvent distinguer les opérateurs sur les supports.
- Conditions atmosphériques importantes qui gênent la visibilité des opérateurs ou qui forment des gouttelettes d'eau sur les parties isolantes des perches.
- Vent violent qui empêche une utilisation précise des outils.

2- Conditions liées aux personnels.

Les personnes appelées à travailler sous tension doivent avoir reçu une formation spécifique. Cette formation doit être assurée par un établissement agréé : le Comité des Travaux sous Tension et suivant des programmes approuvés par cet organisme.

IV- Distances de sécurité et modes de calcul.

La maintenance et la réparation des réseaux de transport font appel aux techniques de Travaux Sous Tension. Plusieurs recherches sont menées dans le but de développer des techniques d'intervention et de faciliter les travaux sous tension, d'où des gains sur la qualité et la continuité de service des réseaux électriques et une protection des travailleurs.

Parmi ces techniques et méthodes de travail sous tension utilisées, la technique de calcul des distances minimales d'approche revêt un caractère essentiel pour assurer la facilité du travail et la sécurité des opérateurs.

IV.1- Calcul des distances minimales d'approche.

Dans ce travail, nous présentons la méthodologie suivie pour la détermination des distances minimales d'approche [1, 2, 5] et les méthodes ou protocoles agréés par les institutions et associations spécialisées. Une illustration de ces calculs sera présentée sur des cas pratiques relatifs aux lignes aériennes et postes haute tension. Une évaluation des tensions

de décharge et la méthodologie suivie pour la détermination des surtensions statistiques de décharge ainsi que la pertinence de chaque type de surtension sont cependant nécessaires.

IV.2-Distance minimale d'approche (D_A).

C'est la distance minimale dans l'air qui doit être maintenue entre n'importe quelle partie du corps du monteur ou tout outil conducteur qu'il manipule, et les parties portées à des potentiels différents.

Elle est définie de manière plus explicite dans la figure 1.2 pour les travaux au potentiel et la figure 1.3 pour un travail à distance.

La distance minimale d'approche D_A est déterminée par:

$$D_A = D_U + D_E \quad (1.1)$$

où : D_U (distance électrique) est la distance dans l'air qui protège d'un claquage pendant le travail sous tension et D_E est la distance ergonomique qui tient compte de la maîtrise de la distance minimale d'approche mise en œuvre au cours des procédures de travail. La valeur de D_E recommandée est prise égale à 50 cm en haute tension (U supérieure à 1000 V) et 30 cm en basse tension (U inférieure à 1000 V) [1, 2, 4].

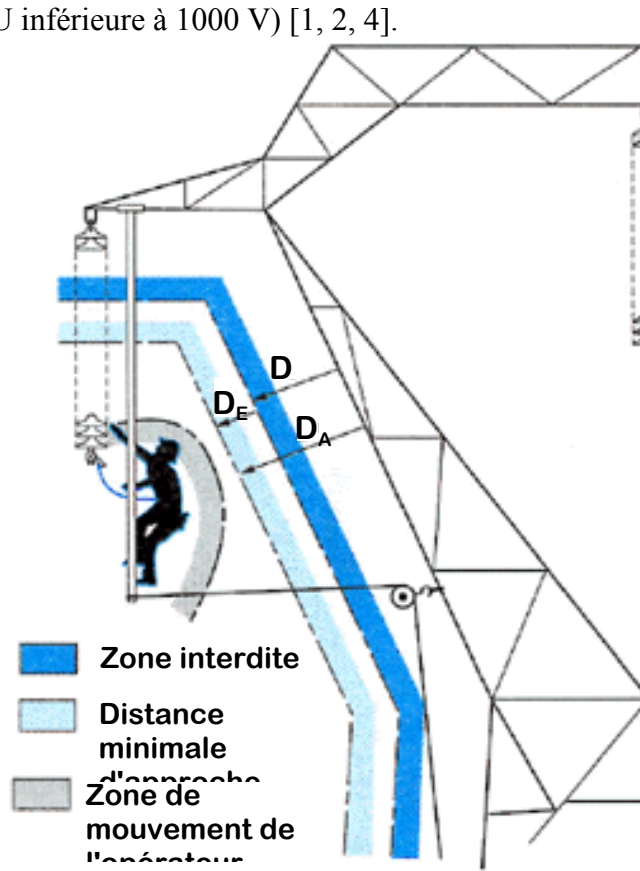


Figure 1.2: Configuration des différentes distances. Cas d'un travail au potentiel [9].

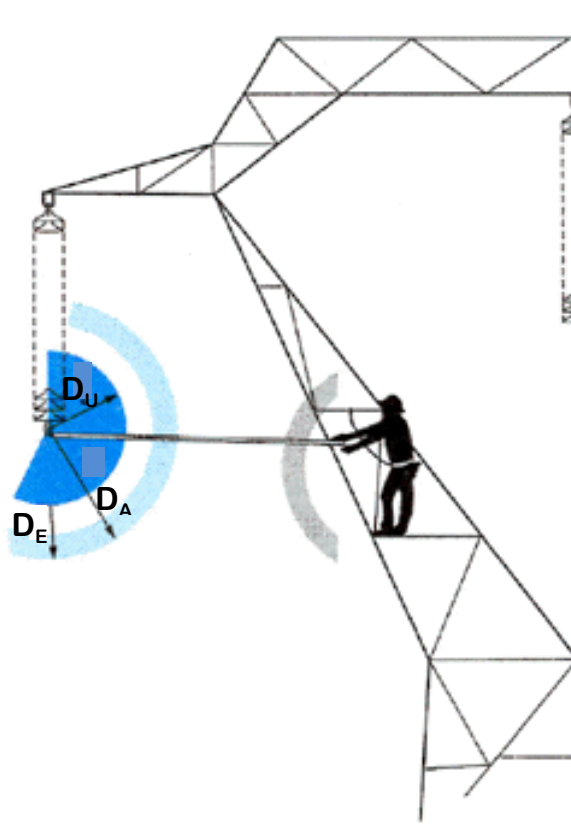


Figure 1.3: Configuration des différentes distances. Cas d'un travail à distance [9].

IV.3- Méthodologie.

La méthode de calcul de la distance minimale d'approche D_A repose sur trois considérations [1,14-17] :

a- Déterminer la surtension statistique U_2 attendue dans la zone de travail (valeur de la surtension ayant une probabilité de 2% d'être dépassée), et à partir de celle-ci déterminer la surtension statistique U_{90} pour laquelle l'isolation requise présente une probabilité de tenue de 90 %.

b- Calculer la distance électrique minimale D_U correspondant à U_{90} .

c- Ajouter une distance supplémentaire D_E pour prendre en compte les facteurs ergonomiques associés au travail sous tension tels que les mouvements involontaires de l'opérateur.

V-Distances électriques minimales dans les travaux sous tension.

Dans le but de présenter une méthodologie de détermination des distances minimales d'approche en fonction du niveau de tension de la ligne que chaque opérateur se doit de respecter, nous estimerons les différents facteurs intervenant dans les calculs en se basant sur les deux normes suivantes [1, 2] :

- ✓ CEI 61-472.
- ✓ IEEE std 516.

V.1 Calcul de la distance minimale d'approche par la norme CEI 61-472 [1].

Pour tout travail sous tension, des conditions d'application doivent être respectées. La norme CEI 61-472 exige que :

- Les opérateurs soient formés et qualifiés pour travailler sous tension ou près des conducteurs sous tension.
- Les conditions d'exploitation soient adaptées de manière que la surtension statistique ne dépasse pas la valeur choisie pour la détermination de la tension de tenue requise.
- Les surtensions transitoires soient les surtensions déterminantes.
- L'isolation des outils ne présente pas sur la surface un film continu d'humidité.
- Aucun éclair n'est observé à moins de 10 km du lieu de travail.
- L'influence des parties conductrices des outils soit prise en compte.
- L'effet de l'altitude sur la tenue diélectrique soit pris en compte.

V.1.1-Facteurs intervenant dans le calcul de la distance électrique [1, 5].

V.1.1.1-Surtension statistique.

En coordination de l'isolement, il est très commode d'exprimer toutes les contraintes de tension en une unité appelée par unité (pu) définie par référence à la tension phase-terre la plus élevée U_s du réseau sur lequel sont évaluées les surtensions.

On parlera dans la suite de surtensions de 2 ou 3 pu au lieu de les exprimer en kilovolts. L'avantage de cette unité est que, pour les surtensions générées par les manœuvres ou les défauts, les amplitudes exprimées en p.u sont du même ordre de grandeur quelle que soit la tension du réseau.

La valeur par unité de l'amplitude d'une surtension ou d'une tension rapportée à u est :

$$1 \text{ p.u} = U_s \sqrt{2} / \sqrt{3}$$

La contrainte électrique dans la zone de travail doit être connue. Elle est caractérisée par la surtension statistique qui peut exister dans la zone de travail. Dans un réseau alternatif triphasé, la surtension statistique U_{e2} entre phase et terre est :

$$U_{e2} = \frac{\sqrt{2}}{\sqrt{3}} \cdot U_s \cdot u_{e2} \quad (1.2)$$

Où :

U_s : la tension entre phase de service du réseau dans les conditions d'exploitation normale.

u_{e2} : La surtension statistique phase-terre exprimée par unité de l'amplitude de la surtension de manœuvres.

De la même manière, la surtension statistique U_{p2} phase-phase peut s'écrire :

$$U_{p2} = \frac{\sqrt{2}}{\sqrt{3}} \cdot U_s \cdot u_{p2} \quad (1.3)$$

u_{p2} : la surtension statistique phase - phase exprimée par unité de l'amplitude de la surtension de manœuvre.

Les valeurs des surtensions statistiques doivent être celles mesurées ou déterminées à l'aide des études sur un analyseur de transitoire de réseau ou sur ordinateur [18-20]. De telles études doivent fournir les surtensions statistiques (valeur à 2%). Mais si seulement la tension maximale est connue, cette valeur est prise comme valeur tronquée sans connaissance de la distribution statistique des valeurs typiques. Elle peut être utilisée quand aucune autre valeur n'est disponible (tableau 1.1 et 1.2) [1, 5].

Tableau 1.1 : Surtension statistique de manœuvres à 2% entre phase-terre.

| Tension la plus élevée du réseau U_s (kV _{eff}) | Surtension de manœuvres à 2 % u_{e2} (pu) | | | |
|--|---|-----------------|-----------------------------------|-----------------|
| | Fermeture | | Ré-enclenchement des trois phases | |
| | Sans résistance | Avec résistance | Sans résistance | Avec résistance |
| > 72.5 à 245 | 2.3 | - | 3.0 | - |
| 300 à 550 | 2.2 | 1.8 | 2.6 | 2.1 |
| 800 | - | 1.8 | - | 2.0 |

Tableau 1.2 : Surtension statistique de manœuvre à 2% entre phase-phase.

| Tension la plus élevée du réseau U_s (kV _{eff}) | Surtension de manœuvres à 2 % u_{p2} (pu) | | | |
|--|---|-----------------|-----------------------------------|-----------------|
| | Fermeture | | Ré-enclenchement des trois phases | |
| | Sans résistance | Avec résistance | Sans résistance | Avec résistance |
| > 72.5 à 245 | 3.5 | - | 4.5 | - |
| 300 à 550 | 3.4 | 2.9 | 3.8 | 3.2 |
| 800 | - | 2.9 | - | 3.2 |

Si la valeur par unité de la surtension phase - phase n'est pas disponible, une valeur approchée peut être trouvée à partir de u_{e2} par la formule suivante [1, 21]:

$$u_{p2} = 1.33 u_{e2} + 0.4 \quad (1.4)$$

V.1.1.2-Tenue de l'intervalle.

Pour la détermination de la distance minimale d'approche, la tension de tenue requise pour le travail sous tension est prise égale à la tension U_{90} déterminée à partir de l'expression générale [1] :

$$U_{90} = K.U_2 \quad (1.5)$$

- K est un facteur statistique de sécurité (une valeur de 1.1 est recommandée par la C E I).

En considérant séparément les tensions phase-terre et phase-phase et en combinant l'équation (1.5) avec les équations (1.2) et (1.3) on obtient :

$$U_{e90} = K \cdot \frac{\sqrt{2}}{\sqrt{3}} \cdot U_s \cdot u_{e2} \quad (1.6)$$

$$U_{p90} = K \cdot \frac{\sqrt{2}}{\sqrt{3}} \cdot U_s \cdot u_{p2} \quad (1.7)$$

- U_{e90} et U_{p90} sont respectivement les tensions de tenue statistique phase-terre et phase-phase.

V.1.1.3- Facteurs de correction.

La tenue de l'intervalle est influencée par une série de facteurs qui peuvent être exprimés par un facteur K_t global [1]:

$$K_t = k_s \cdot k_g \cdot k_a \cdot k_F \cdot k_i \quad (1.8)$$

V.1.1.4- Facteur de dispersion conventionnelle k_s .

Le facteur d'intervalle prend en considération la nature statistique de la tension de claquage (en fonction de l'écart type). k_s : exprime une telle influence de nature statistique.

$$k_s = 1 - 0.0128 \delta_e \quad (1.9)$$

δ_e est la dispersion conventionnelle de la tension de décharge disruptive. Elle est déterminée comme la différence entre les tensions de décharge disruptive 50% et 16 % [21, 22]. Elle est souvent exprimée en valeur « par unité » ou en « pour cent », rapportée à la tension de décharge disruptive à 50%.

Si la fonction de probabilité de décharge disruptive est proche d'une fonction de répartition gaussienne, δ_e sera proche de son écart type.

A moins que la valeur de la dispersion conventionnelle normalisée ne soit connue à partir d'essais représentant la configuration de l'intervalle et de la distance utilisée, une valeur de 0,936 pourra être utilisée [1]. Cette valeur est basée sur une dispersion conventionnelle normalisée δ_e de 5% pour une onde de choc positive.

V.1.1.5-Facteur d'intervalle k_g .

Le facteur d'intervalle k_g tient compte des effets de la configuration de l'intervalle sur la tenue diélectrique de l'air.

Dans le cas où ce facteur ne puisse pas être obtenu à partir de la configuration du réseau pour un niveau de tension donné, une valeur conservatrice de $k_g=1,2$ est recommandée pour tenir compte des diverses configurations [10].

V.1.1.6-Facteur atmosphérique k_a .

La contrainte électrique dans l'air, dans la zone de travail, est affectée par l'altitude au-dessus du niveau de la mer. Cet effet qui varie dans une certaine mesure avec la tension de tenue, est traduit par le facteur atmosphérique k_a [1].

$$k_a = e^{-\left(\frac{H}{8264}\right)} \quad (1.10)$$

Où H en mètre est la hauteur au dessus du niveau de la mer.

Dans le dimensionnement des distances d'approche pour travaux sous tension les paramètres d'humidité de l'air et de pression n'ont pas été pris en compte car leur influence est relativement faible.

V.1.1.7- Facteur d'objet à potentiel flottant k_F .

Les objets à potentiel flottant peuvent décroître ou accroître la tenue diélectrique de l'intervalle à cause de la déformation du champ. Un objet conducteur placé entre deux conducteurs à potentiels différents et non connecté à aucun d'eux, est électriquement flottant et prend un potentiel intermédiaire.

Toutefois, la présence d'un ou plusieurs objets flottants réduit la longueur électrique nette de l'intervalle d'air. Les effets des objets flottants sur la tenue de l'intervalle sont pris en compte par un facteur d'objet flottant k_F . Il est préconisé les valeurs suivantes [1] :

- Quand aucun objet flottant n'est présent, $k_F = 1$.
- Le facteur objet flottant $k_F = 0,85$ doit être utilisé dans les trois cas suivants :

$U_s < 72,5 \text{ kV}$, $L > 150 \text{ mm}$, objet flottant fixe.

$U_s < 72,5 \text{ kV}$, $L > 300 \text{ mm}$, objet flottant mobile.

$U_s > 72,5 \text{ kV}$, $L > 300 \text{ mm}$, objet flottant mobile ou fixe.

Où, L est la plus grande dimension de l'un quelconque des objets flottants mesurée suivant l'axe de l'intervalle.

- Eléments non conducteurs avec les surfaces propres et sèches:
 - ✦ $k_F = 0.97$ pour le cas des surtensions de manœuvres.
 - ✦ $k_F = 0.9$ pour le cas des surtensions temporaires.
- Eléments conducteurs:

- ✦ Au potentiel fixe (à haute tension ou à la terre)

$$k_F = 1$$

- ✦ Au potentiel flottant :

- de faibles dimensions ($S < 0.2 \text{ m}$) $k_F = 1$

- de grandes dimensions ($S > 0.2 \text{ m}$) $k_F = 1 - (A/d)$ **(1.11)**

Avec :

S: longueur de l'objet flottant en mètre

A = 0.24 pour une configuration phase - terre ;

A = 0.50 pour une configuration phase - phase.

d : distance inter électrodes en mètre.

V.1.1.8 Isolateurs.

Les effets de la détérioration de l'isolation (chaines d'isolateurs) sur la tension de tenue dans la zone de travail doivent être pris en compte en s'assurant qu'une quantité minimale d'éléments d'isolation en bon état existe toujours pendant le travail près de l'isolation.

Elle est exprimée par le facteur k_i , tenant compte de la réduction de la tenue diélectrique suite à une détérioration d'éléments de la chaîne [1].

$$k_i = 1 - 0.8 \times k_d \frac{N_d}{N_0} \quad \text{(1.12)}$$

Avec :

N_d : Nombre d'éléments détériorés dans une chaîne de N_0 éléments.

k_d : Coefficient caractérisant l'état moyen des isolateurs des éléments détériorés, il est égal à 1 pour des isolateurs en verre trempé et est compris entre 0 et 1 pour les isolateurs en porcelaine, avec 0.75 comme valeur moyenne.

V.1.2-Tenue diélectrique de l'air.

L'onde de tension de choc de manœuvres normalisée utilisée dans les essais a une durée jusqu'à la crête de 250 μs . Les surtensions de manœuvres se produisant dans les réseaux en exploitation ont une durée jusqu'à la crête comprise entre 50 μs et 2000 μs . La durée jusqu'à la crête de cette surtension a une influence considérable sur la tension de décharge disruptive U_{50} d'un intervalle d'air et varie avec la longueur de l'intervalle [23-25].

Les intervalles d'air peuvent être caractérisés par la tenue minimale qui est observée avec la surtension transitoire de durée jusqu'à la crête critique, en fonction de la polarité de l'onde de choc, des caractéristiques géométriques de l'intervalle, principalement l'écartement et la configuration des électrodes. Parmi les différents intervalles de même écartement,

l'intervalle tige-plan (Rod-plane) en polarité positive présente pour une tension de choc de manœuvres, la tenue la plus faible.

D'où la détermination de l'intervalle de tenue électrique D_U en utilisant les relations empiriques déterminées par des essais statistiques sur une configuration d'électrodes tige-plan qui assure la tenue aux autres surtensions.

Parmi ces relations, pour des intervalles tige-plan d'écartement jusqu'à 25 m, la tenue diélectrique U_{50RP} est donnée par la relation empirique (1.13) [1].

$$U_{50RP} = 1080 \ln (0.46 D_U + 1) \quad (1.13)$$

U_{50RP} : tension statistique en kV ayant une probabilité de décharge de 50 % pour une configuration géométrique d'électrodes tige-plan.

D_U : distance électrique en mètre ayant une probabilité de tenue de 50 % correspondant à la tension U_{50RP} .

Pour d'autres configurations, et pour prendre en compte d'autres influences, la tension de tenue statistique U_{90} peut être déterminée en appliquant le coefficient K_t comme suit :

$$U_{90} = K_t U_{50RP} \quad (1.14)$$

$$U_{90} = K_t 1080 \ln (0.46 d + 1) \quad (1.15)$$

Pour calculer la distance électrique D_U correspondant à la tension de tenue statistique U_{90} requise de l'isolation dans la zone de travail, on se base sur l'équation (1.15).

En transformant cette équation, on obtient :

$$D_U = 2.17 \left(e^{\left(\frac{U_{90}}{1080 \cdot K_t} \right)} - 1 \right) \quad (1.16)$$

Et en prenant en compte la dimension F d'objets à potentiel flottant, on obtient l'expression de la distance électrique:

$$D_U = 2.17 \left(e^{\left(\frac{U_{90}}{1080 \cdot K_t} \right)} - 1 \right) + F \quad (1.17)$$

V.2- Calcul de la distance électrique D_U selon la norme IEEE.

En 1968, le comité IEEE sur les "Recommandations pour la maintenance et la sécurité pendant les travaux sous tension " avait publié des relations empiriques qui permettent le dimensionnement des distances électriques, et cela pour diverses gammes de surtensions transitoires maximales de manœuvres.

V.2.1- Calcul de la distance électrique D_U phase-Terre sans outils dans l'air pour une tension supérieure à 72.5 kV.

La relation générale pour déterminer la **distance électrique** en mètres dans une configuration phase-terre à 60 Hz, sous des tensions au-dessus de 72.5kV pour les travaux sous tension sans outils dans l'air, est indiquée par l'équation (1.18) [2].

$$D_U = 0.3048 [(C_1+a) \cdot u_{e2} \cdot V_{P-G}] \quad (1.18)$$

Avec :

- D_U : est la distance électrique phase-terre en mètres.
- 0.3048 est le facteur de conversion pour convertir les pieds en mètres.
- C_1 : est utilisé pour obtenir des distances en pieds. Pour une tension au-dessus de 50 kilovolts. Il est pris égal à 0,01 (1,0% de la tension phase-terre en kV) pour une fréquence de 60 Hz.
- a : est un facteur de surtension utilisé pour des surtensions de crête de 630 kV et plus.
- u_{e2} : valeur maximale par unité de surtension de manœuvres.
- V_{P-G} : est la tension phase-terre en kilovolts.

Le facteur "a" est égal à zéro quand la surtension statistique U_{e2} est inférieure à 630 kV.

* Pour une tension statistique de crête entre 630 et 1025 kV

$$a = (U_{e2} - 630) / 140\,000, \text{ arrondis à } 10^{-4} \quad (1.19)$$

* Pour une tension statistique de crête au-dessus de 1025 kV,

$$a = (U_{e2} - 683) / 124\,440, \text{ arrondis à } 10^{-4} \quad (1.20)$$

Avec :

$$U_{e2} = V_{P-P} \cdot (2/3)^{1/2} \cdot u_{e2} \quad (\text{kV}) \quad (1.21)$$

Où V_{P-P} est la tension entre phase (égale à la tension U_S de la ligne).

V.2.2- Calcul de la distance électrique D_U phase-terre avec outils dans l'air pour une tension supérieure à 72.5 kV.

La formule générale pour déterminer la **distance électrique** à 60 Hz, phase-terre, en mètres, au-dessus de 72.5 kV pour les travaux sous tension, avec outils dans l'air, est indiquée par l'équation (1.22) [2]:

$$D_U = 0.3048 [(C_1.C_2+a) .u_{e2} . V_{P-G}] \quad (1.22)$$

C_2 est composé d'une contribution supplémentaire tenant compte de l'effet de la ligne, des outils de travail et des actifs incorporels dans l'intervalle d'air. Ce supplément est variable et peut aller de 2% à 20% en fonction de la structure et la configuration des électrodes. Pour le calcul, une valeur de C_2 égale à 1,1 est utilisée.

Conclusion.

Les travaux sous tension sont basés sur la gestion des risques et sur la manière de s'en prémunir. Bien évidemment, ils ne sont envisageables que si tous les risques liés à la présence de la tension sont maîtrisés. Cela suppose l'étude et l'usage de procédures rigoureuses et d'outils fiables par du personnel parfaitement formé.

La connaissance de la distribution du champ électrique autour de ces ouvrages est nécessaire pour une meilleure optimisation dans leur conception et ainsi permettre l'exécution d'un grand nombre de travaux sous tension avec une aisance dans le travail et un maximum de sécurité.

Introduction.

En haute et très haute tension, le champ électrique peut atteindre des valeurs intenses capables de perforer le diélectrique (claquage de l'isolation). Le seuil critique du champ électrique disruptif dépend de plusieurs paramètres notamment, le niveau de tension, la nature et la forme de l'onde de la tension, les caractéristiques de l'isolation, la forme géométrique des électrodes ainsi que la distance inter-électrodes [26-28].

Dans ce chapitre, nous étudions l'influence des différents paramètres sur les décharges électriques et présenterons les essais statistiques d'appréciation des tensions disruptives dans l'air avec leurs relations correspondantes [1, 29-32].

I- Le champ disruptif.

Dans le cas d'un isolant gazeux notamment l'air, l'intensité du champ électrique provoquant une décharge disruptive dépend principalement de la pression, de la température et de l'humidité du gaz, de la configuration géométrique du système d'électrodes, de la forme et de la polarité (positive ou négative) de l'onde de la tension appliquée à l'électrode [33-35].

A la base, l'air est un bon isolant, mais sous des tensions de plus en plus élevées, les électrons libres présents dans l'air et créés par les agents extérieurs vont entrer en collision avec les molécules constituant le gaz avec des énergies de plus en plus grandes pour aboutir à l'ionisation du gaz. Pour qu'un tel phénomène se réalise il faut que le champ électrique superficiel au conducteur ait atteint une valeur suffisante.

En champ uniforme, dans les conditions normales de l'air, cette valeur est très voisine de 30 kV/cm, et le phénomène d'effet couronne évolue jusqu'au claquage de l'intervalle entre électrodes. Ce champ est appelé champ disruptif. D'où un critère simple servant à limiter l'effet couronne sur les lignes électriques consiste à assurer que le champ superficiel sur le conducteur ne dépasse pas une valeur efficace de l'ordre de 17 kV/cm [36,37].

En cas d'un champ non uniforme entre électrodes, d'un air pollué en matières conductrices (sels, métaux) et saturé en humidité, le champ disruptif peut être atteint à des valeurs plus faibles. En temps d'orage et sous un nuage d'orage 15 à 20 kV/cm suffisent pour créer des micros-décharges électriques appelés effet couronne. [6, 38].

II-Evaluation des tensions de décharge.

La détermination de l'intervalle de tenue diélectrique de l'air est basée sur les résultats d'essais statistiques en utilisant le modèle de Weibull [1, 5].

Ce modèle exprime la probabilité de rupture d'un diélectrique d'intervalle d soumis à une surtension de crête. La surtension peut être soit à fréquence industrielle, soit en choc de manœuvres ou de foudre.

Pour le lissage des points expérimentaux, on utilise les méthodes des moindres carrés et du maximum de vraisemblance.

Des essais portés sur des surtensions permanentes, de choc de manœuvres et de choc de foudre, il ressort que la valeur de la tension d'amorçage d'un intervalle "d" varie en fonction de la vitesse de montée du front. Pour un choc de manœuvres normalisé 250/2500 μ s, la tension de claquage est inférieure à celle d'un choc de foudre normalisé 1.2/50 μ s.

La rupture diélectrique est un phénomène aléatoire qui est bien décrit par le modèle de Weibull où le lissage peut être approché par des polynômes de degré 1, 2 ou 3 [1,39-42].

II.1- Définitions des paramètres usuels [1, 30].

Les types de tension sont :

- ✓ **Tensions nominales du réseau U_n** : Les tensions nominales du réseau sont données dans la CEI 60 71-1. Ces tensions sont associées à des domaines normalisés. La tension réelle du réseau peut ne pas être conforme à ces derniers.
- ✓ **Tension la plus élevée du réseau U_s** : est la valeur la plus élevée de la tension qui se présente à un instant et en un point quelconque du réseau dans des conditions d'exploitation normale.

En réalité, le calcul de la surtension est basé sur la tension la plus élevée du réseau U_s qui correspond généralement à la tension de service qui est spécifique au réseau exploité et qui peut être ou ne pas être connue. A moins que sa valeur réelle ne soit connue, U_s peut être déterminée à partir de la tension nominale du réseau en utilisant la valeur correspondante de la tension la plus élevée pour le matériel U_m , c'est à dire la valeur efficace la plus élevée de la tension phase-phase pour laquelle le matériel est conçu [CEI 60 038].

- ✓ **Les surtensions :**

Les surtensions peuvent être d'origine interne ou externe.

- **Origine interne.**

Ces surtensions sont causées par un élément du réseau considéré et ne dépendent que des caractéristiques et de l'architecture du réseau lui-même.

A titre d'exemple, la surtension qui apparaît à la coupure du courant magnétisant d'un transformateur.

- **Origine externe.**

Ces surtensions sont provoquées ou transmises par des éléments externes au réseau, dont on peut citer à titre d'exemple :

- Surtension provoquée par la foudre
- Propagation d'une surtension HT à travers un transformateur vers un réseau BT d'exploitation.

II.2- Classification des surtensions.

La norme CEI 60 071-1 donne la classification des surtensions selon leur durée et leur forme. Selon la durée, on distingue les surtensions temporaires et les surtensions transitoires [1, 43, 44]. Ce sont des perturbations qui se superposent à la tension nominale d'un circuit. Elles peuvent apparaître entre phases ou entre circuits différents, et sont dites de mode différentiel entre les conducteurs actifs et la masse et de mode commun entre les conducteurs actifs et la terre. Leur caractère varié et aléatoire les rend difficiles à caractériser et n'autorise qu'une approche statistique en ce qui concerne leur durée, leurs amplitudes et leurs effets. En pratique, les ondes des surtensions sont normalisées et les plus couramment utilisées sont les ondes de choc de foudre et de manœuvres.

Aussi, on désigne par surtension toute différence de potentiel anormale apparaissant dans les circuits électriques et qui est susceptible d'endommager les éléments de ces circuits (lignes, machines, ... etc.).

On distingue deux sortes de surtensions :

- Transversales apparaissant entre un conducteur et la terre ou entre deux conducteurs.
- Longitudinales ou entre spires, correspondant à un accroissement exagéré de la différence de potentiel entre deux points voisins d'un même conducteur .

L'étude des surtensions peut être abordée de manière différente selon leur spectre de fréquence. Un phénomène électrique ou électromagnétique n'est jamais instantané. Il doit se propager. Sa vitesse de propagation peut être très grande, mais pas infinie. En pratique, le phénomène pourra être considéré comme instantané si sa longueur d'onde est beaucoup plus grande que les dimensions du système considéré. On distingue:

- les **Surtensions temporaires.**

Les Surtensions temporaires se caractérisent par leur amplitude, leur forme et leur durée. Ces surtensions sont causées par le défaut à la terre, la perte de charge, la résonance et le ferro-résonance [31, 45-47].

- **les Surtensions à front lent.**

Les surtensions à front lent dont les surtensions transitoires, ont des durées de front comprises entre quelques dizaines et quelques milliers de microsecondes, des temps de queue du même ordre de grandeur, et sont de nature oscillatoire.

Ce type de surtension est généralement dû aux phénomènes suivants :

- Enclenchement et ré enclenchement d'une ligne.
- Apparition d'un défaut et son élimination.
- Coupure des courants capacitifs ou inductifs.
- Perte de charge.

La contrainte de tension représentative est caractérisée par la forme de la tension. C'est l'onde de manœuvres normalisée: durée jusqu'à crête: $250\mu\text{s}$ et durée de décroissance jusqu'à demi valeur: $2500\mu\text{s}$.

II.2.1-Surtension de manœuvres [1, 5, 48].

Ce type de phénomène apparaît sur des réseaux électriques lors des ouvertures d'appareils de protection, fermeture et ouverture d'appareils de commande. Les surtensions engendrées se propagent en général sous forme d'ondes hautes fréquences à amortissement rapide.

Pendant la commutation de courants inductifs lors de l'établissement ou de l'interruption de circuits inductifs, des impulsions de forte amplitude et de temps de montée très faibles peuvent se produire.

La présence de capacités (batteries de condensateurs ou tout simplement lignes à vide) constitue un circuit résonant LC. Les manœuvres provoquent alors des surtensions de type oscillatoire. Elles sont aussi appelées surtensions harmoniques, car leur fréquence d'oscillation amortie est très souvent un multiple de la fréquence du réseau [12, 42].

L'étude statistique des surtensions de manœuvres a conduit à la normalisation des ondes présentées par les figures 2.1, 2.2 et 2.3.

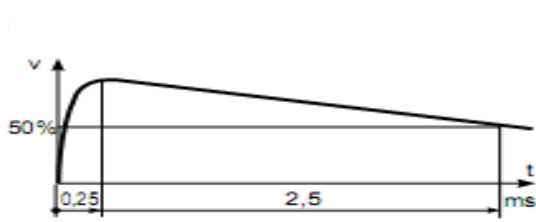


Figure 2.1: Onde 250/2 500 μ s dite onde longue amortie

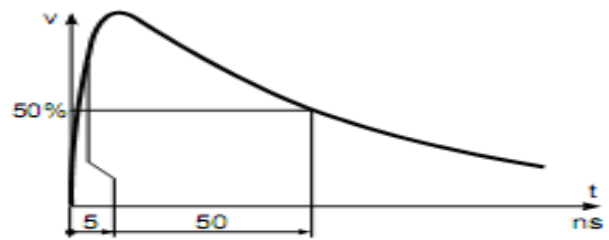


Figure 2.2 : Onde 5/50 ns dite onde impulsionnelle récurrente. (par ex. la fusion d'un fusible)

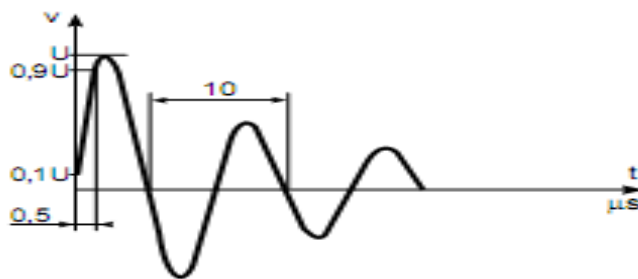


Figure 2.3 : Onde 0,5 μ s/100 kHz dite onde sinusoïdale amortie.

L'amplitude de la surtension de manœuvres dépend des performances du disjoncteur et des caractéristiques électriques de la ligne. Aussi, varie-t-elle d'un réseau à l'autre.

La valeur des surtensions de manœuvres pour chaque niveau de tension d'un réseau d'alimentation peut être déterminée par des études avec un analyseur de transitoires de réseau (TNA) ou avec ordinateur.

De telles études devraient fournir une valeur de la surtension statistique à 2%, notée U_2 à partir de laquelle la distance minimale d'approche peut être déterminée [1, 2, 5].

Les relations suivantes données dans la CEI 60 071-2 peuvent être utilisées pour estimer la surtension statistique à 2 %, U_2 à partir des valeurs tronquées (en employant dans chaque cas la méthode « valeur crête » par phase).

Cas des surtensions phase-terre.

Pour la surtension statistique à 2%, u_{e2} par unité (pu), l'écart type est :

$$\sigma_e = 0,25 (u_{e2} - 1) \tag{2.1}$$

Valeur tronquée $u_{et} = 1,25 u_{e2} - 0,25 \tag{2.2}$

$$\text{D'où :} \quad u_{e2} = (u_{et} + 0,25) / 1,25 \quad (2.3)$$

Cas des surtensions phase-phase.

Pour la surtension statistique phase - phase à 2 % , notée u_{p2} , l'écart type est :

$$\sigma_p = 0,25 (u_{p2} - 1,73) \quad (2.4)$$

$$\text{Valeur tronquée} \quad u_{pt} = 1,25 u_{p2} - 0,43 \quad (2.5)$$

$$\text{D'où :} \quad U_{p2} = (u_{pt} + 0,43) / 1,25 \quad (2.6)$$

II.2.2-Surtension de foudre.

Dans le cas des lignes aériennes, les coups de foudre tombant à distance sur les conducteurs de phase entraînent des surtensions de foudre sur les installations sous tension, néanmoins une telle surtension est atténuée au cours de sa propagation vers la zone de travail ; dans ce cas, pour les distances supérieurs à 10 kilomètres, la surtension de la foudre est suffisamment affaiblie pour ne pas entraîner un amorçage de l'isolation de la ligne. [18-20].

Pour un travail en toute sécurité, la surtension doit être inférieure à la valeur de la tension de tenue U_{90} sur l'aire de travail. Il est alors recommandé qu'un travail sur ou à proximité d'une ligne ou d'un matériel sous tension ou hors tension ne soit pas effectué quand la foudre est perçue dans le voisinage immédiat (jusqu'à 10 km). Un orage éloigné, non perceptible par les opérateurs peut causer des surtensions sur les installations sous tension. Une telle surtension est cependant atténuée au cours de sa propagation vers la zone de travail.

Si la foudre provoque un défaut quelque part sur le réseau, il y aura une surtension causée par ce défaut, et aussi une surtension de déclenchement; si les ré-enclencheurs ne sont pas hors service, une surtension plus sévère de fermeture se produira. Ces phénomènes solliciteront toute l'isolation sur la zone de travail.

III- Caractéristiques relatives à la décharge disruptive.

Le terme décharge disruptive, ou quelquefois « claquage », s'applique aux phénomènes associés à la défaillance de l'isolation sous une contrainte pendant lesquels la décharge court-circuite complètement l'isolation réduisant la tension appliquée entre électrodes à une valeur pratiquement nulle. Il s'applique au claquage des diélectriques solides, liquides et gazeux ou de leurs combinaisons.

Le claquage peut se produire soit dans les milieux gazeux, liquides ou solides. On désigne par:

- Le terme « amorçage » : quand la décharge disruptive se produit dans un milieu gazeux ou liquide.
- Le terme « contournement » : quand la décharge disruptive se produit à la surface d'un diélectrique solide à travers un milieu gazeux ou liquide.
- Le terme « perforation » : quand la décharge disruptive se produit à travers un diélectrique solide.

Dans les travaux et études, la valeur de la tension provoquant une décharge disruptive est déterminée à partir de données statistiques obtenues expérimentalement. On distingue [1, 42] :

- **Tension 50 % de décharge disruptive U_{50}** : Valeur de crête d'une tension de choc qui a une probabilité de 50 % de provoquer une décharge disruptive à chaque fois qu'elle est appliquée lors d'essais diélectriques.
- **Tension de tenue statistique U_{90}** : Surtension pour laquelle l'isolation présente une probabilité de tenue de 90 %.
- **Tension statistique U_2** : Surtension ayant une probabilité de 2% d'être dépassée.

IV-Méthodes expérimentales de mesure de la tension disruptive.

Les essais sont effectués sur des intervalles d'air échantillons (diélectrique auto-régénérateur). Les expériences consistent à soumettre l'échantillon considéré à une onde de manœuvres de vitesse constante jusqu'au claquage.

Pour chaque onde, l'essai est répété N fois.

La probabilité de claquage est donnée par la relation [1, 19]:

$$P(i) = \frac{i}{N + 1} \quad (2.8)$$

où:

N: nombre total de tests;

i: rang de la valeur de la tension de claquage après un classement par ordre croissant.

A partir du tracé de $P_d(U)$ représenté par la figure 2.4 sur une échelle Gaussienne arithmétique [6], on peut déterminer les deux paramètres U_{50} et l'écart type σ caractérisant les propriétés diélectriques d'un intervalle et en déduire la probabilité d'amorçage pour toute autre amplitude de même forme.

L'écart type σ représente la dispersion des tensions d'amorçage. Sa valeur peut être déterminée à partir de la droite de la figure 2.4 comme suit :

$$\sigma = U_{50} - U_{16} \quad \text{ou} \quad \sigma = (U_{84} - U_{16})/2$$

Pour $U = U_{50}(1 - 3\sigma)$, la probabilité d'amorçage n'est plus que 0.13 %; on appelle cette tension "tension de tenue" U_0 de l'intervalle.

Pour un choc de manœuvres en polarité positive (fig. 2.4), l'écart type σ correspondant à la tension d'amorçage est environ 6 %. En polarité négative, cet écart est de l'ordre de 13%, mais comme la valeur U_{50} est nettement plus élevée qu'en polarité positive [5, 6,18-20], la tension de tenue est elle-même plus élevée, et l'on n'a généralement pas à s'en préoccuper.

La tenue peut être prise égale à 90% de U_{50} sur la base d'un écart type conventionnel σ (3-5%) de U_{50} .

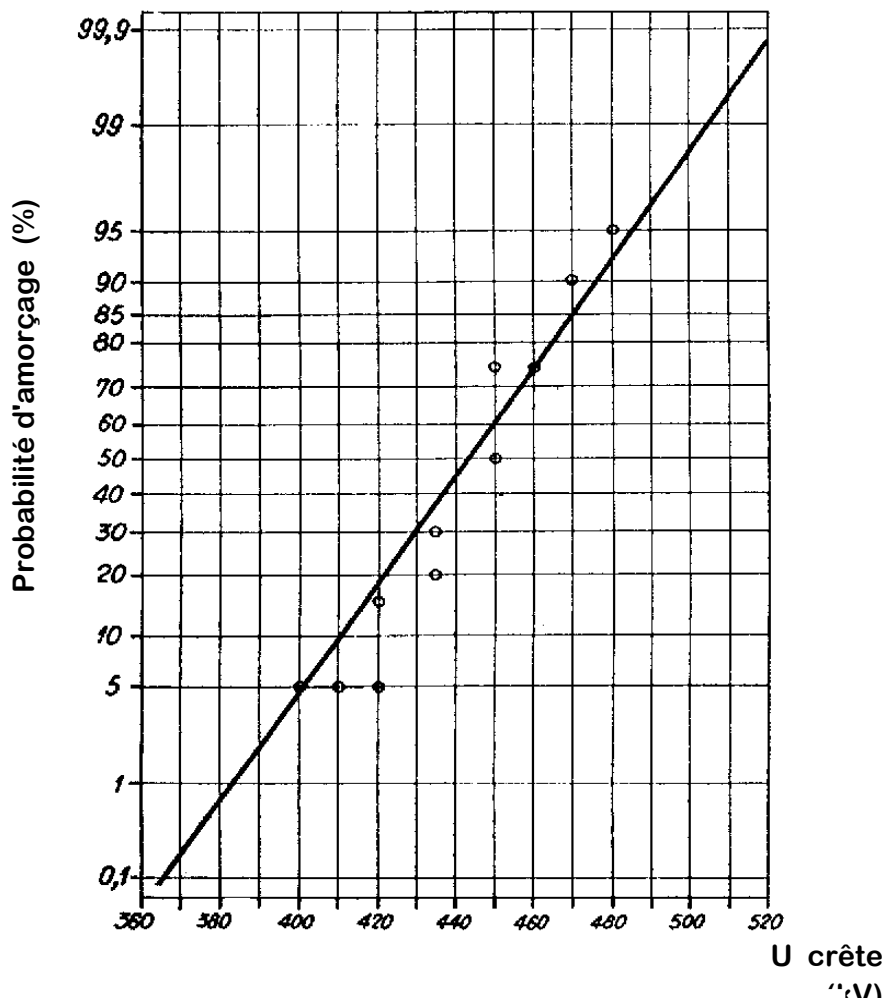


Figure 2.4 : Probabilité d'amorçage d'un intervalle tige-plan (distance dans l'air: 1 m) en fonction de l'amplitude du choc de manœuvres appliqué [6].

Onde: 145/3700 μ s; polarité positive.

$U_{50} = 443$ kV; σ (kV) = 26 ; σ (%) = 5.9 %

V- Contraintes des surtensions.

Les tensions de décharges constituent le paramètre principal dans la détermination de la distance minimale d'approche qu'un opérateur travaillant sous tension est tenu de respecter.

Cette distance représente l'isolation externe auto-régénératrice (intervalle d'air) qui assure l'isolement et la sécurité sous les contraintes électriques qui sont appliquées [5, 47, 48].

Les diverses contraintes liées aux tensions électriques sont:

- La tension à fréquence industrielle, dans les conditions normales d'exploitation, en régime permanent non perturbé.
- La surtension temporaire à fréquence industrielle (fréquence du réseau ou fréquence voisine qui survient suite à un déclenchement brusque d'une charge importante.
- La surtension de manœuvres : transitoire ou onde de choc de manœuvres.
- La surtension de foudre: transitoire ou onde de choc de foudre.

En plus de l'amplitude de la tension, la tenue de l'isolation dépend de plusieurs paramètres et obéit de façon aléatoire aux contraintes subies. Elle est liée à :

- ✓ La durée d'application de la surtension (caractérisée par le temps de montée du front s'il s'agit d'ondes de choc): les isolations supportent très souvent des tensions plus élevées que leur durée d'application est plus faible.
- ✓ La polarité de l'onde de choc: l'isolation supporte une surtension plus élevée en onde négative qu'en onde positive.
- ✓ La forme géométrique des électrodes: l'isolation supporte une surtension plus élevée lorsque le rayon de courbure des électrodes est plus grand.

La coordination des isolements consiste alors à déterminer en chaque point d'un réseau, l'isolement optimal en tenant compte d'une avarie ou d'une interruption de service.

Par ailleurs, il est à signaler qu'il existe certaines contraintes électriques auxquelles aucune isolation économiquement réalisable ne résisterait: c'est le cas des surtensions dues à la foudre. Compte tenu des distances entre phases et ferrures des pylônes qui doivent être de quelques mètres, les coups de foudre directs sur les conducteurs actifs entraînent pratiquement à 100 % un amorçage et un court circuit.

Pour se prémunir et protéger le matériel, on accepte alors les contournements inévitables en des points où ils peuvent se produire sans dommage (isolation auto génératrice) et on installe des éclateurs ou parafoudres [23, 26, 36]. Aussi, la pose adéquate d'un câble de garde mis à la terre draine et évacue le coup de foudre. Il est à rappeler que, pour toute les normes en vigueur, les travaux sous tension ne sont pas autorisés lorsqu'un coup de foudre est signalé sur un rayon de moins de 10 km du lieu de travail [1, 2].

S'agissant des autres contraintes de surtension transitoire, les essais de laboratoire ont confirmé que les protections contre les surtensions de manœuvres assureront une couverture totale. De ce fait, dans nos travaux on se basera sur les contraintes de décharge liées à la surtension de manœuvres.

VI-Surtensions de manœuvres [31, 49].

Les surtensions de manœuvre sont dues suite:

- à la coupure des courants de ligne à vide, de câbles à vide ou de batteries de condensateurs.
- à la coupure de faibles courants inductifs ou magnétisants (transformateurs à vide ou chargés par inductances shunt).
- à la mise sous tension des lignes HT et THT.
- à l'enclenchement et déclenchement des lignes.

Etant donné l'état aléatoire de réponse des isolations aux contraintes de surtension, le phénomène disruptif et le réamorçage sont difficilement reproductibles en laboratoire d'essais. Le seul moyen d'investigation des surtensions est l'essai et la mesure directe en réseau, à l'aide de camions laboratoire spécialement équipés à cet effet. Il existe également des compteurs de surtensions qui, placés en de nombreux points d'un réseau, ont permis d'établir des statistiques sur les surtensions [6].

La connaissance des distributions statistiques des surtensions est indispensable dans la conception probabiliste de la coordination des isolations: détermination des intervalles d'air et choix optimal des isolants ainsi que la conception des appareils de protection notamment les disjoncteurs. Actuellement, vu la conception évoluée des disjoncteurs, la surtension des réamorçages a pratiquement disparu. Il reste celles liées à la fermeture et à la re-fermeture des lignes à vide (enclenchement et ré-enclenchement). L'enclenchement à deux temps avec l'insertion transitoire d'une résistance d'amortissement, ou synchronisation électronique de la fermeture des pôles font que les facteurs de surtension sont alors abaissés.

Les relevés opérés sur les réseaux [36, 38, 41] ont montré que les surtensions de manœuvres atteignent des valeurs de l'ordre de:

- 3 fois environ la valeur de crête en cas de coupure de courant sans réamorçage.
- supérieure à 3 fois la valeur de crête en cas de coupure de courant avec réamorçage et sans résistance de décharge.
- Environ $3 \div 4$ fois la valeur de crête en cas de coupure de faible courant inductif ou magnétisant.
- supérieure à 2 fois la valeur de crête en cas de mise sous tension d'une ligne longue.
- supérieure à 3 fois la valeur de crête en cas de coupure de rétablissement (arrachement d'un courant).

En outre, les essais de laboratoire ont montré que la tenue des distances dans l'air présente une non linéarité d'une part et une faiblesse de la tenue diélectrique de l'air aux impulsions de polarité positive dont les durées coïncident avec celles des surtensions de manœuvres.

Ces études ont dégagé quatre (04) propriétés fondamentales des distances dans l'air, à savoir:

- la non linéarité: la distance de tenue n'est pas linéaire.
- la dispersion: A un intervalle "d", on applique une série de tensions de choc de même amplitude U_1 , puis une autre série de U_2 , puis U_3 , ainsi de suite avec une progression constante ΔU . On observe à partir d'un certain seuil, une probabilité croissante d'amorçage. La loi de probabilité d'amorçage $P_d(U)$ est assimilée à une loi de Gauss-Laplace qui, tracée sur papier à échelle gauss-arithmétique, prend l'allure d'une droite (fig. 2.4) [5, 7].
 - **La durée du front:** la forme de l'onde influe par la raideur du front sur la formation du leader et son déplacement pour causer enfin l'amorçage. Plus la pente (du/dt) caractérisant la raideur du front augmente, plus le potentiel de l'électrode est important et peut atteindre des valeurs considérables (plusieurs fois la tension d'amorçage U_{50}) avant que le pontage de l'intervalle (claquage) n'ait pu se produire. Tandis que, lorsque la pente diminue, le développement des streamers est favorisé entraînant ainsi le claquage de l'isolant pour une tension inférieure à la tension d'amorçage U_{50} .
 - **La forme géométrique ou facteur d'intervalle:** lorsque le rapport r/d (r étant le rayon de courbure et d l'intervalle) dépasse une valeur critique de l'ordre de $1/10$ à $1/6$, les streamers se propagent jusqu'au plan formant ainsi un pont conducteur entre les électrodes (claquage).

VII-Relations empiriques des tensions statistiques de tenue U_{50} .

VII.1- Relations expérimentales.

Les mesures de laboratoire sont réalisées sur des configurations géométriques d'électrodes tige-plan de dimensions standardisées donnant les lois de variation de la tension de décharge statistique ayant une probabilité de 50 % d'amorçage (U_{50}).

Le facteur essentiel qui détermine l'évolution des décharges dans les grands intervalles d'air est le champ électrique. Les paramètres géométriques définissent ses variations spatiales tandis que les paramètres électriques imposent ses variations temporelles.

Il est relevé qu'en choc de foudre, la tenue des intervalles dans l'air se caractérise par une plus grande linéarité que pour les autres types (figure 2.5) (choc de manœuvres, surtension à fréquence industrielle ...). Aussi, la tenue à la polarité positive est moins bonne qu'en polarité négative; le phénomène de dispersion existe également de sorte que l'on peut déterminer U_{50} et l'écart type σ . Ce dernier est l'ordre de 3 % pour l'onde de choc de foudre [6, 12, 13].

Pour un choc de foudre de polarité positive, la tension U_{50} d'un intervalle d'air tige-plan est donnée par la relation empirique ci-après [6,7, 49, 50]:

$$U_{50} = (360+150 k) d \quad (2.9)$$

Avec:

U_{50} en (kV); d en (m); k : facteur d'intervalle

En choc de manœuvres pour un intervalle dans l'air donné, lorsqu'on fait croître progressivement le temps de montée de l'onde appliquée, il est constaté que la tension U_{50} passe par un minimum (figure 2.6) [6].

La courbe $U_{50} = f(d)$ que l'on obtient à partir de tous les minimums de tenue (fig.2.6) correspondant au front de "montée critique" peut être exprimée analytiquement par la formule suivante, obtenue empiriquement par Gallet et Leroy à partir d'essais aux chocs de manœuvres [5, 6].

$$U_{50} = K \frac{3450}{1 + (8/d)} \quad (2.10)$$

où:

U_{50} : tension statistique ayant une probabilité de 50 % d'amorçage en (kV);

d : intervalle dans l'air en (m);

K : facteur d'intervalle dépendant de la configuration géométrique d'électrodes, défini dans les tableaux 2.1 et 2.2. ($K=1$ pour le système tige-plan normalisé)

Cette relation empirique est valable pour d allant jusqu'à 15 m environ: intervalle constitué par une électrode de polarité positive et une cathode à potentiel nul (sol, armature de pylône..) [6].

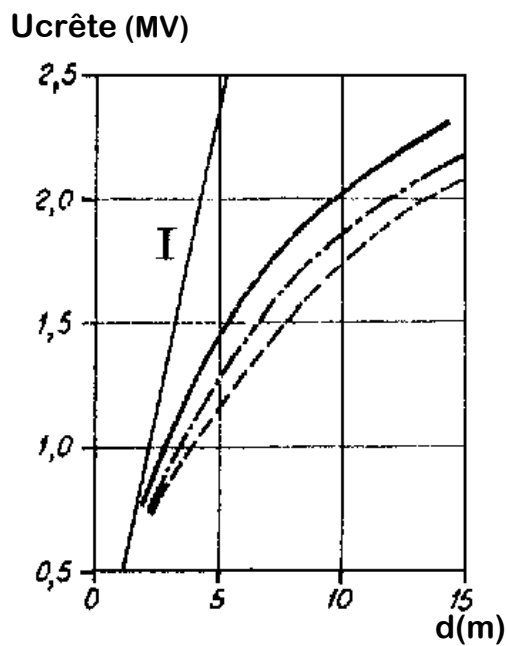


Figure 2.5 : Tension de décharge en choc de manœuvres, pour trois configurations des électrodes [6].

Légende :

- : Intervalle conducteur-sol.
- - - : Intervalle anneau de garde - pylône.
- · · : Intervalle tige-plan.
- I : Onde de choc de foudre

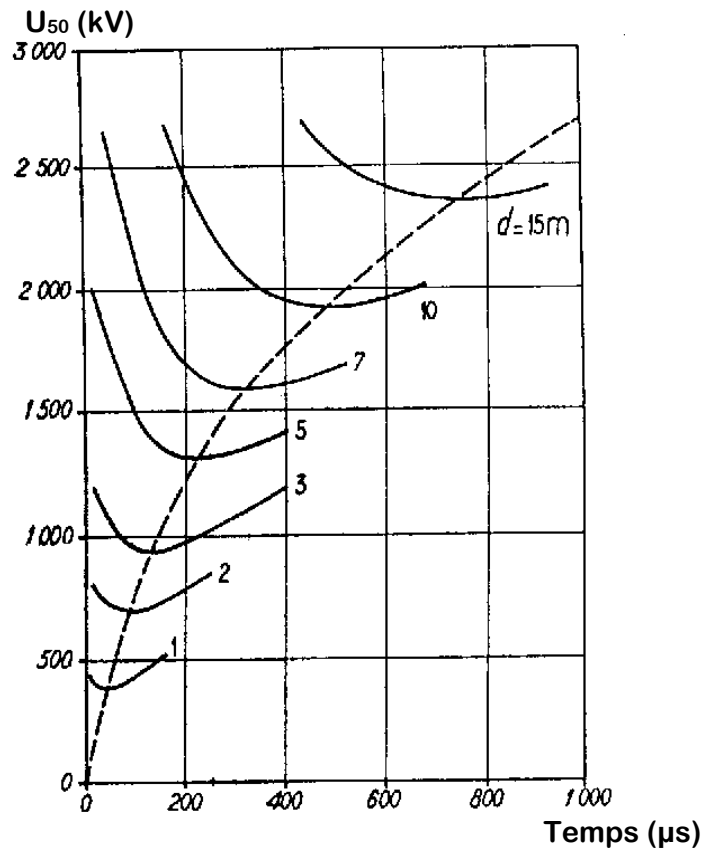


Figure 2.6 : $U_{50\%}$ Minimum en fonction de la durée du front du choc appliqué en polarité positive; système pointe-plan [6].

Légende :

- - - : lieu des minimums.
- d : intervalle dans l'air.

| Type d'intervalle | Configuration | K |
|---|---------------|------|
| Intervalle anneau de garde-pylône dans le cas d'une chaîne (simple ou en V) sous console | | 1,40 |
| Intervalle anneau de garde-pylône dans le cas d'une chaîne (simple ou en V) à l'intérieur de la fenêtre du pylône | | 1,30 |
| Intervalle conducteur-objet à la masse (véhiculé, bâtiment, etc.) | | 1,30 |
| Intervalle conducteur-sol | | 1,45 |
| Intervalle tige-plan horizontal | | 1,20 |

Tableau 2.1 : Facteur d'intervalle K, relatif à diverses configurations géométriques intervenant dans la construction des lignes [1, 2, 5, 6].

| Type d'intervalle | Configuration | K | |
|-----------------------|---------------|----------------|-----------------|
| | | $\alpha = 0,5$ | $\alpha = 0,33$ |
| Conducteurs croisés | | 1,65 | 1,53 |
| Conducteur-conducteur | | 1,62 | 1,52 |
| Jeu de barres posées | | 1,50 | 1,40 |

Tableau 2.2: Facteur d'intervalle K à prendre en compte pour le calcul de la tenue diélectrique entre phases [1, 2, 5,6].

S'agissant de la tenue des intervalles entre phases, on applique à la phase 1 une surtension de choc de manœuvres négative d'amplitude U_1 et à la phase 2 un choc de manœuvre positif d'amplitude U_2 . Et, on détermine la tenue avec la même relation de U_{50} en prenant la valeur du facteur géométrique k tenant compte des valeurs U_1 et U_2 (tableau 2.2).

La valeur de K dépend du paramètre α défini comme suit:

$$\alpha = \frac{U_1}{U_1 + U_2} \quad (2.11)$$

Pour les calculs, on choisit du tableau 2.2 la valeur du facteur K le plus proche pour $\alpha = 0.33$ et 0.50 ; valeurs donnant des résultats acceptables [5, 6].

La relation empirique (2.10) appliquée à différentes configurations géométriques montre que la tension de tenue U_{50} minimale est celle de la configuration tige-plan (fig.2.7). D'où la distance d'intervalle "d" relative à la tension d'amorçage U_{50} tige-plan assure largement la tenue des autres configurations.

Aussi, les essais de laboratoire effectués sur la tenue d'intervalle d'air aux différentes ondes de choc ont donné les relations empiriques ci-après permettant d'évaluer la tension statistique d'amorçage à U_{50} [1, 5].

Dans l'hypothèse:

- Intervalle d'air de distance "d" exprimée en mètre.
 - Electrodes de configuration "tige-plan" en polarité positive.
 - Altitude $H = 0$, niveau de la mer.
 - Conditions de l'environnement standard.
 - Température ambiante: 20°C
 - Pression = 101.3 kPa (1013 mbar)
 - Humidité absolue: 11 g/m^3
1. Pour une tension à fréquence industrielle permanente ou temporaire, U_{50} est exprimée par la relation empirique suivante [5] :

$$U_{50RP} = 750\sqrt{2} \ln(1 + 0.55d^{1.2}) \quad (2.12)$$

Avec:

- U_{50RP} en (kV crête).
- d en (m) allant jusqu'à 3 mètres.

2. Pour une surtension à front lent (choc de manœuvres), U_{50} est exprimée par la relation empirique suivante [1]:

$$U_{50RP} = 1080 \ln(0.46d + 1) \quad (2.13)$$

Avec:

U_{50RP} en (kV crête).

d en (m) allant jusqu'à 25 mètres

3. Pour les chocs de manœuvres normalisés, la relation de Paris ci-dessous est plus précise [5].

$$U_{50RP} = 500d^{0.6} \quad (2.14)$$

4. Pour une surtension à front rapide (choc de foudre), U_{50} est exprimée par la relation empirique suivante:

$$U_{50RP} = 530d \quad (2.15)$$

Avec: U_{50RP} en (kV crête); d en (m), allant jusqu'à 10 mètres

La figure 2.7 présente les variations de la tension de tenue à 50 % en fonction de la distance entre électrodes pour les différentes formes de surtension. D'où il apparaît également que la protection contre les surtensions de manœuvres couvre les autres types de surtension.

Pour les autres configurations d'électrodes telles que conducteur-armature pylône, conducteur-sol et conducteur-conducteur avec une altitude $H \neq 0$ où le milieu est humide (présence de pollution), on détermine la tension de tenue U_{50} relative à la situation donnée (autre que tige-plan) en appliquant un facteur de correction global K_t (défini au chap.1-V.1.13).

$$U_{50} = K_t U_{50RP} \quad (2.16)$$

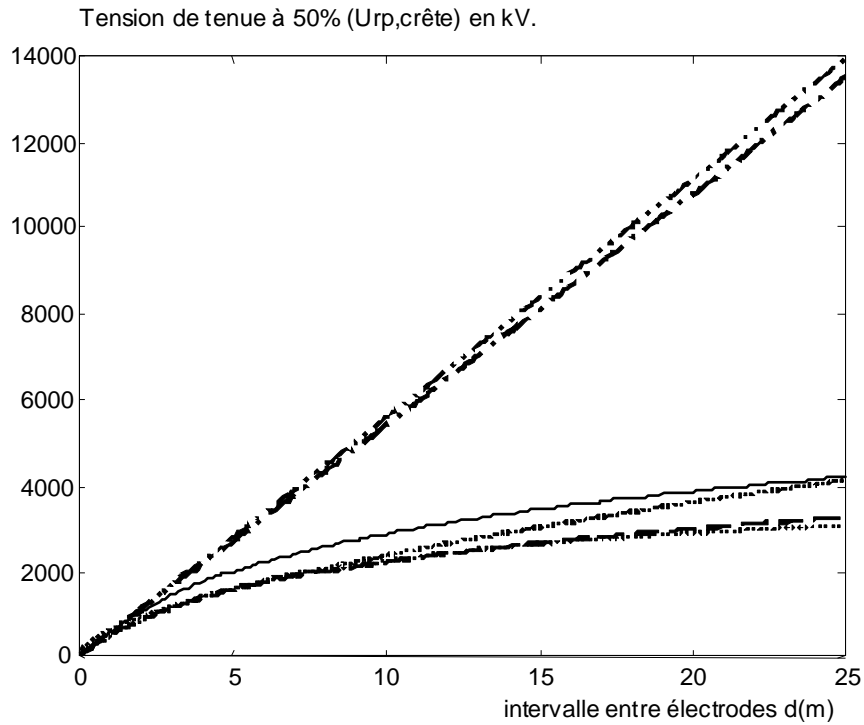


Figure 2.7 : U_{50RP} en fonction de la distance inter-électrodes d , relative aux différentes relations empiriques [16].

- · · · · · : Onde de choc de foudre selon la relation (2.15)
- · · · · · : Onde de choc de foudre selon la relation (2.9)
- : Tension à fréquence industrielle selon la relation
- : Onde de choc de manœuvre selon la relation
- - - - - : Onde de choc de manœuvre à front critique selon la relation
- : Onde de choc de manœuvre à front critique selon la relation

VII.2. Variations de la caractéristique $U_{50} = f(Du)$

Les calculs analytiques effectués pour différents niveaux de tension et configurations géométriques avec les différentes formules, dans les conditions normales, donnent les courbes représentées à la figure 2.8.

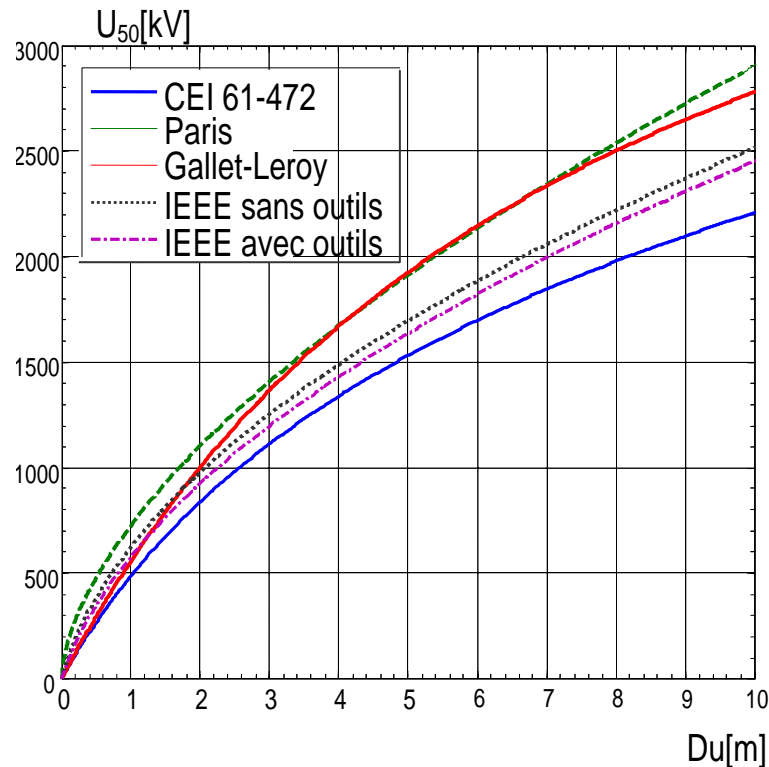


Figure 2.8. Variations de la tension $U_{50} = f(Du)$ pour différentes formules (CEI 61-472, Paris, Gallet-Leroy et IEEE Std 516, avec et sans outils) [15].

A partir de la figure 2.8 regroupant les résultats de l'étude analytique, on peut relever que pour le même niveau de tension de décharge U_{50} , la CEI 61-472 prévoit de plus importantes distances électriques (Du) par rapport aux autres normes et formules. D'autre part, la distance obtenue par la formule de Paris est la plus faible. On notera ainsi, que la norme CEI considère un facteur de sécurité le plus élevé [1].

A partir de cette étude, on peut aussi récapituler que la norme CEI tient compte de nombreux facteurs intervenant dans le calcul de la distance électrique de sécurité, ce qui a permis d'obtenir des distances plus importantes par rapport aux autres techniques.

Conclusion

L'aspect géométrique des équipements présents dans les ouvrages à haute tension joue un rôle important sur le renforcement local du champ électrique. De plus, la forme de la surtension engendrée sur une ligne à haute tension influe fortement sur la tenue diélectrique des isolations.

Sous des surtensions à front lent, une isolation auto-régénératrice donnée présente une tension de tenue significativement plus faible que sous des surtensions à front rapide de même polarité et amplitude.

La valeur de crête de U_{50RP} sous tension à fréquence industrielle est de 20% à 30% plus élevée que la valeur correspondante au choc de polarité positive.

Introduction.

Toute utilisation de l'électricité génère un champ électrique et un champ magnétique. Les champs électriques élevés constituent une contrainte pour le matériel électrique et un danger pour le personnel d'exploitation des postes et des lignes à haute tension, d'où l'importance de l'étude des champs électriques en haute tension.

Pour les isolations (diélectriques des condensateurs...) ou les systèmes d'isolations (pylônes, isolateurs et parafoudres...), les valeurs locales du champ électrique sont déterminantes pour la fiabilité et la durée de vie du matériel considéré ainsi que pour la conception des ouvrages à haute tension permettant des travaux sous tension.

Plusieurs méthodes de calcul des champs électriques sont utilisées dans la représentation de l'évolution des perturbations et contraintes des champs électriques au voisinage d'un ouvrage de haute tension. La plupart des formules donnent des résultats relativement proches [15, 25]; la différence des unes par rapport aux autres est due aux consignes des hypothèses fixées aux paramètres, aux variations aléatoires des grandeurs électriques et aux difficultés de mesure du phénomène étudié.

L'utilisation de nouvelles techniques expérimentales et numériques a permis de progresser de façon significative dans la compréhension des phénomènes de pré décharge électrique dans l'air.

Depuis le développement de l'analyse numérique et de l'informatique, plusieurs problèmes ont trouvé des solutions avec une précision plus importante que celles habituellement obtenues par les méthodes analytiques qui sont basées uniquement sur les lois de la physique où l'on est souvent contraint de négliger certains paramètres pour les besoins de la résolution, ce qui limite parfois fortement la précision des résultats recherchés.

I-Définitions [37, 51, 52].**I.1-Intensité du champ électrique.**

Lorsqu'un conducteur est électriquement chargé, l'espace dans son voisinage est influencé de telle sorte qu'une particule chargée, lorsqu'elle est introduite dans le domaine concerné, subit une force dans une direction définie à tout instant. On dit qu'un champ électrique en tout point est une grandeur vectorielle égale à la force agissant sur une particule de charge positive unitaire située en ce point. Deux types de champs électriques sont examinés, les champs électriques d'un système alternatif monophasé et triphasé.

I.2-Champs électriques en haute tension.

Les objets conducteurs soumis à une tension élevée et parcourus par des courants électriques génèrent des champs magnétiques et électriques dans l'espace qui les entoure.

Cependant, lors de phénomènes qui entrent en jeu en régime normal dans ce qu'il est convenu d'appeler le domaine de la haute tension, ce sont les champs électriques qui sont prépondérants. Ainsi, à titre indicatif d'appréciation, dans un poste haute tension 220 kV, le champ électrique à une distance de 6 mètres du conducteur central d'une ligne en nappe

atteint 2 kV/m, ce qui est pour le champ électrique une valeur élevée, tandis que le champ magnétique n'est que de 0,007 mT, ce qui est pour le champ magnétique une faible valeur [5].

En pratique, dans les ouvrages haute tension, on est confronté aux champs électriques non homogènes apparaissant dans des espaces tridimensionnels, comprenant des diélectriques homogènes ou inhomogènes.

Suivant la fréquence de la haute tension qui les génère, les champs électriques peuvent être :

- Stationnaires (hautes tensions continues) ;
- Quasi stationnaires (hautes tensions à fréquence industrielle de 50 ou 60 Hz) ;
- Transitoires (hautes tensions de choc).

Il en résulte que la mesure et le calcul le plus précis du champ électrique ont une grande importance pratique dans le domaine de la haute tension.

II- Calcul Analytique.

L'étude du champ électrique est importante dans l'engineering de haute tension. En effet, plus la tension est élevée, plus les distances d'isolation nécessaires sont importantes et le matériel encombrant, donc cher. Il faut utiliser au mieux les systèmes d'isolation afin de réduire la taille des appareils, mais sans pour autant en diminuer la qualité. Un champ trop élevé signifie inéluctablement une durée de vie courte et un manque de fiabilité.

L'intensité du champ dépend considérablement de la configuration géométrique des électrodes. On en distingue le champ uniforme et non uniforme.

Dans le cas d'un système à champ uniforme tout l'intervalle inter électrodes est soumis à la même intensité ; c'est le cas d'une configuration géométrique d'électrodes tel que montré dans la figure 3.1. Dans le cas où ce champ dépasse le champ d'ionisation du gaz contenu, ce sont toutes les molécules qui seront ionisées [37].

Il existe ainsi trois systèmes usuels à champ uniforme ou quasi uniforme: sphère- sphère, le profil de Rogowski et VDE (figure 3.1).

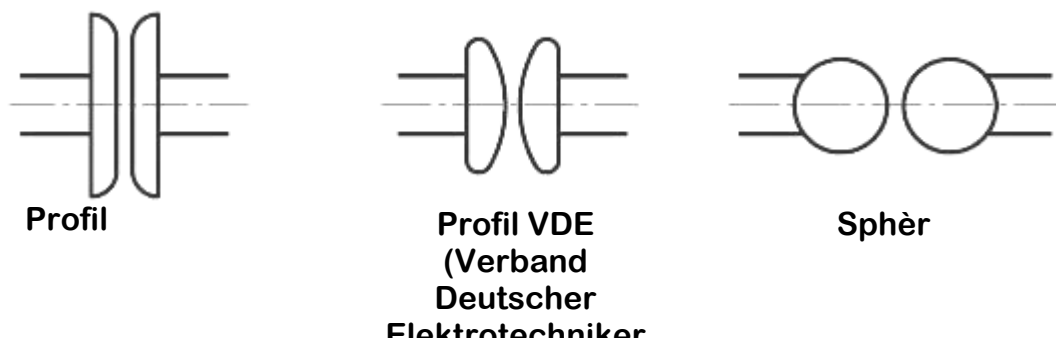


Figure 3.1: Les systèmes usuels à champ uniforme ou quasi uniforme

Pour les systèmes non uniformes (figure 3.2), la répartition du champ électrique n'étant pas la même dans l'intervalle inter électrodes, le champ électrique dans certaines régions peut dépasser le champ seuil d'ionisation des molécules de gaz et être inférieur à ce seuil dans d'autres.

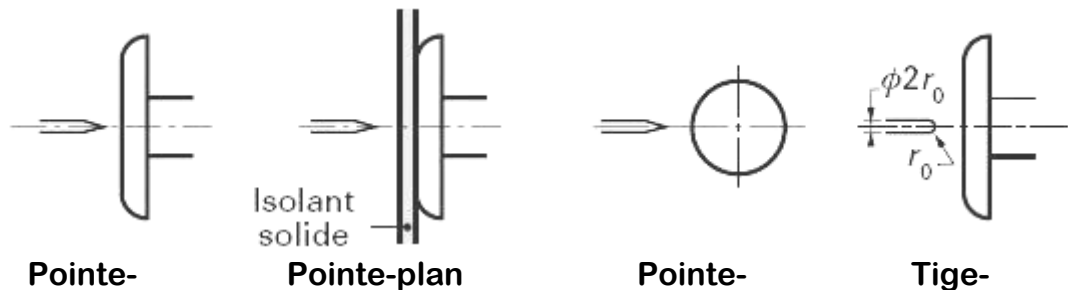


Figure 3.2: Les systèmes usuels à champ non uniforme (Divergent ou très divergent)

II.1-Les formules fondamentales :

La loi de la circulation du champ électrique indique :

$$\vec{E} \cdot d\vec{l} = -dV \tag{3.1}$$

Où E est le champ électrique (Volts / m), V le potentiel (Volts) et l la distance (m).

Aussi, la loi de la conservation des charges et celle du déplacement électrique D indiquent:

$$\vec{D} = \epsilon_0 \epsilon_r \vec{E} \tag{3.2}$$

Avec :

ϵ_0 est permittivité du vide = 8.854×10^{-12} [F/m]

ϵ_r la permittivité relative du matériau.

De façon générale, l'application de la définition du théorème de Gauss qui dit que le flux total du déplacement électrique D à travers une surface fermée est égal à la charge totale contenue à l'intérieur du volume considéré (conducteurs cylindriques, sphériques ...) convient pour le calcul du champ électrique [52-54].

$$\oiint_S \vec{D} \cdot d\vec{s} = \iiint_V \delta_{ch} \cdot dv = \sum q \tag{3.3}$$

Où δ_{ch} est la densité de charge dans le volume v en [C/m³].

Appliquées aux formes courantes en haute tension, ces lois aboutissent aux formules ci-dessous, nous permettant de calculer le champ électrique superficiel [34]:

- Pour l'extérieur d'un conducteur plein de rayon r et de charge linéique q :

$$E(r) = \frac{q}{2\pi \cdot \epsilon \cdot r} \quad (3.4)$$

avec: q en [C/m] et r en [m]; $\epsilon = \epsilon_0 \cdot \epsilon_r$ en [F/m] et E en [V/m]

- Pour l'extérieur d'une sphère pleine de charge q et de rayon r :

$$E(r) = \frac{q}{4\pi \cdot \epsilon \cdot r^2} \quad (3.5)$$

avec: q charge de la sphère en [C]

En outre, en appliquant la loi de la circulation du champ le long d'un rayon, on obtient pour le conducteur (fig.3.3).

$$\vec{E}(r) \cdot d\vec{r} = -dV \quad (3.6)$$

et en remplaçant $E(r)$ par l'expression (3.4), on aura:

$$dV = -\frac{q}{2\pi\epsilon} \cdot \frac{dr}{r} \quad (3.7)$$

On obtient en intégrant sur l'intervalle borné:

$$V = \frac{q}{2\pi\epsilon} \cdot \ln(r) + Cste \quad (3.8)$$

D'après la relation (3.4), $q/2\pi\epsilon$ est égale à $E(r) \cdot r$

D'où, par combinaison, on obtient l'équation (3.9) qui nous permet d'exprimer le champ électrique $E(r)$ créé par un conducteur porté à un potentiel V en un point p distant d'une longueur r du centre du conducteur :

$$E(r) = \frac{V}{r \cdot \ln(r)} \quad (3.9)$$

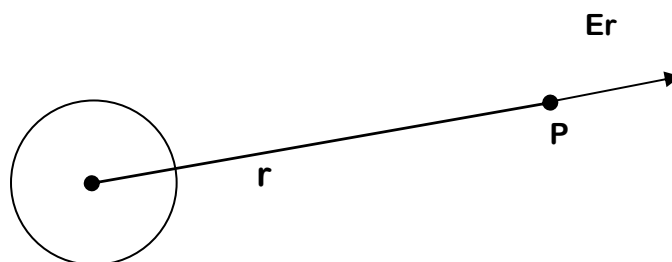


Figure 3.3: Champ électrique créé par un conducteur

De même, pour un conducteur coaxial de la figure 3.4, le champ électrique est déterminé en appliquant l'équation (3.8). On écrit les relations des potentiels intérieur V_{int} et extérieur V_{ext} comme suit:

$$V_{\text{int}} = \frac{q}{2\pi\epsilon} \cdot \ln(r_1) \quad (3.10)$$

$$V_{\text{ext}} = \frac{q}{2\pi\epsilon} \cdot \ln(r_2) \quad (3.11)$$

La différence de potentiel est : $U = V_{\text{ext}} - V_{\text{int}}$, ce qui donne:

$$U = \frac{q}{2\pi\epsilon} \cdot \ln(r_2 / r_1) \quad (3.12)$$

et

$$E(r) = \frac{U}{r \cdot \ln(r_2 / r_1)} \quad (3.13)$$

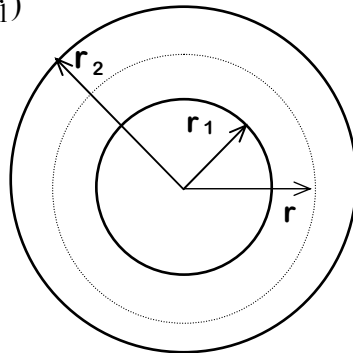


Figure 3.4 : Champ électrique créé par un conducteur coaxial

On remarque dans les formules ci-dessus que, pour une tension fixée, le champ électrique E sur la surface du conducteur augmente d'autant plus que le rayon du conducteur diminue. Ceci explique qu'en haute tension, tous les appareils et accessoires ont les plus grands rayons possibles (conducteurs en faisceau par exemple) et sont munis d'anneaux de répartition du champ électrique. D'autre part, des rayons sous dimensionnés provoquent l'effet couronne avec toutes ses conséquences et favorisent le claquage de l'isolation [46, 47].

En vertu des mêmes lois, le champ E est nul à l'intérieur des conducteurs. Cette propriété permet la construction des cages de Faraday, écrans électriques (combinaisons conductrices pour l'opérateur travaillant au potentiel), réalisation de chambres dite blindées pour l'atténuation des larges gammes de fréquences et protéger ainsi l'appareillage de précision sensible aux champs électromagnétiques.

En outre, le champ électrique dépend de la matière d'isolation, de la forme des électrodes et de la nature de la tension. Pour un intervalle donné d'une isolation, les champs maximaux admissibles ne sont pas les mêmes s'il s'agit de contraintes continues, alternatives ou de chocs positifs ou négatifs [5, 7, 54].

II.2- Système pointe-plan.

Pour la détermination du champ électrique d'un système pointe-plan, on l'assimile à une configuration hyperboloïde-plan (fig. 3.5) dans laquelle le champ électrique est beaucoup plus important que dans les autres configurations.

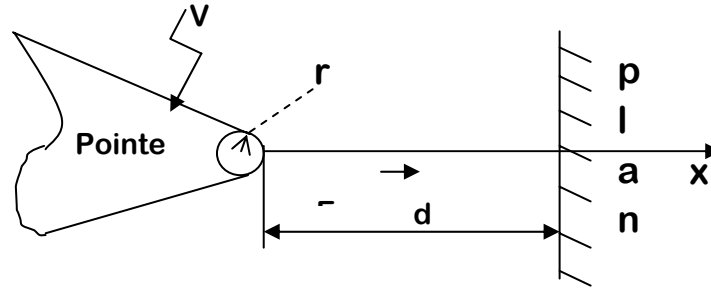


Figure 3.5 : Système pointe-plan assimilé à une configuration hyperboloïde –plan [55,56]

L'expression du champ électrique [55, 56, 57] est donnée par:

$$E_x = \frac{2V}{r_p \cdot d + 2 \cdot d \cdot x - x^2} \cdot \frac{1}{\ln \frac{4d}{r_p}} \quad (3.14)$$

Avec :

V : La tension simple de la pointe (kV).

E_x : Le champ électrique à la distance x sur l'axe horizontal (kV/cm).

r_p : Le rayon de courbure de la pointe (cm).

d : La distance inter- électrodes (cm).

x : La position dans l'intervalle inter – électrodes (cm).

Ce qui nous intéresse le plus c'est la valeur du champ électrique maximal sur la surface de l'électrode active, qui est pour cette configuration au niveau de la pointe ($x=0$). Dans ce cas, l'expression du champ maximal devient :

$$E_{\max} = \frac{2V}{r_p} \times \frac{1}{\ln \frac{4d}{r_p}} \quad (\text{kV/cm}) \quad (3.15)$$

On calcule le champ électrique maximum pour différents niveaux de tension normalisés utilisés ou susceptibles d'être utilisés dans le réseau Algérien de transport d'énergie électrique : 10, 30, 60, 220 et 400 kV à des distances inter -électrodes de 1.5, 2, 3 et

4 m et des rayons de courbure r_p de 1 , 1.5 , 2, 3, 4, 5 et 6 cm. Ces résultats sont regroupés dans le tableau 3.1.

Tableau 3.1: Variations du champ électrique maximal pour différents niveaux de tension et configurations géométriques d'électrodes. **Système pointe-plan.**

| Distance inter-électrodes d (m) | Rayon de courbure r_p (cm) | Tension efficace U(kV) | | | | |
|---------------------------------|------------------------------|---------------------------------|-------------|-------------|--------------|--------------|
| | | 10 | 30 | 60 | 220 | 400 |
| | | E_{max} (kV/cm) sur la pointe | | | | |
| 1.5 | 1.0 | 1.80 | 5.42 | 10.83 | 39.71 | 72.21 |
| | 1.5 | 1.28 | 3.85 | 7.71 | 28.27 | 51.39 |
| | 2.0 | 1.01 | 3.04 | 6.07 | 28.26 | 40.49 |
| | 3 | 0,73 | 2,18 | 4,36 | 15,98 | 29,06 |
| | 4 | 0,58 | 1,73 | 3,46 | 12,68 | 23,05 |
| | 5 | 0,48 | 1,45 | 2,89 | 10,61 | 19,30 |
| | 6 | 0,42 | 1,25 | 2,51 | 9,19 | 9,19 |
| 2 | 1.0 | 1.73 | 5.18 | 10.36 | 38.00 | 69.10 |
| | 1.5 | 1.23 | 3.68 | 7.36 | 26.97 | 49.04 |
| | 2.0 | 0.96 | 2.89 | 5.78 | 21.20 | 38.52 |
| | 3 | 0.69 | 2.07 | 4.13 | 15.16 | 27,56 |
| | 4 | 0.54 | 1.63 | 3.27 | 11.99 | 21,79 |
| | 5 | 0,46 | 1,37 | 2,73 | 10,01 | 10,01 |
| | 6 | 0,39 | 1,18 | 2,36 | 8,65 | 15,73 |
| 3 | 1.0 | 1.63 | 4.89 | 9.77 | 35.83 | 65.15 |
| | 1.5 | 1.15 | 3.45 | 6.91 | 25.34 | 46.07 |
| | 2.0 | 0.90 | 2.71 | 5.42 | 19.86 | 36.10 |
| | 3 | 0.64 | 1.93 | 3.85 | 14.13 | 25.17 |
| | 4 | 0.51 | 1.52 | 3.04 | 11.13 | 20,25 |
| | 5 | 0.42 | 1.26 | 2.53 | 9.27 | 16.86 |
| | 6 | 0.36 | 1.09 | 2.18 | 7.99 | 14.53 |
| 4 | 1.0 | 1.57 | 4.70 | 9.39 | 34.43 | 62.61 |
| | 1.5 | 1.10 | 3.31 | 6.62 | 24.29 | 44.16 |
| | 2.0 | 0.86 | 2.59 | 5.18 | 19.00 | 34.55 |
| | 3 | 0.61 | 1.84 | 3.68 | 13.49 | 24.52 |
| | 4 | 0.48 | 1.45 | 2.89 | 10.60 | 19.27 |
| | 5 | 0.40 | 1.20 | 2.40 | 8.81 | 16.01 |
| | 6 | 0.34 | 1.03 | 2.07 | 7.58 | 13.78 |

Les valeurs du champ obtenues par cette formulation sont élevées. Pour certaines dimensions géométriques du système et potentiel électrique, le champ électrique à la surface

de l'électrode active dépasse l'intensité du champ critique de l'air (21 kV/cm) dans les conditions normales (valeurs en gras).

II.3- Influence des paramètres : tension, distance inter -électrode et rayon de courbure sur le champ électrique.

Bien que tous les paramètres soient présents et agissent en même temps, pour le système pointe-plan, il est utile de connaître l'influence de chaque paramètre indépendamment des autres pour déterminer la pertinence des uns par rapport aux autres sur l'amplification du champ électrique dans les zones vives.

II.3.1- Influence de l'amplitude de la tension.

Les courbes ci-dessous (figure 3.6) illustrent l'influence de la tension sur le champ pour les valeurs de $r_p = 1$ cm et 3cm et $d = 4$ m.

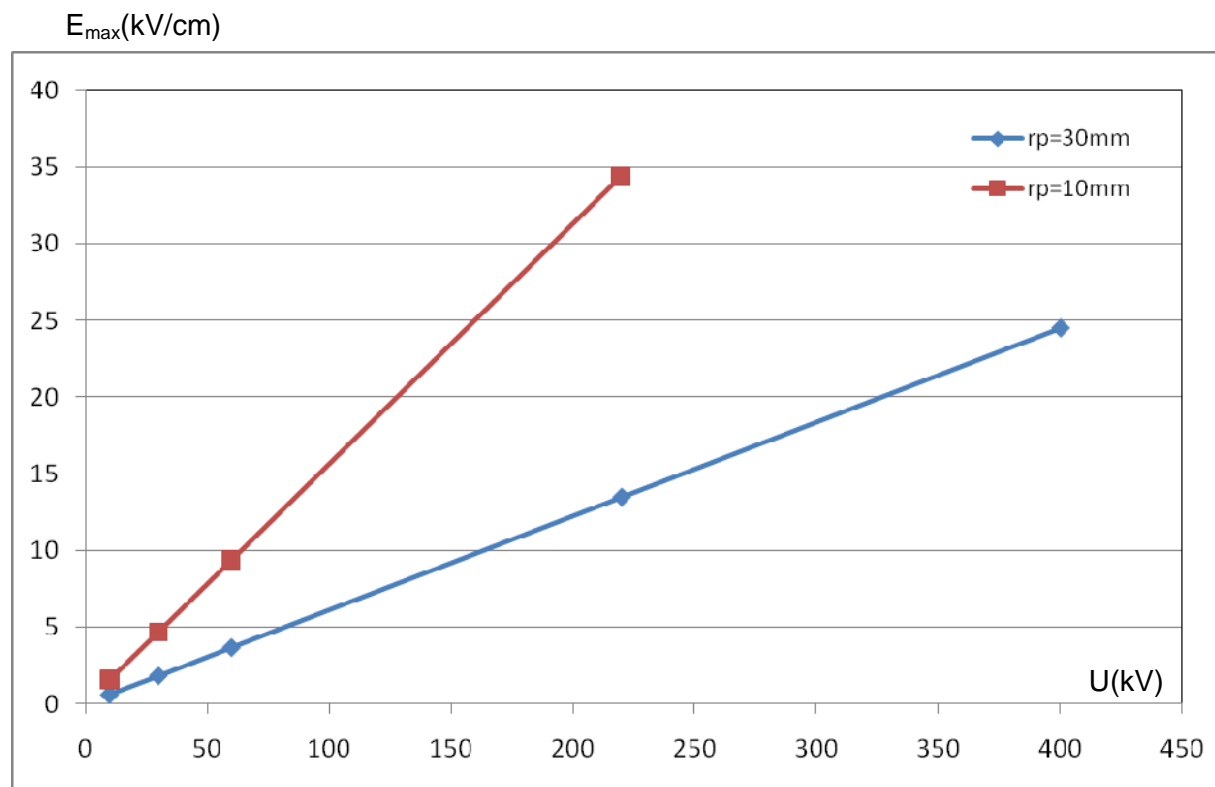


Figure 3.6 : Variations du champ le long de l'intervalle inter électrodes pour différents niveaux de tension: U, avec $d=4$ m ; $r_p=1$ cm et 3cm.

On constate que le champ électrique varie avec la tension pour les mêmes positions dans l'intervalle inter- électrodes. Il est d'autant plus grand que le niveau de tension appliqué est élevé. La pente de variation est relativement importante.

II.3.2- Influence du rayon de courbure r_p sur le champ électrique.

Le rayon de courbure des pointes des outils de travail sous tension représente le paramètre principal de notre étude. Pour cela, on considère une distance inter-électrodes $d=4\text{ m}$ et des niveaux de tension $U= 60\text{ kV}$, 220 kV et 400 kV . Les variations du champ E_{\max} sur la périphérie de la pointe sont données dans la figure 3.7

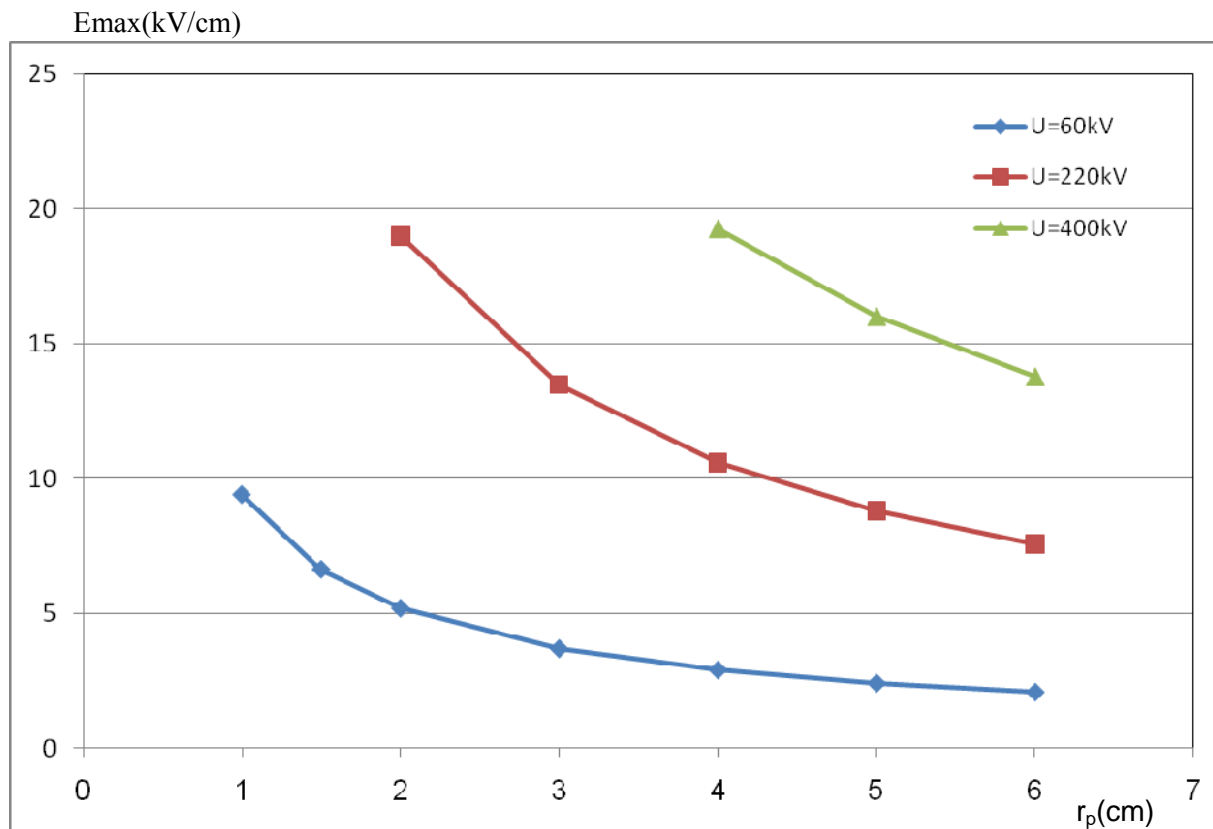


Figure 3.7: Variations du champ max dans l'intervalle inter électrodes en fonction du rayon de courbure de la pointe avec $d=4\text{m}$; $U=60\text{ kV}$, 220 kV et 400kV .

On remarque que le champ électrique est inversement proportionnel au rayon de courbure; il est d'autant plus important que le rayon de courbure r_p est petit. Il y a lieu de mentionner également que l'intensification du champ est beaucoup plus importante pour des rayons de courbure de plus en plus petits. Lorsqu'on applique une tension de 220kV , sa valeur passe de 7.58 kV/cm pour un rayon de 60 mm à 19 KV/cm pour un rayon de 20 mm . Il suit une loi de variation de la forme :

$$E_{\max} = 34.r_p^{-0.84} \text{ avec un coefficient de détermination de } 1.$$

Où E_{\max} est en kV/m et r_p en mètres.

II.3.3 Influence de la distance inter-électrodes sur le champ E_{\max} .

De la même manière que précédemment, en considérant trois niveaux de tension $U = 60 \text{ kV}$, 220 kV et 400 kV avec un rayon de courbure $r_p = 0.03 \text{ m}$, on varie la distance inter-électrodes d (Figure 3.8).

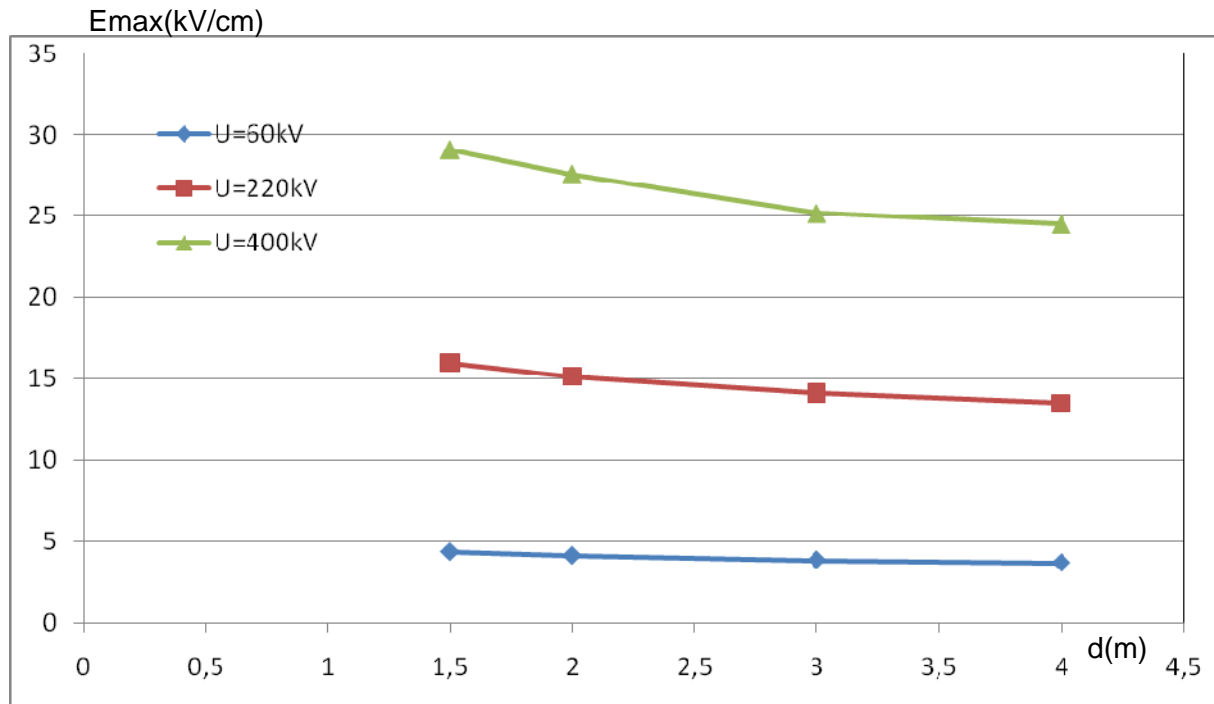


Figure 3.8 : Variations du champ électrique maximal en fonction de la distance inter-électrodes pour trois niveaux de tension: 60kV, 220kV et 400kV.

La variation du champ électrique maximal est inversement proportionnelle à la distance inter-électrodes (Fig.3.8). Il est d'autant plus faible que l'on s'éloigne du plan. Sa loi de variation peut être aussi bien décrite par une fonction en puissance, à l'image de celle liant le champ maximum au rayon de courbure de la pointe. L'intensification est cependant moins importante par rapport au rayon de courbure. Pour une tension de 220kV, la loi de variation est de la forme:

$E_{\max} = 17 \cdot d^{-0.17}$ avec un coefficient de détermination de 0.999.
où E_{\max} est en kV/m et d en mètres.

III- Champ électrique entre deux conducteurs aériens.

Soient deux conducteurs cylindriques parallèles séparés par un intervalle d , de rayon identique r , de charges linéiques q^+ et q^- portés à une différence de potentiel U_c (figure 3.10).

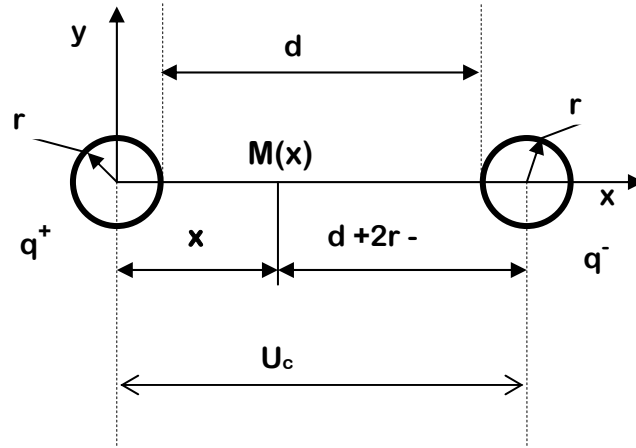


Figure 3.10 : Champ électrique entre deux conducteurs identiques parallèles.

En utilisant l'équation 3.4 et en appliquant le principe de superposition, sur l'axe des abscisses (ox), le champ électrique $E(x)$ en un point $M(x)$ entre les conducteurs est égal à:

$$E(x) = \frac{q}{2\pi\epsilon} \left[\frac{1}{x} + \frac{1}{d+2r-x} \right] \tag{3.20}$$

et par intégration par rapport à la variable x , on obtient:

$$U_c = \frac{q}{2\pi\epsilon} \left[\int_r^{d+r} \frac{1}{x} dx + \int_r^{d+r} \frac{1}{d+2r-x} dx \right] \tag{3.21}$$

En intégrant la relation (3.21), on obtient:

$$U_c = \frac{2q}{2\pi\epsilon} \ln\left(\frac{d+r}{r}\right) \tag{3.22}$$

Et en introduisant la relation (3.22) dans (3.20), il vient :

$$E(x) = \frac{U_c}{2 \ln\left(\frac{d+r}{r}\right)} \cdot \left(\frac{1}{x} + \frac{1}{d+2r-x} \right) \tag{3.23}$$

Pour $x = r$, le champ sur la surface du conducteur serait maximum :

$$E_{\max} = \frac{U_c}{2 \ln\left(\frac{d+r}{r}\right)} \cdot \left(\frac{d+2r}{r(d+r)} \right) \tag{3.24}$$

Dans le cas des lignes aériennes haute tension où r est très petit devant d , pour la simplification des calculs, le champ E_{\max} peut être pris égal à:

$$E_{\max} \cong \frac{U_c}{2r \cdot \ln(d/r)} \quad (3.25)$$

L'équation (3.23) montre bien que le champ maximum E_{\max} se situe à la périphérie du conducteur, $x = r$ et est minimum à l'entre axe, à $x = d/2$.

Et comme le rayon r du conducteur est très petit devant d , le champ E_{\min} est approximativement égal à :

$$E_{\min} \cong \frac{2U_c}{d \cdot \ln(d/r)} \quad (3.26)$$

Les relations 3.25 et 3.26 donnent le rapport entre E_{\max} et E_{\min} :

$$\frac{E_{\max}}{E_{\min}} \cong \frac{d}{4r} \quad (3.27)$$

IV- Champ électrique produit par un conducteur au voisinage du sol.

Considérons un conducteur cylindrique de rayon r placé à une distance h au-dessus d'un sol parfaitement conducteur. Dans ce cas, on sait que le champ électrique s'établit comme si le conducteur se trouvait en présence de son "image" [5, 7, 30]. Le sol parfaitement conducteur se comporte comme un miroir comme le montre la figure 3.9 ci-dessous.

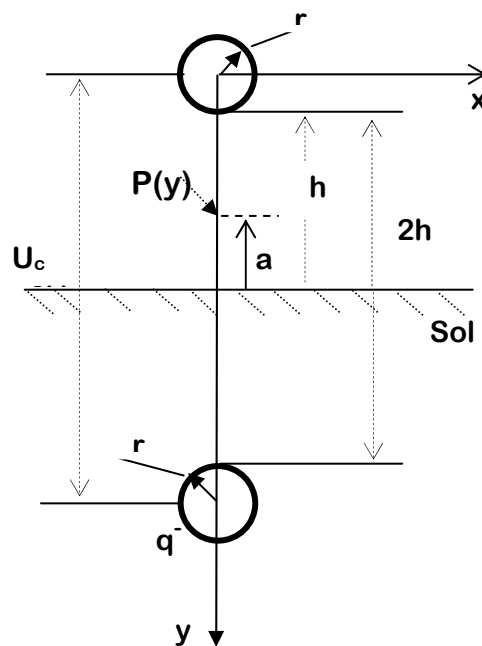


Figure 3.9 : Schéma représentatif du système conducteur - sol

En utilisant les relations (3.20 et 3.23), on déduit la relation du champ électrique en un point quelconque P(y) situé à une distance y du conducteur. Le champ électrique est donné par la relation 3.28.

$$E(y) = \frac{V}{\ln\left(\frac{2h+r}{r}\right)} \cdot \left(\frac{1}{y} + \frac{1}{2h+2r-y} \right) \quad (3.28)$$

Le champ au sol est obtenu pour $y = h+r$, il correspond à la valeur minimale du champ par contre pour y égal à r le champ est maximum (sur le conducteur).

$$E_{sol} \cong \frac{2V}{(h+r) \cdot \ln[(2h+r)/r]} \quad (3.29)$$

Pour déterminer le champ électrique en un point P(y) distant de a du sol, on pose :
 $y = h+r-a$, l'équation 3.28 devient :

$$E(a) = \frac{V}{\ln\left(\frac{2h+r}{r}\right)} \cdot \left(\frac{1}{(h+r-a)} + \frac{1}{(h+r+a)} \right) \quad (3.30)$$

Dans le cas des lignes aériennes haute tension le rayon du conducteur r peut être négligé devant la hauteur h. La relation devient :

$$E(a) = \frac{V}{\ln\left(\frac{2h}{r}\right)} \cdot \left(\frac{1}{(h-a)} + \frac{1}{(h+a)} \right) \quad (3.31)$$

Ou autrement,

$$E(a) = \frac{V}{\ln\left(\frac{2h+r}{r}\right)} \cdot \left(\frac{2h}{h^2 - a^2} \right) \quad (3.32)$$

V- Champ électrique autour des conducteurs de lignes.

V.1- Système de deux conducteurs cylindriques.

L'introduction de l'influence du sol situé à la distance h de la ligne [5, 30] donne l'équation suivante:

$$E(x) = \frac{U_c}{2 \ln \left(\frac{d}{r \sqrt{1 + \left(\frac{d}{2h} \right)^2}} \right)} \left(\frac{1}{x} - \frac{1}{d-x} \right) \quad (3.33)$$

Prenons deux conducteurs d'une ligne aérienne dont le diamètre de chacun d'eux est 1 cm, la distance d entre ces deux conducteurs vaut 2 m et la hauteur du conducteur par rapport au sol h = 30.6 m. Les variations du champ selon la direction x (fig.3.10) sont représentées sur les figures 3.11 et 3.12 pour les tensions de service de 60 et 220kV.

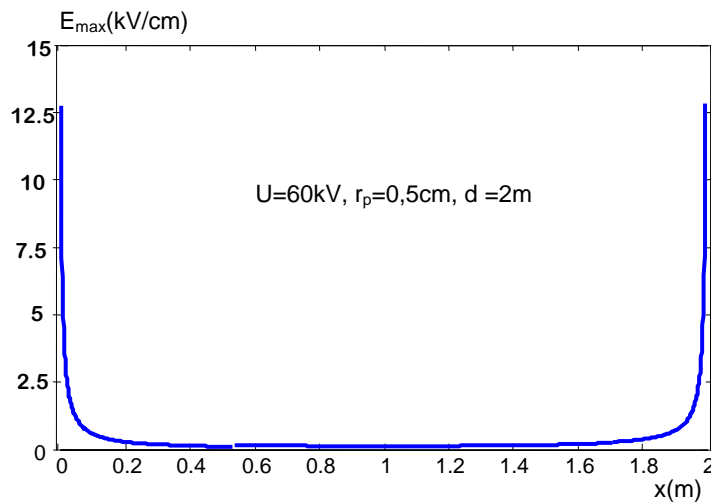


Figure 3.11: Variations du champ électrique E_{max} entre conducteurs d'une ligne de 60 kV, hauteur h = 30,6m

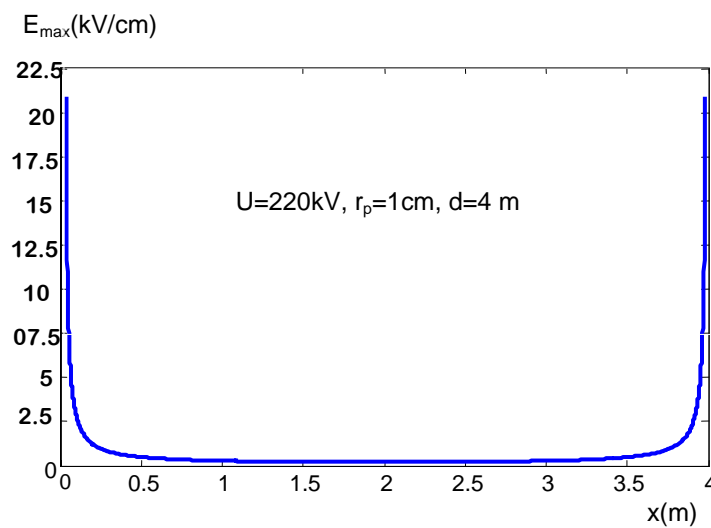


Figure 3.12 : Variation du champ électrique E_{max} entre conducteurs d'une ligne de 220 kV, hauteur h = 30,6m

Les figures 3.11 et 3.12 montrent que le champ maximum se trouve sur la périphérie des deux conducteurs ($x = 0$ et $x=d$) et le champ minimum est au milieu de la distance entre les deux conducteurs ($x = d/2$).

On refait le même travail pour les deux lignes de 60 et 220 kV, mais cette fois ci, on étudie la variation du champ en fonction de la hauteur h à une distance inter électrode $x = d/2$. Ces variations sont représentées aux figures 3.13 et 3.14 (relation 3.33 appliquée à la fig.3.10).

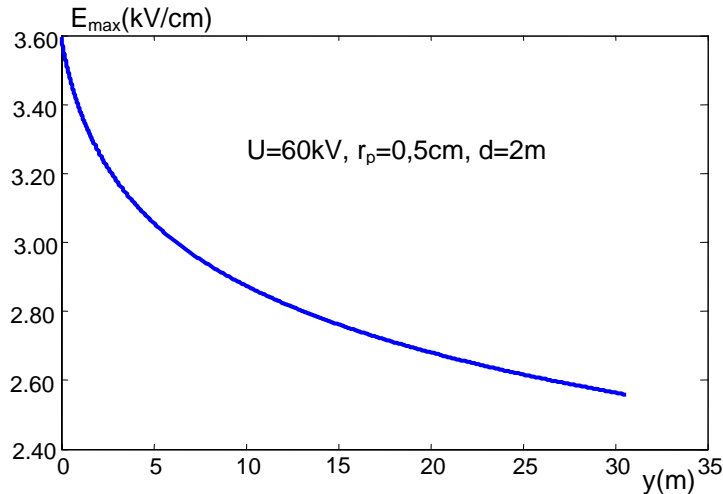


Figure 3.13 : Variation du champ électrique E_{\max} en fonction de la hauteur d'une ligne de 60 kV, hauteur $h = 30,6\text{m}$

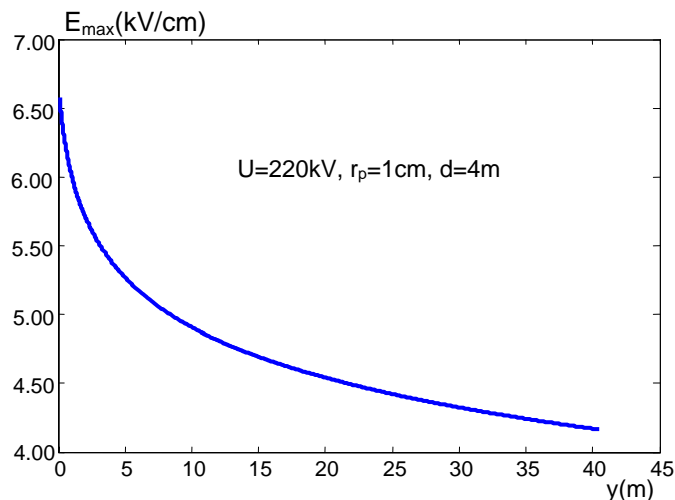


Figure 3.14: Variation du champ électrique E_{\max} en fonction de la hauteur d'une ligne de 220 kV, hauteur $h = 30,6\text{m}$

Un résultat attendu est retrouvé, à savoir que le champ électrique est inversement proportionnel à la position entre conducteurs et à la position par rapport au sol. Plus on s'éloigne du conducteurs, plus le champ baisse.

Ainsi, l'intensité du champ électrique est influencée par les facteurs suivants :

- ✚ La distance inter-électrode : plus la distance inter-électrodes est faible plus le champ est intense.
- ✚ Le rayon de courbure : la diminution du rayon de courbure augmente l'intensité du champ électrique.
- ✚ L'amplitude de la tension : l'augmentation de la tension provoque l'augmentation du champ électrique.

Le champ électrique dépend donc de la tension, de la géométrie et de l'état du système. Ainsi, toute irrégularité de surface, causée par des poussières, éraflures, bribes végétales ou insectes se traduit par un renforcement local du champ électrique par effet de pointe [1, 58].

Bien que le calcul théorique du champ électrique soit plus précis, il reste difficile, voir impossible, d'étudier le champ électrique dans les configurations réelles par un calcul théorique vu la complexité de ces dernières. En effet, les configurations prises dans ce chapitre ne sont que des approches de la configuration réelle. Nous devons utiliser une méthode plus adaptée.

V.2- Champs électriques engendrés par les lignes aériennes [21, 44-46].

Le champ électrique présent sous une ligne à haute tension est un sujet qui a longtemps fait l'objet d'inquiétudes. Bien qu'aucune enquête épidémiologique à long terme n'ait encore prouvé les méfaits des champs électriques, le législateur a déjà pris des mesures pour les limiter.

D'une façon générale, le champ superficiel se calcule par le théorème de Gauss. Lors de l'évolution des champs électriques aux environs des installations à HT, il est souvent fait usage de calculs simplifiés en assimilant les faisceaux à des conducteurs simples équivalents [7, 59].

$$E = \frac{q}{2\pi\epsilon_0 r} \quad (3.30)$$

Avec : E : Champ électrique superficiel en V/ cm.

$\epsilon_0 = 1/36\pi 10^9$ est la permittivité du vide ou de l'air, en F/ m.

r : Rayon du conducteur équivalent en cm.

q : Charge superficielle par unité de longueur en C/m.

Dans le cas des conducteurs en faisceau (figure 3.15), on calcule le rayon équivalent par la relation suivante [37]:

$$r_{\text{éq}} = R_i \left(\frac{n_i r_i}{R_i} \right)^{\frac{1}{n_i}} \tag{3.31}$$

Où : R_i : Le rayon géométrique du faisceau.
 n_i : Le nombre de conducteurs élémentaires du faisceau.
 r_i : Le rayon du conducteur élémentaire.

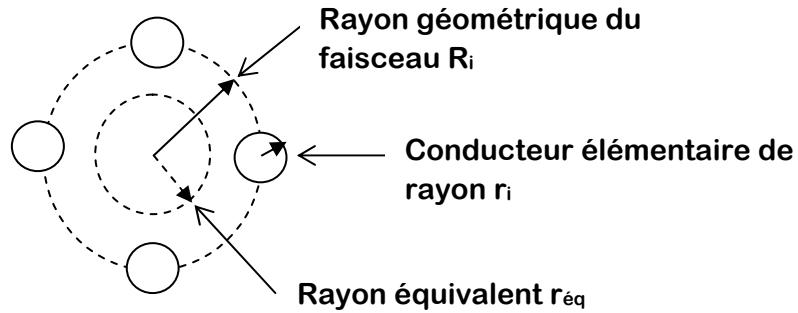


Figure 3.15 : Phase en faisceau de 4 conducteurs élémentaires, $n_i=4$

Par la figure 3.16 ci-dessous, on modélise une ligne électrique aérienne multifilaire.

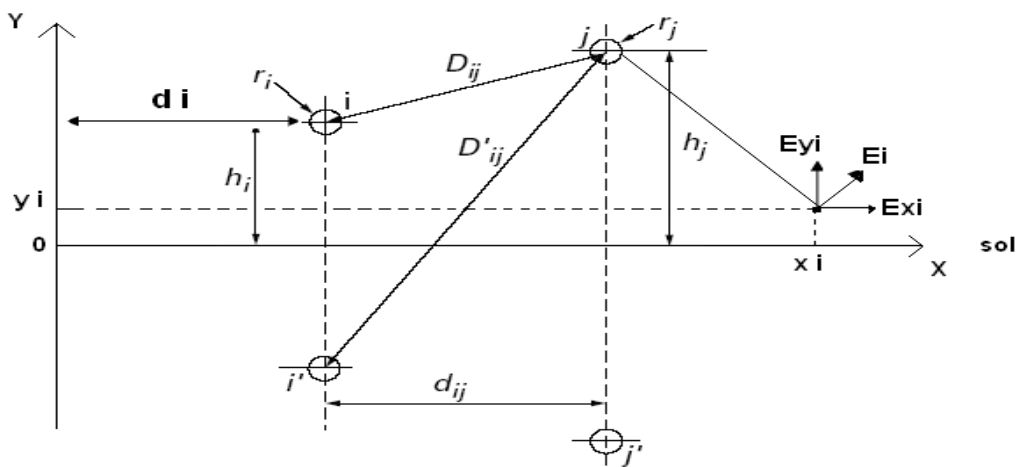


Figure 3.16 : Schéma représentatif des conducteurs de ligne

Dans le cas d'une ligne multifilaire les charges linéiques q portées par les conducteurs se calculent en utilisant l'équation matricielle des charges:

$$\{q\} = [C] \cdot \{V\}$$

où $\{q\}$ et $\{V\}$ sont respectivement les matrices unicolonnes des charges et des potentiels, et $[C]$ est la matrice carrée des coefficients de capacité propre et mutuelle.

V.2.1- Méthodologie de Calcul.

Pour déterminer [C], on forme la matrice des coefficients de potentiels, soit [P_{ij}] et on calcule la matrice des capacités et des charges.

Les coefficients des potentiels sont obtenus par application directe de la théorie des images : on remplace le sol, considéré comme un plan de potentiel nul, par l'image des conducteurs par rapport à ce plan (figure 3.15) [7, 37].

D'une façon générale, désignons par i, j, ... les conducteurs parallèles en présence, et par i', j', ... leurs images.

En se conformant aux notations de la figure 3.15, on pose :

r_i : rayon du conducteur i ; r_j : rayon du conducteur j ;

$$D_{ij} = \sqrt{d_{ij}^2 + (h_j - h_i)^2} \quad (3.32)$$

$$D'_{ij} = \sqrt{d_{ij}^2 + (h_j + h_i)^2} \quad (3.33)$$

Où :

d_{ij} : Distance entre le conducteur (i) et le conducteur (j).

h_i : La hauteur du conducteur (i) à partir du sol.

h_j : La hauteur du conducteur (j) à partir du sol.

La matrice des capacités s'obtient en inversant la matrice des potentiels.

$$[C] = [P]^{-1} \quad (3.34)$$

Les coefficients de potentiel s'écrivent :

$$P_{ij} = \frac{1}{2\pi \epsilon_0} \ln\left(\frac{D'_{ij}}{D_{ij}}\right) \quad (3.35)$$

Et $P_{ij} = P_{ji}$

$$P_{ii} = \frac{1}{2\pi \epsilon_0} \ln\left(\frac{2h_i}{r_i}\right) \quad (3.36)$$

Remarque : en pratique, les hauteurs h_i et h_j des conducteurs varient le long d'une portée, ainsi que d'une portée à l'autre. Dans les calculs de gradients on utilise les hauteurs moyennes h_{imoy} : hauteur moyenne du conducteur (i) à partir du sol définies par :

h_{imoy} = hauteur d'accrochage moyenne – 2/3 flèche moyenne.

A l'aide des coefficients de potentiel ainsi obtenus, on forme la matrice carrée :

$$[P] = \begin{bmatrix} P_{11} & \dots & P_{1i} & \dots & P_{1n} \\ \dots & P_{22} & \dots & \dots & \dots \\ P_{j1} & \dots & P_{ji} & \dots & P_{jn} \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ P_{n1} & \dots & P_{ni} & \dots & P_{nn} \end{bmatrix}$$

Par inversion, on en déduit la matrice des capacités :

$$[C] = \begin{bmatrix} P_{11} & \dots & P_{1i} & \dots & P_{1n} \\ \dots & P_{22} & \dots & \dots & \dots \\ P_{j1} & \dots & P_{ji} & \dots & P_{jn} \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ P_{n1} & \dots & P_{ni} & \dots & P_{nn} \end{bmatrix}^{-1}$$

La matrice des charges s'obtient en multipliant la matrice des capacités par celle des potentiels.

Remarque : Dans les lignes triphasées, la charge d'un conducteur, et par conséquent son champ superficiel dépend de la succession des phases.

Lorsque la succession est définie par 1, a^2 , a , la matrice unicolonne des tensions est :

$$\begin{bmatrix} V_1 \\ V_2 \\ V_3 \end{bmatrix} = V \begin{bmatrix} 1 + j0 \\ -0.5 + j0.866 \\ -0.5 - j0.866 \end{bmatrix} \quad (3.37)$$

V.2.2-Calcul de la composante horizontale E_x . [51, 52]

Soit E_x la composante horizontale globale de n conducteurs suivant ox . On a :

$$E_x = \sum_{i=1}^n E_{x_i} \quad (3.38)$$

Avec :

$$E_{x_i} = \frac{|q_i|}{2\pi \epsilon_0} \left(\frac{x-d_i}{(x-d_i)^2 + (h_i-y)^2} - \frac{x-d_i}{(x-d_i)^2 + (y+h_i)^2} \right) \quad (3.39)$$

$|q_i|$: Module de la charge du conducteur i .

d_i : L'abscisse du conducteur i .

h_i : La hauteur du conducteur i .

V.2.3-Calcul de la composante verticale E_y .

Soit E_y la composante verticale globale de n conducteurs suivant oy . On a:

$$E_y = \sum_{i=1}^n E_{y_i} \quad (3.40)$$

$$E_{y_i} = \frac{|q_i|}{2\pi \epsilon_0} \left(\frac{h_i-y}{(x-d_i)^2 + (h_i-y)^2} + \frac{h_i-y}{(x-d_i)^2 + (y+h_i)^2} \right) \quad (3.41)$$

V.2.4-Calcul du champ unidirectionnel résultant.

Le champ résultant contient l'influence des deux composantes: verticale et horizontale.

$$E = \sqrt{E_x^2 + E_y^2} \quad (3.42)$$

VI-Application: Calcul du champ électrique engendré par les lignes aériennes triphasées à haute tension 220kV et 400kV.

Dans cette partie, à titre d'application, on détermine la variation du champ électrique engendré par deux lignes haute tension de 220 et 400kV à 2m au dessus du sol en faisant un déplacement latéral de 100m de part et d'autre du conducteur centrale de la ligne. Et voir les paramètres influençant sur la distribution du champ électrique.

Hypothèses de calcul.

Les hypothèses communes de calcul du champ électrique pour les deux lignes 400 et 220 kV sont les suivantes :

- On considère que les champs ne sont pas déformés par des éléments conducteurs étrangers.
- Aucune ligne électrique ne se trouve à proximité de la ligne étudiée (pour que le champ électrique engendré par cette ligne n'influe pas sur le champ créée par la ligne étudiée).

Dans cette étude on se limite aux deux types de pylônes suivants:

a/ Armement double drapeau, ligne 2 ternes (figure 3.17) avec :

- 6 x 2 conducteurs de phase jumelés Almélec (Aster) 570 mm², diamètre = 31,05 mm.

Ecartement entre sous conducteurs 400 mm.

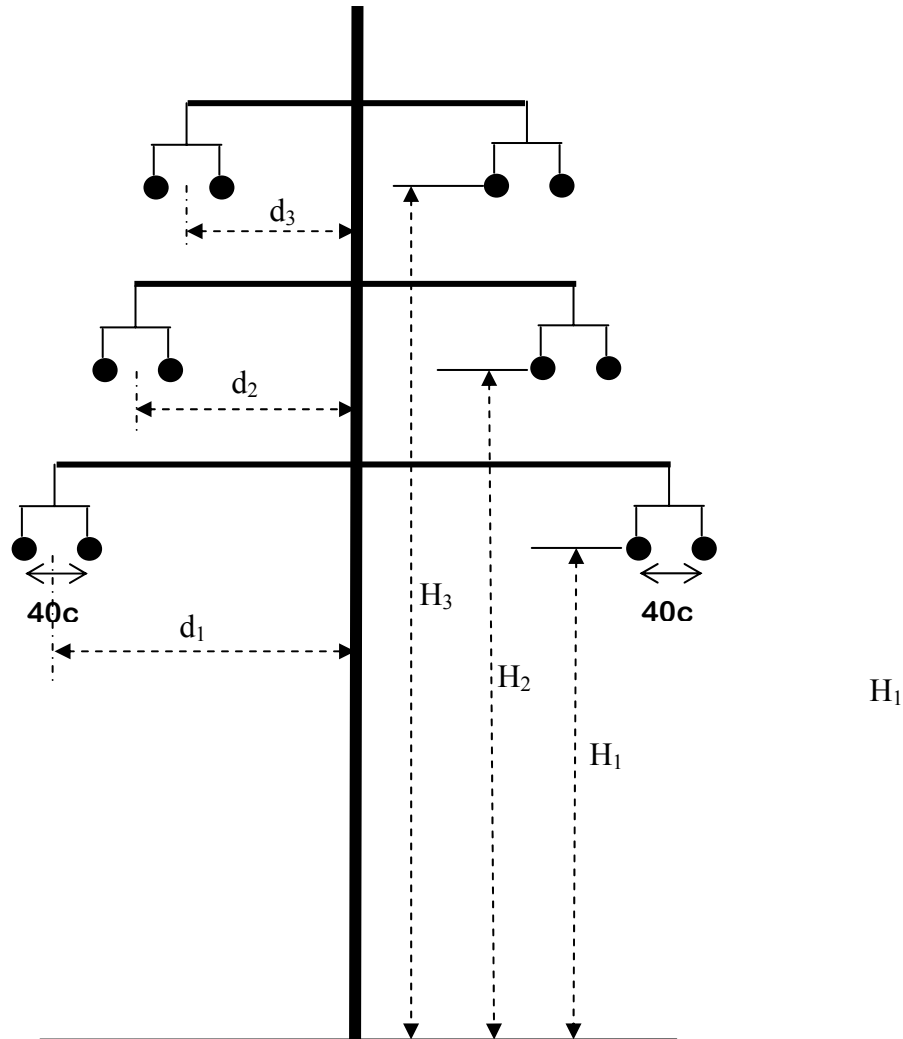


Figure 3.17 : Ligne à deux ternes symétriques, Armement double drapeau, 2 conducteurs élémentaires par phase

b/ Armement CHAT (figure 3.18) :

-1 seul terne.

-3x2 conducteurs de phase jumelés en Almélec (Aster) de 570 mm², diamètre = 31,05 mm, Ecartement entre sous conducteurs du faisceau: 400 mm.

Pour ces deux types de pylônes, l'utilisation d'un faisceau de deux conducteurs élémentaires a pour but de diminuer le champ électrique superficiel du conducteur et par conséquent la diminution de l'effet couronne.

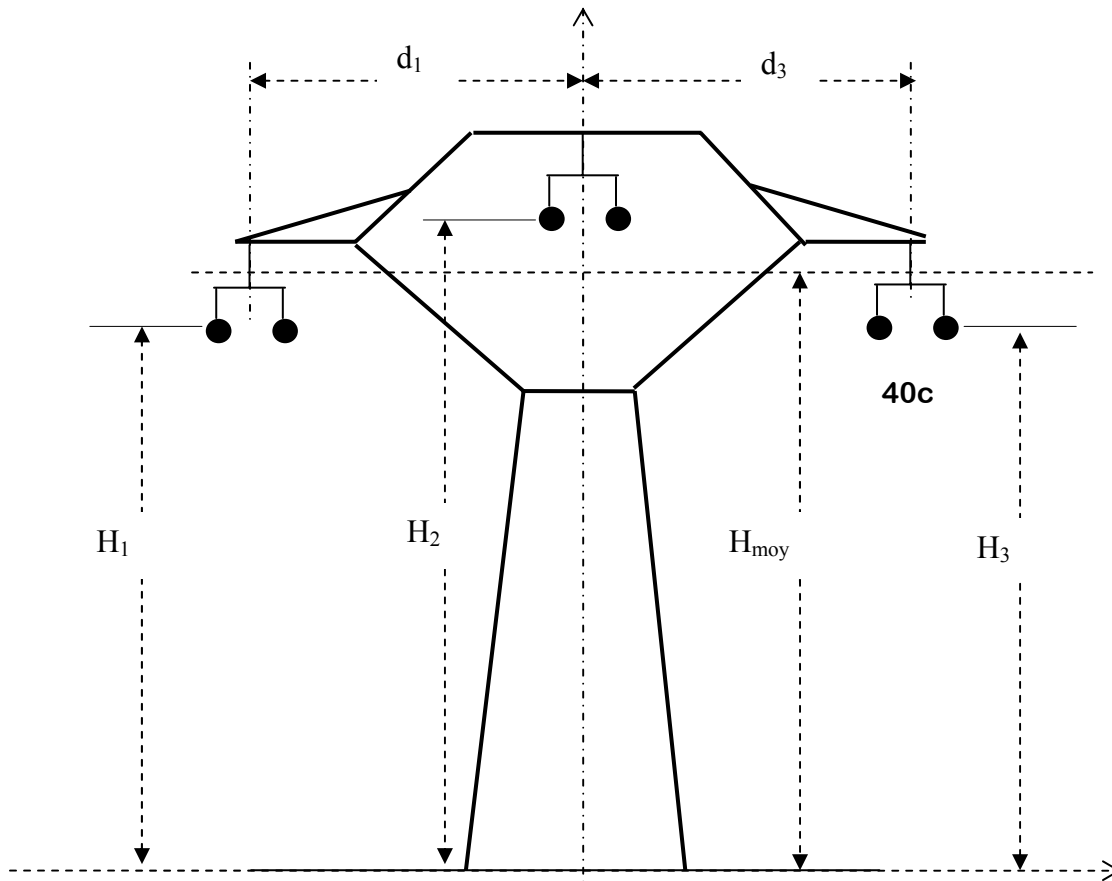


Figure 3.18 : Ligne en armement Chat, 2 conducteurs élémentaires par phase

VI.1-Influence de la tension de la ligne sur le champ électrique.

Pour apprécier l'influence de la tension de la ligne sur le champ électrique engendré, il est préférable de prendre les caractéristiques des pylônes pour les deux lignes pour éliminer les autres facteurs (hauteur et abscisse des phases).

Pour les deux niveaux de tension on prend les caractéristiques de pylône suivantes :

- Armement chat à 1 seul terre
- Hauteur moyenne des phases par rapport au sol $H_{1\text{moy}} = H_{2\text{moy}} = H_{3\text{moy}} = 15.3\text{m}$.
- Flèche médiane $f = 3.9\text{m}$.
- Abscisse des phases par rapport à l'axe central des phases. $d_1 = -11\text{m}$, $d_2 = 0\text{m}$, $d_3 = 11\text{m}$.

En appliquant les relations 3.38, 3.40 et 3.42, on obtient les variations du champ électrique à 2m au dessus du sol (figures 3.19 et 3.20) pour les deux cas en faisant un déplacement latéral de 100m de part et d'autre de l'axe central des phases.[16, 25, 47].

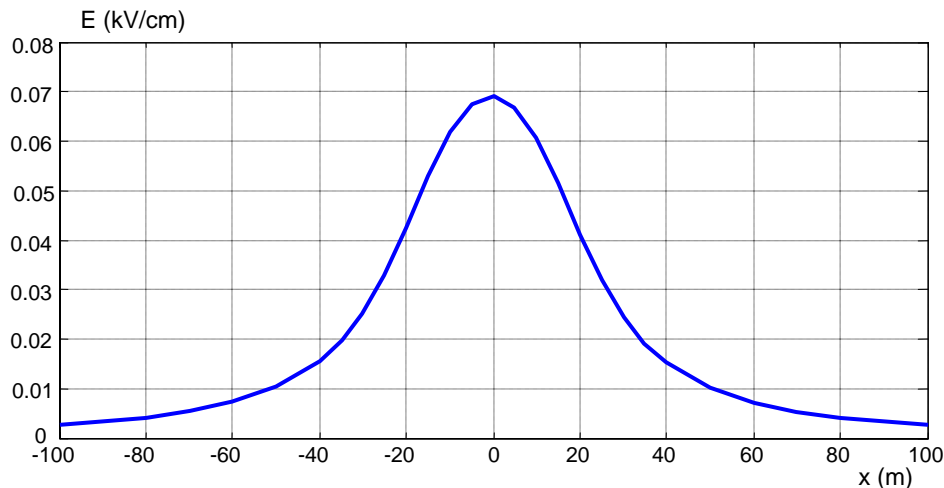


Figure 3.19 : Variation du champ électrique à 2 m au dessus du sol pour une ligne de 220kV, armement Chat

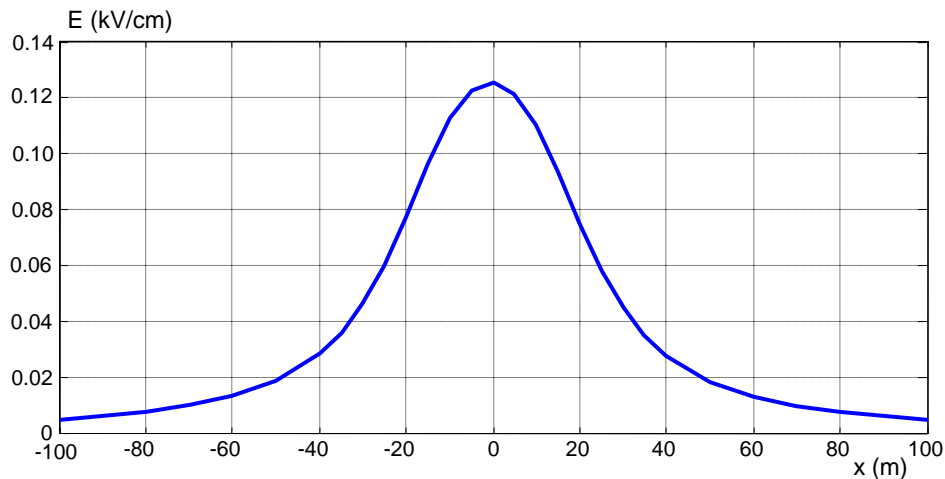


Figure.3.20 : Variation du champ électrique à 2m au dessus du sol pour une ligne de 400kV, armement Chat

On constate que le champ électrique engendré par la ligne est proportionnel à la tension de celle-ci. Il est d'autant plus grand que le niveau de tension est élevé. Ce champ est maximum à l'axe du pylône et diminue en s'éloignant de la ligne.

VI.2- Influence des dimensions du pylône sur le champ électrique.

Contrairement au cas précédent, on compare la variation du champ électrique à 2m au dessus du sol pour les deux lignes 220 et 400 kV ayant les caractéristiques suivantes :

Ligne 400 kV :

- Type d'armement : Double drapeau à 2 ternes. disposition des phases 1-a-a².
- Les hauteurs des phases du premier terne : $H_1=23\text{m}$, $H_2=32.2\text{m}$ et $H_3=42.2\text{m}$.
- Les abscisses des phases du premier terne : $d_1=9.3\text{m}$, $d_2=8.5\text{m}$ et $d_3=7.7\text{m}$.
- Les hauteurs des phases du deuxième terne : $H_1=23\text{m}$, $H_2=32.2\text{m}$ et $H_3=42.2\text{m}$.

- Les abscisses des phases du deuxième terne : $d_1 = -9.3\text{m}$, $d_2 = -8.5\text{m}$ et $d_3 = -7.7\text{m}$.

Ligne 220 kV :

- Type d'armement : Double drapeau à 2 ternes. Disposition des phases (1-a-a²).
- Les hauteurs des phases du premier terne : $H_1=23\text{m}$, $H_2=29\text{m}$ et $H_3=35.2\text{m}$.
- Les abscisses des phases du premier terne : $d_1=5.8\text{m}$, $d_2=5.3\text{m}$ et $d_3=4.8\text{m}$.
- Les hauteurs des phases du deuxième terne : $H_1=23\text{m}$, $H_2=29\text{m}$ et $H_3=35.2\text{m}$.
- Les abscisses des phases du deuxième terne : $d_1 = -5.8\text{m}$, $d_2 = -5.3\text{m}$ et $d_3 = -4.8\text{m}$.

Les figures 3.21 et 3.22 montrent les variations du champ électrique à 2 m au dessus du sol pour les deux lignes considérées.

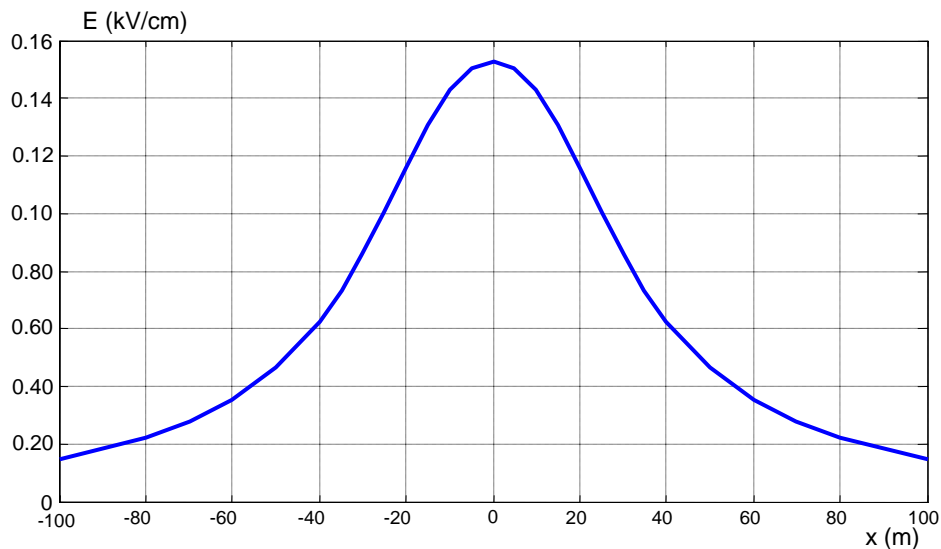


Figure 3.21 : Variation du champ électrique de la ligne à 2 m au dessus du sol pour une ligne 400kV, armement double drapeau.

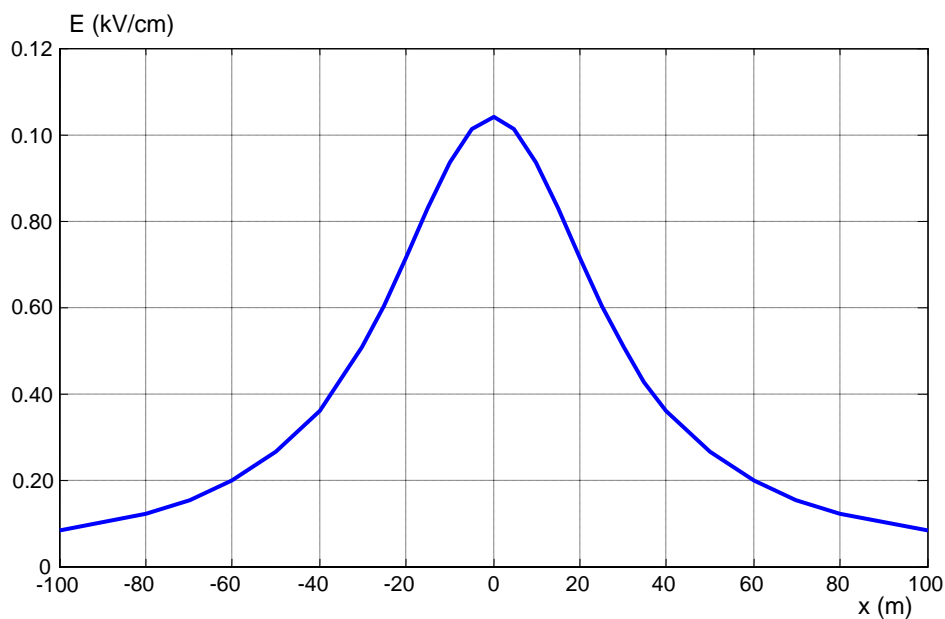


Figure 3.22 : Variation du champ électrique de la ligne 220 kV à 2 m au dessus du sol, armement double drapeau.

En prenant la même géométrie de pylône pour les deux niveaux de tension 220 et 400 kV et en exploitant les résultats obtenus précédemment, on trouve que le champ électrique engendré par la ligne 400 kV est supérieur de 55% par rapport à celui engendré par une ligne 220 kV.

D'après ces courbes, on constate que le champ créé par la ligne 220 kV est supérieur à celui engendré par une ligne 220 kV exploitée dans un pylône de 400 kV (changement de dimension).

Ainsi, la hauteur, l'abscisse et l'écartement entre phases influent sur la distribution du champ électrique de telle sorte que la diminution de la hauteur et l'écartement entre phases accroît le champ engendré par la ligne.

VI.3-Influence de la position des indices de phase sur le champ électrique :

Dans ce cas, on fait l'étude du changement de déphasage sur le champ électrique créé par une ligne de 220 kV.

Dans le premier cas, on calcule les variations du champ pour la configuration double drapeau 2 ternes qui a une disposition définie par : $(1-a-a^2)$ pour le premier terne et $(1-a-a^2)$ pour le deuxième terne, tandis que dans le deuxième cas, on change la position des indices des phases du deuxième terne de telle sorte qu'elle devient (a^2-a-1) .

Les variations du champ électrique obtenues pour les deux cas sont données dans les figures 3.23 et 3.24.

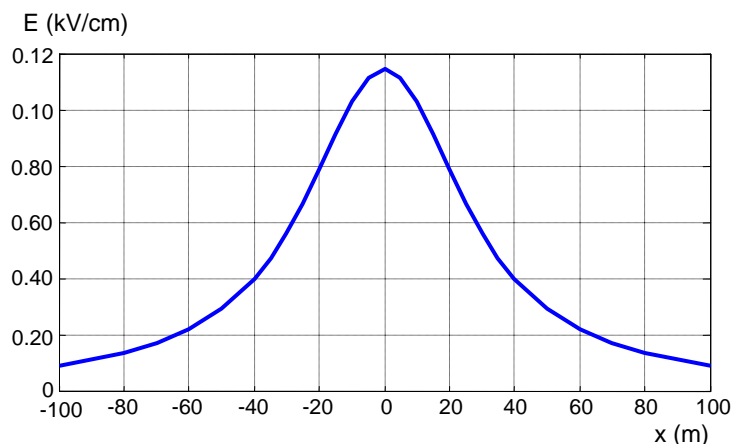


Figure 3.23 : Variation du champ électrique à 2m au dessus du sol pour une ligne 220 kV armement double drapeau, position des indices des phases $(1 a a^2)$ et $(a^2 a 1)$

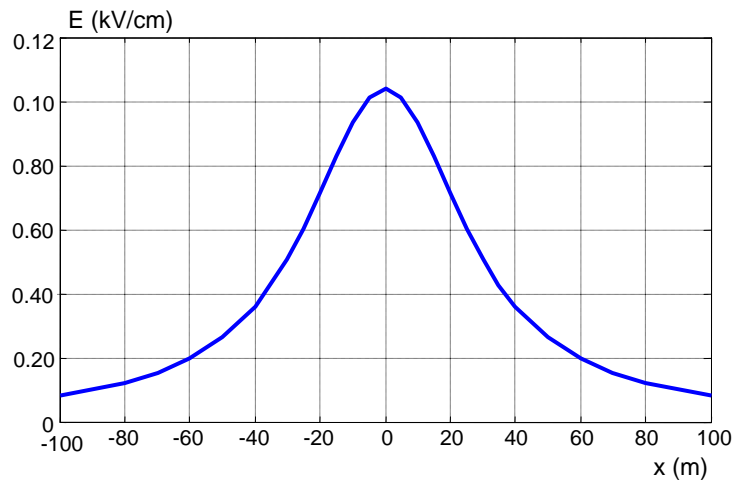


Figure 3.24 : Variation du champ électrique à 2m au dessus du sol d'une ligne 220 kV armement double drapeau, position des indices de phases (1 a a²) pour le premier terne et (1 a a²) pour le deuxième terne.

D'après ces deux figures, on constate que le changement des indices de phase influe légèrement sur le champ électrique. Cette influence est de l'ordre de 1 kV /m à l'axe du pylône, 0.53 kV/m à 30m de l'axe du pylône et 0.166 kV à 60 m de l'axe du pylône.

VII- Variations du champ électrique autour des conducteurs des lignes aériennes triphasées [16].

L'introduction des influences mutuelles des conducteurs dans le calcul du champ électrique nous a permis d'obtenir des résultats suffisamment précis. Nous avons pu ainsi obtenir les variations du champ électrique en fonction de la position dans l'espace pour une ligne triphasée en nappe horizontale (figure 3.25) ayant les caractéristiques suivantes :

- Conducteurs en Almélec de rayon: $r = 0.015$ m ;
- Hauteur moyenne par rapport au sol: $h = 26$ m;
- Intervalle entre conducteurs: $d = 4$ m;
- Flèche: $f = 8$ m.

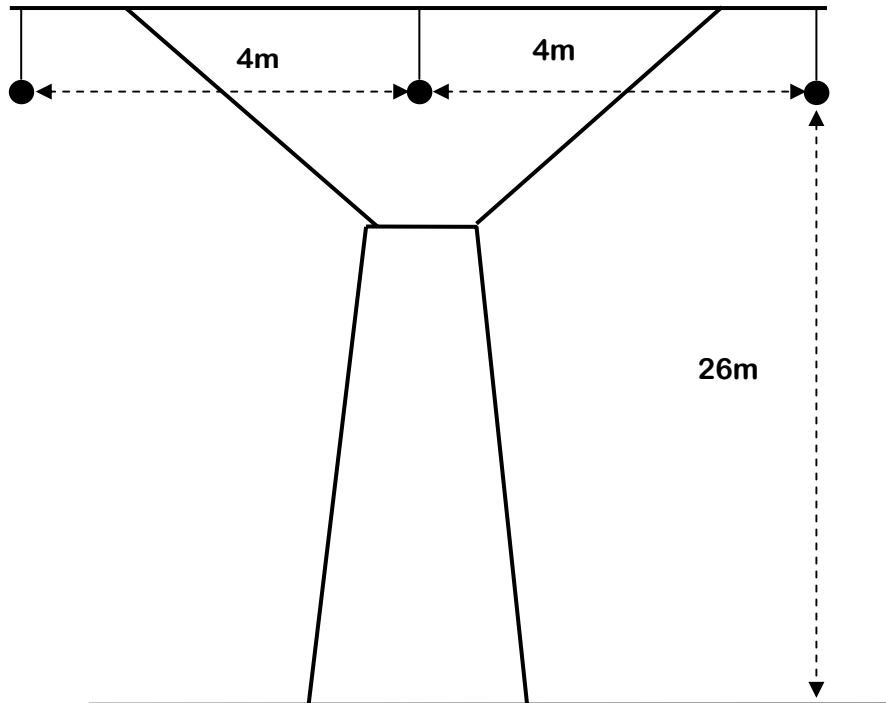


Figure 3.25 : Ligne armement en nappe horizontale, 1 conducteur élémentaire par phase

Les figures 3.26, 3.27 et 3.28 présentent de telles variations sur un plan latéral respectivement situé à 26 m, à 1,5 m et à 28 m du sol. Les résultats obtenus sont similaires à ceux obtenus par d'autres auteurs [16, 47].

La valeur maximale du champ électrique se situe à la surface du conducteur central; elle est de 11,84 kV/cm pour une ligne sous 220kV.

Dans la figure 3.29, nous présentons les variations du champ électrique sur un plan vertical entre le sol et le conducteur central pour une tension de 220 kV et un écartement entre phases de 4m.

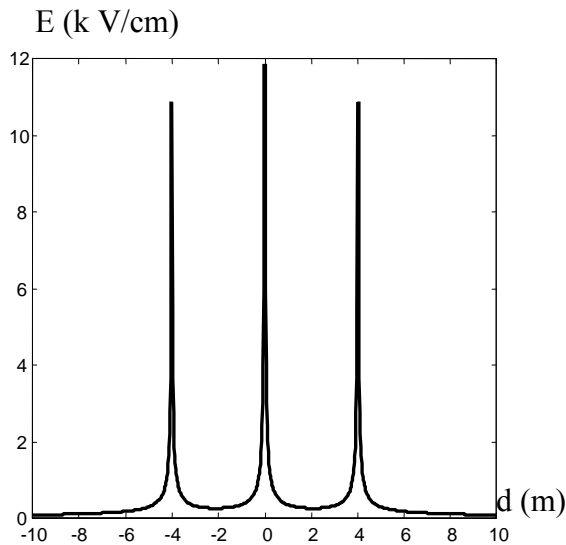


Figure 3.26 : Variation du champ électrique E au niveau des conducteurs (à 26 m du sol) en faisant un déplacement latéral de 10 m de part et d'autre du conducteur central. Ligne en nappe horizontale, $U=220\text{kV}$; $d=4\text{m}$.

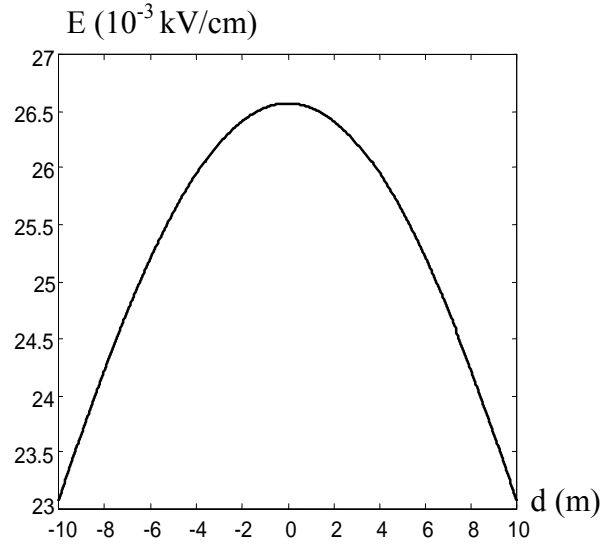


Figure 3.27 : Variation du champ électrique E à 1,50m du sol en faisant un déplacement latéral de 10 m de part et d'autre du conducteur central. Ligne en nappe horizontale, $U=220\text{kV}$; $d=4\text{m}$.

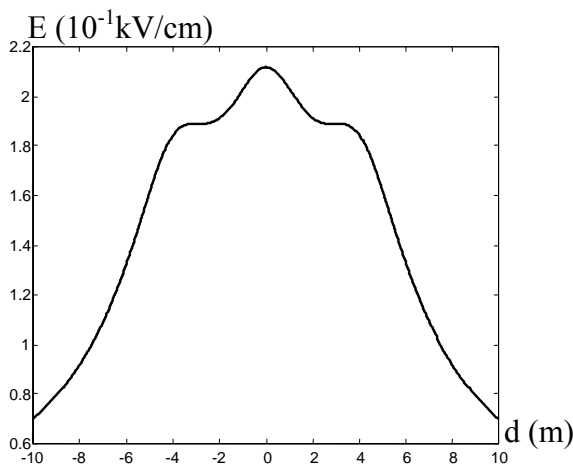


Figure 3.28 : Variation du champ électrique E à 28m du sol en faisant un déplacement latéral de 10 m de part et d'autre du conducteur central. Ligne en nappe horizontale, $U=220\text{kV}$; $d=4\text{m}$.

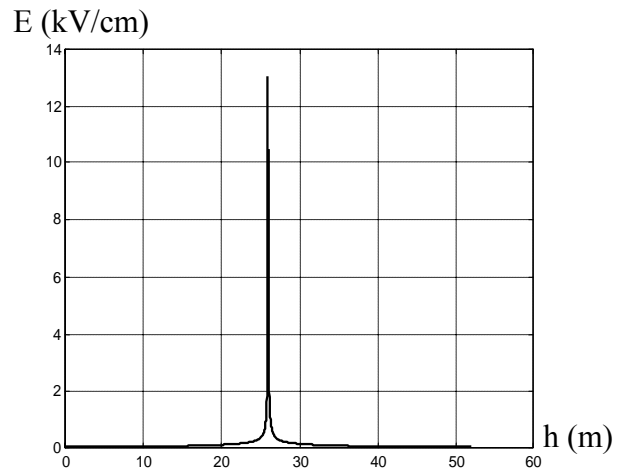


Figure 3.29 : Variation du champ électrique E en faisant un déplacement du sol vers le conducteur central. Ligne en nappe horizontale, $U=220\text{kV}$; $d=4\text{m}$.

Pour la même ligne U=220kV en nappe horizontale, nous avons étudié l'influence de l'intervalle 'd' entre conducteurs sur la variation du champ électrique E. Elle est représentée dans la figure 3.30.

Pour appréciation, le champ électrique au niveau du conducteur central, est égal à : 20,52 kV/cm pour un intervalle d =0.5m ; 13,72 kV/cm pour un intervalle d = 2 m et 10 kV/cm pour un intervalle d=10m.

Une relation empirique de la forme :

$E = 15,84.d^{-0,21}$ lie le champ électrique E à l'intervalle d. On constate que le champ électrique E diminue lorsqu'on augmente l'intervalle entre conducteurs.

Le rayon des conducteurs influe également sur la valeur du champ électrique. La figure 3.31 montre les variations du champ électrique maximal lorsque le rayon des conducteurs est varié.

Une relation empirique de la forme :

$E = 1,16.r^{-0,53}$ lie le champ électrique E au rayon du conducteur r.

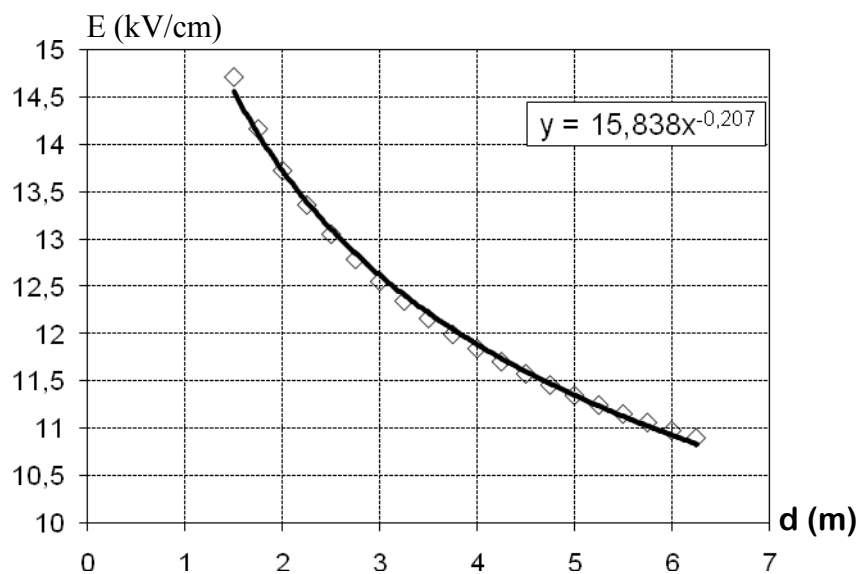


Figure 3.30 : Variations du champ à 3mm de la surface du conducteur central de rayon 15mm et situé à 26m du sol, en fonction de la distance entre conducteurs. Ligne triphasée de 220kV en nappe horizontale

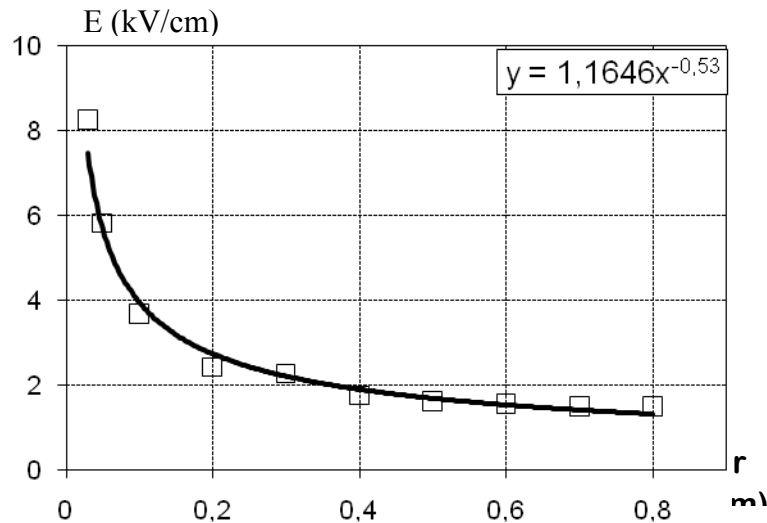


Figure 3.31 : Variations du champ à 3mm de la surface du conducteur central situé à 26m du sol en fonction du rayon du conducteur. Ligne triphasée de 220kV en nappe horizontale.

D'autre part, nous avons considéré une ligne en triangle de tension (type chat) : $U_n=220$ kV, caractérisée par les données suivantes: - Conducteur en Almélec de rayon: $r = 0.015$ m; - Hauteur par rapport au sol: $h = 26$ m pour les conducteurs latéraux 1 et 3, et 30 m pour le conducteur central 2; - Intervalle entre conducteurs : $d= 4$ m; - Flèche: $f = 8$ m

Les mêmes courbes ont été tracées pour cette ligne en triangle. Les résultats obtenus montrent l'influence de la configuration géométrique des conducteurs sur l'intensité du champ électrique d'où il ressort que le champ E au niveau des conducteurs de la ligne en triangle est plus faible que celui de la ligne en nappe [16].

Pour cette partie, on peut conclure que les différents résultats des relations et courbes de distribution du champ électrique confirment que, pour une tension fixée, les rayons des conducteurs, l'intervalle entre conducteurs et la disposition (type d'armement), constituent les paramètres influents dans la répartition spatiale du champ électrique. Ainsi, le champ superficiel E augmente d'autant plus que le rayon du conducteur diminue ou/et l'intervalle entre conducteurs diminue.

Aussi, on peut relever que la variation du champ E donnée par la figure 3.27 concorde avec la forme du champ électrique critique (E_{seuil}) prévu par la relation 3.15 [5, 53].

Conclusion.

Les différentes courbes obtenues dans cette partie ont montré l'influence de la tension, la géométrie du pylône (hauteur et abscisse des phases et l'écartement entre elles) ainsi que le type d'armement, et enfin la position des indices des phases sur la répartition spatiale du champ électrique.

Le champ électrique est maximum à l'axe du pylône, il diminue en s'éloignant de la ligne.

Le champ électrique est réduit par le choix convenable de la configuration des phases, l'augmentation de la hauteur du pylône et l'augmentation de l'écartement entre phases.

Introduction.

Les méthodes numériques ont permis, grâce au développement de l'informatique, la résolution approchée mais néanmoins avec une précision remarquable dans des problèmes de calcul du champ électrique à deux ou à trois dimensions. Dans ce chapitre, nous allons exploiter les résultats du modèle numérique obtenus par les logiciels FEMM et CSP et étendre notre étude à des configurations et formes d'électrodes dont seule la modélisation numérique est capable de déterminer la distribution du champ électrique et des lignes équipotentielles en haute et très haute tension avec une précision acceptable.

Le premier logiciel est basé sur la méthode des éléments finis alors que le second est basé sur la méthode des charges fictives simulant une distribution superficielle des charges électriques sur la surface des électrodes. Cette méthode de charges fictives est utile spécialement dans le calcul direct du champ de différents systèmes électriques en fonction de leur géométrie. Elle permet également la visualisation et le tracé des courbes de variation du champ électrique et des lignes équipotentielles [50].

Dans ce travail, nous présentons une étude sur l'influence des paramètres géométriques sur la distribution du champ électrique dans les systèmes géométriques les plus proches de ceux rencontrés dans les installations aériennes à haute tension.

I- Système pointe- plan.

Pour ce système, on prend une configuration composée d'une électrode de forme hyperboloïde de rayon de courbure r_p et d'un plan situé à une distance d (figure 4.1) [1, 16, 49]. La distribution du champ électrique est obtenue pour différents niveaux de tension, de rayon r_p et d'intervalle d .

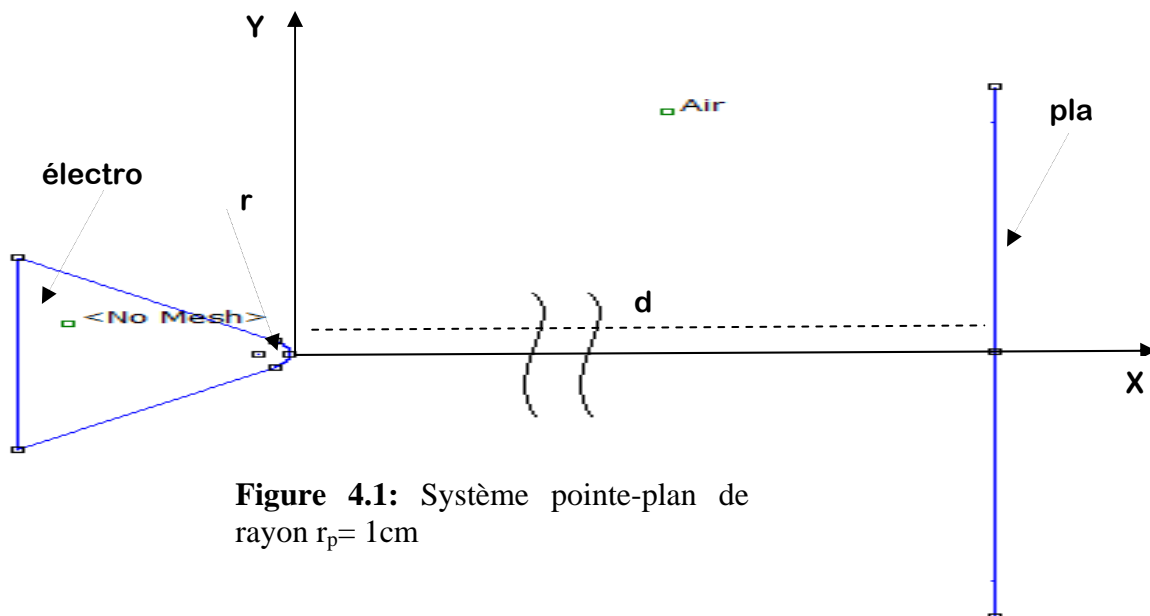


Figure 4.1: Système pointe-plan de rayon $r_p = 1\text{cm}$

Dans la méthodologie adoptée pour chaque configuration, un maillage optimal est déterminé par le logiciel dans la discrétisation du domaine délimité (fig. 4.2). Un exemple de cartographie du champ électrique pour une telle configuration est représenté par la figure 4.3.

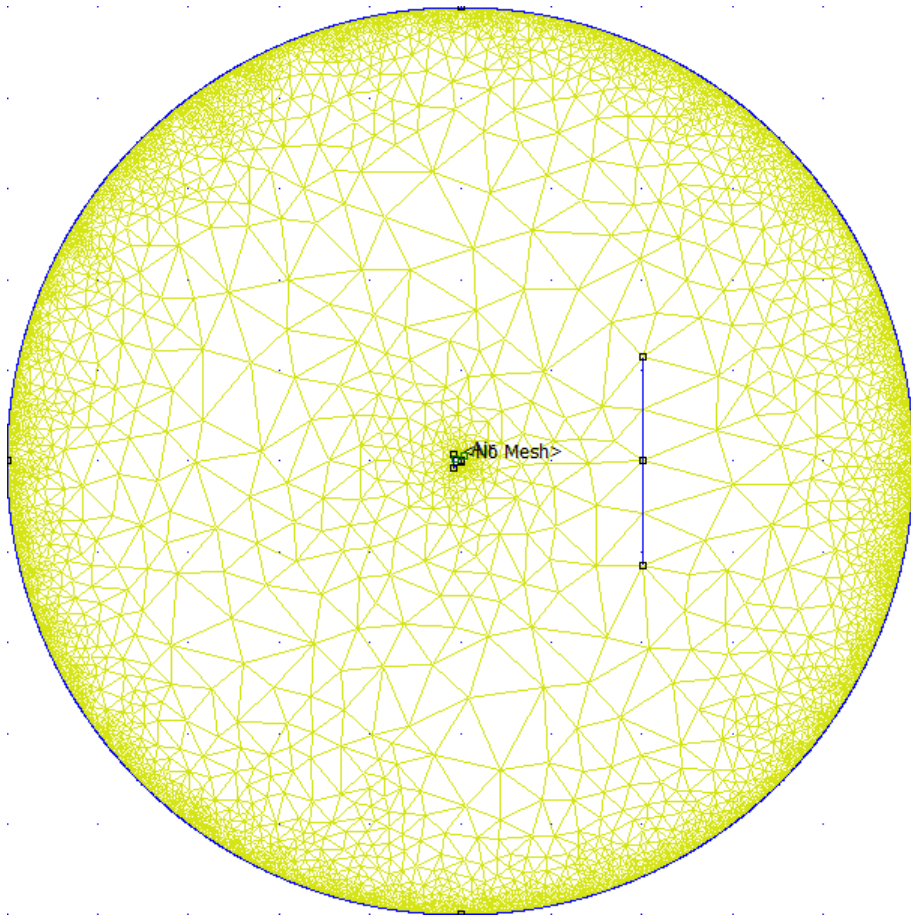


Figure 4.2: Maillage du système pointe -plan

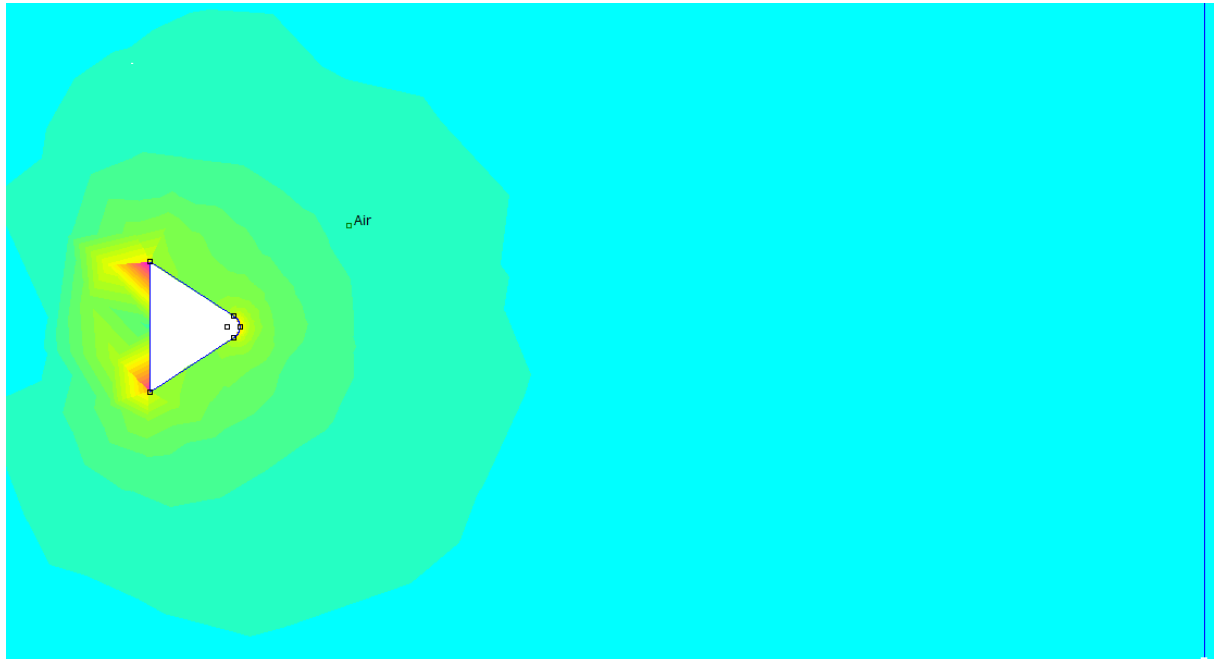


Figure 4.3 : Cartographie du champ électrique,
 $r_p = 1\text{cm}$, $U=220\text{kV}$

Les graphes ci-dessous (figures 4.4 à 4.6) montrent la variation du champ électrique entre la pointe et le plan suivant l'axe (x) pour diverses valeurs de potentiel électrique de l'électrode et de l'intervalle inter électrodes. L'effet de la tension apparait plus important que celui de la distance inter électrodes. Dans le tableau 4.1, nous avons rassemblé les valeurs du champ max pour différentes valeurs de la tension, de la distance axiale entre électrodes et du rayon de courbure de la pointe. Les effets de la tension et du rayon de courbure apparaissent plus pertinents que celui de la distance inter électrodes.

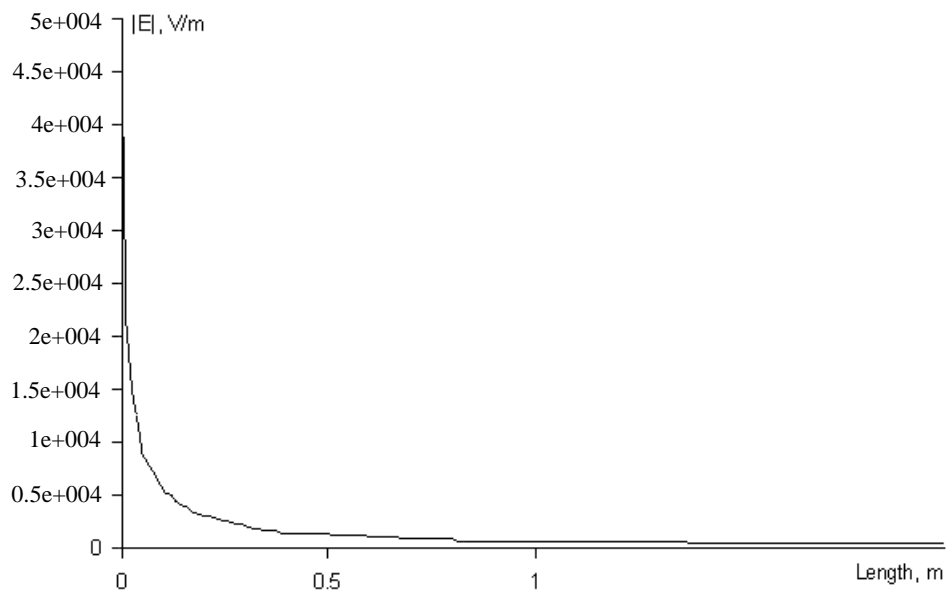


Figure 4.4: Variation du champ électrique inter-électrode pour
 $U = 60\text{ kV}$, $r_p = 1\text{ cm}$ et $d = 2\text{ m}$

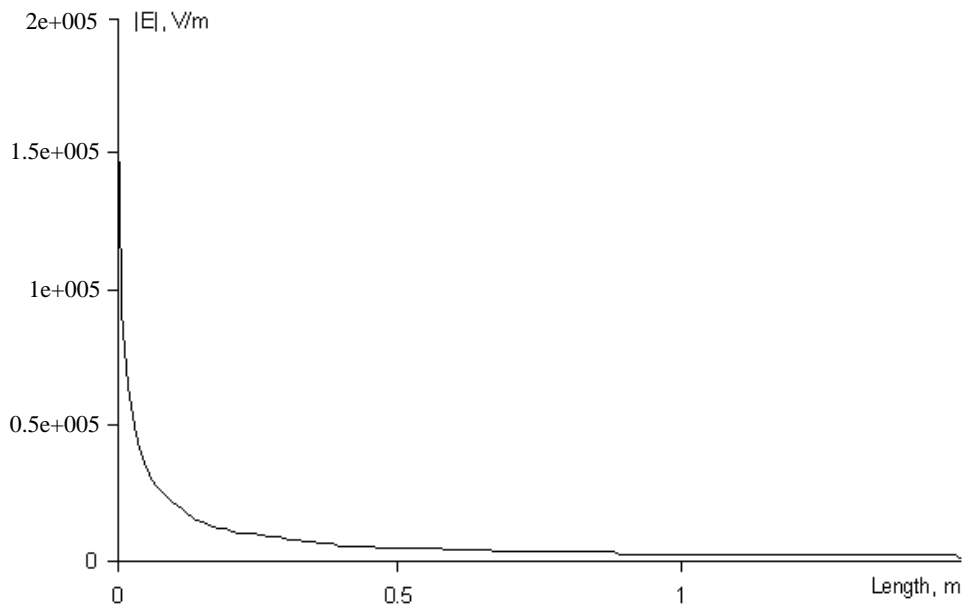


Figure 4.5: Variation du champ électrique inter-électrode pour $U=220$ kV, $r_p = 1$ cm, $d=1.5$ m

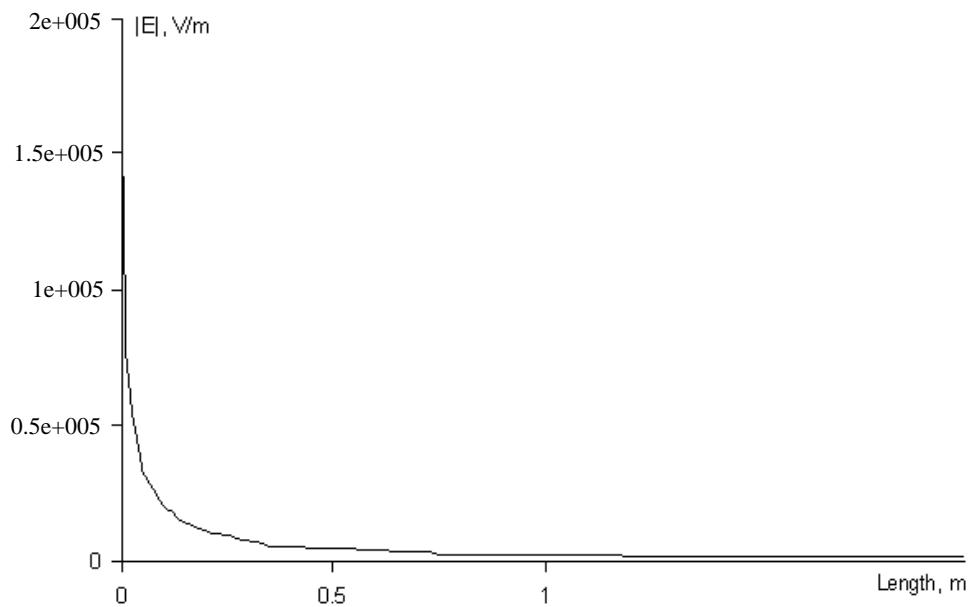


Figure 4.6: Variation du champ électrique inter-électrodes pour $U=220$ kV, $d=2$ m, $r_p = 1$ cm

Tableau 4.1: Champ électrique maximal pour différents niveaux de tension, distances inter-électrodes et rayons de courbure.

| d (m) | r _p (cm) | U (kV) | | | | |
|-------|---------------------|----------------------------|------|------|------|------|
| | | 10 | 30 | 60 | 220 | 400 |
| | | E _{max} (kV / cm) | | | | |
| 1 | 0,5 | 0,19 | 0,57 | 1,14 | 4,16 | 7,57 |
| | 1 | 0,10 | 0,31 | 0,62 | 2,26 | 4,11 |
| | 2 | 0,07 | 0,22 | 0,43 | 1,58 | 2,87 |
| 1.5 | 0,5 | 0,19 | 0,56 | 1,12 | 4,09 | 7,44 |
| | 1 | 0,10 | 0,30 | 0,60 | 2,20 | 3,99 |
| | 2 | 0,07 | 0,21 | 0,43 | 1,57 | 2,85 |
| 2 | 0,5 | 0,18 | 0,54 | 1,07 | 3,74 | 7,08 |
| | 1 | 0,10 | 0,30 | 0,59 | 2,16 | 3,94 |
| | 2 | 0,07 | 0,21 | 0,42 | 1,53 | 2,77 |

A partir des résultats du tableau 4.1, on trace les courbes illustrant la variation du champ E_{max} en fonction de la tension et des paramètres géométriques du système (figures 4.7 et 4.8).

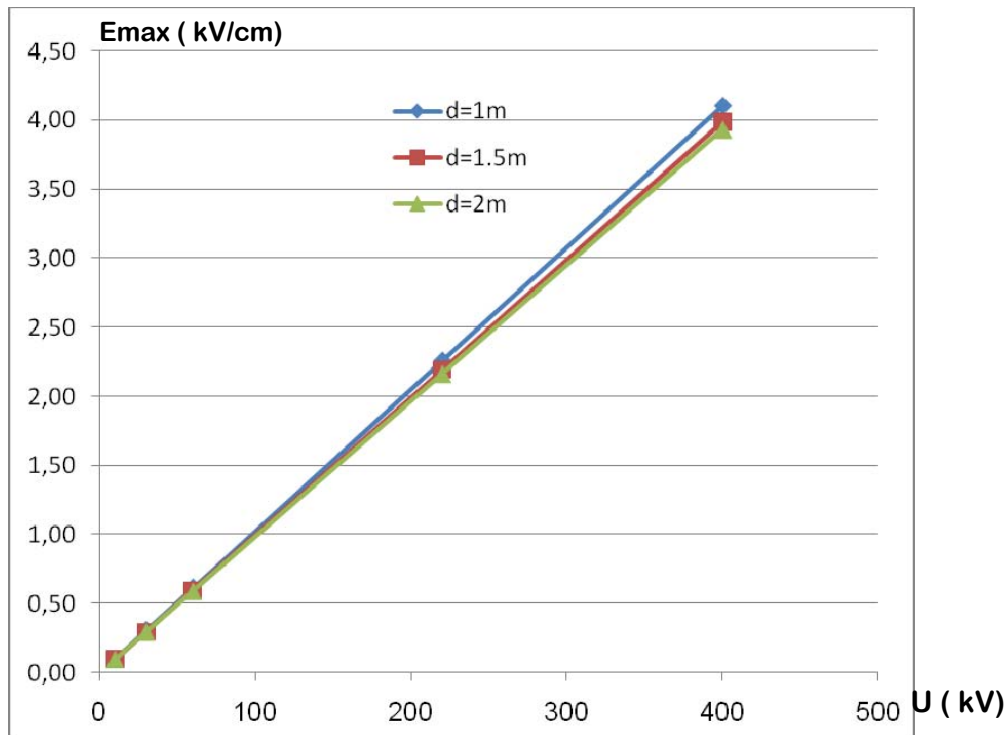


Figure 4.7 : Variation du champ électrique E_{max} en fonction de la tension pour différentes valeurs de la distance inter-électrode et un rayon de courbure r_p= 1cm

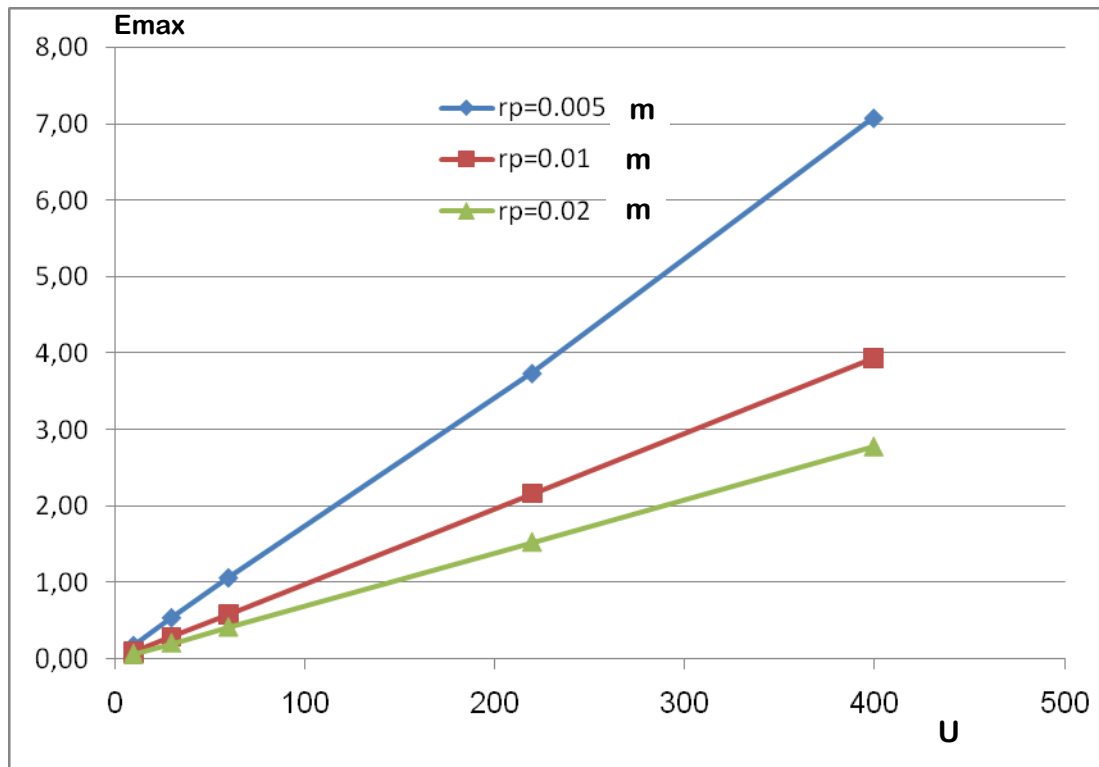


Figure 4.8 : Variation du champ électrique E_{max} en fonction de la tension pour différents rayons de courbure et $d=2m$

Les graphes obtenus montrent que le champ électrique est assez intense au niveau de la pointe et diminue sensiblement en se rapprochant du plan. Mais, ce qui est remarquable est que le champ est fortement influencé par le rayon de courbure de la pointe, et il est pratiquement proportionnel à la tension et inversement proportionnel à la distance inter-électrodes et au rayon de la pointe.

Le système pointe-plan représente la configuration d'électrodes permettant d'obtenir des valeurs de champ les plus élevées sous de faibles valeurs de la tension appliquée. A titre d'exemple, pour une tension de 220 kV et une distance inter électrodes de 1m, le champ électrique à la surface d'une pointe de 10 mm de rayon est près de 2.26 kV/cm ; il passe à 4.16 kV/cm pour une pointe de 5 mm. La distance inter électrodes influe peu sur la valeur maximale du champ : sous une tension de 220kV et une pointe de 5 mm de rayon, il passe de 3.74 kV/cm pour une distance de 2 m à seulement 4.16 kV/cm lorsque la distance est réduite à 1m.

La valeur maximale du champ électrique sur la surface de la pointe varie par contre de manière proportionnelle avec le niveau de tension appliquée (figure 4.8).

En ce qui concerne l'évolution spatiale du champ électrique, nous pouvons la résumer comme suit :

- Le champ est maximal au voisinage immédiat de la pointe et dans le prolongement axial de celle ci par rapport au reste de l'espace inter électrodes.

- L'intensité du champ diminue fortement en s'écartant d'une faible distance de la pointe.
- En s'éloignant de la pointe, le champ devient sensiblement constant.
- En tout point de l'espace, le champ est proportionnel à la tension.

Ainsi si l'on considère qu'un travail sous tension est supposé sûr sous une tension de 220 kV, conformément à la CEI 61-472 et la IEEE Std 516, lorsqu'il est fait à une distance de plus de 1.5 m avec des rayons supérieurs à 5mm. Cette configuration est associée à un champ de 4.10 kV/cm que nous considérerons comme étant le champ limite de sécurité des travaux sous tension.

II- Système cylindre –paroi –plan.

On s'intéresse dans cette partie à la distribution du champ électrique dans une configuration proche de celle existant dans les travaux sous tension sur une ligne aérienne ou un poste électrique haute tension.

Prenons le cas d'un opérateur chargé des travaux sous tension, qu'on assimile à un cylindre de longueur $l = 1.8$ m et de diamètre $d = 0.5$ m, soumis au potentiel de la ligne face à la structure du pylône mis au potentiel de la terre, l'opérateur est distant de "h" par rapport au pylône (plan), et de "s" par rapport à la console (paroi) (fig. 4.9a).

En cas de travaux sous tension dans les postes électriques, l'opérateur est situé à la distance "s" par rapport à la terre (plan) et "h" par rapport à l'ouvrage sous tension (jeux de barres, bornes de disjoncteurs, etc.) (fig4.9b).

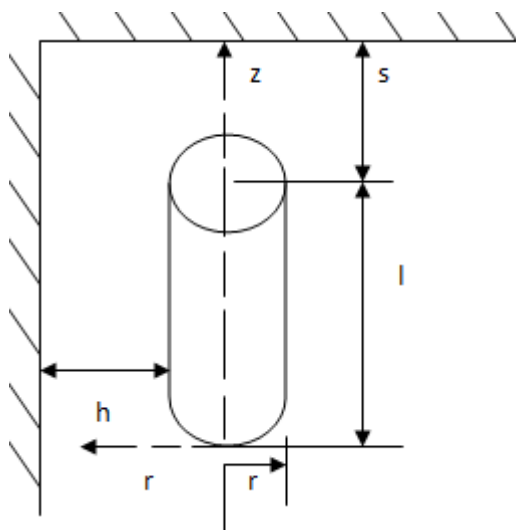


Figure 4.9a : configuration opérateur–paroi–plan ; ligne HT

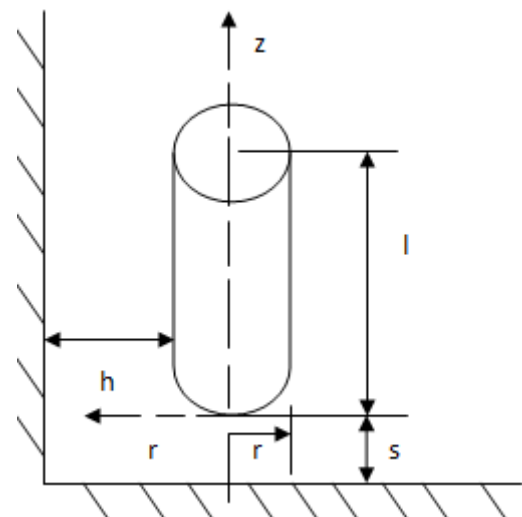


Figure 4.9b : configuration opérateur–paroi–plan ; poste HT

Champ Electrique maximum.

En utilisant le logiciel FEEM, on obtient la distribution du champ électrique aux alentours de l'opérateur simulé par un cylindre (fig. 4.10) et on relève également le champ E_{max} suivant l'axe de l'intervalle h et s pour différents niveaux de tension et intervalles.

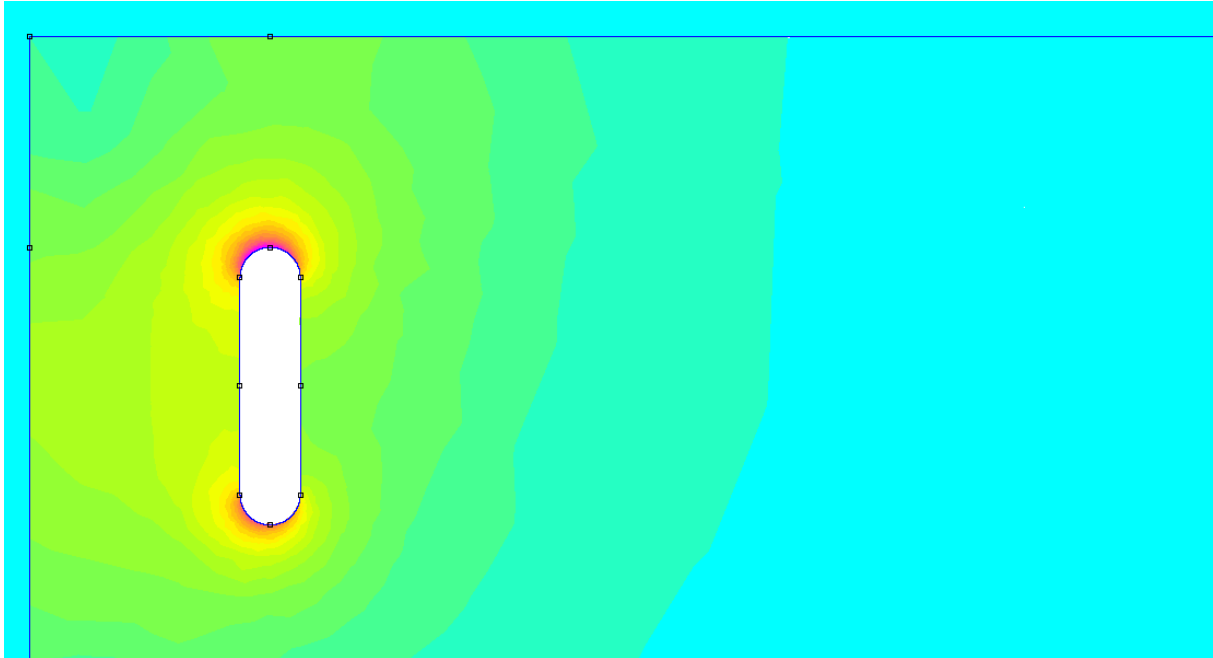


Figure 4.10: Distribution du champ électrique pour un système cylindre- plan –paroi, $U=220kV$, $r_p = 250$ mm, $l = 1800$ mm (corps).

Tableau 4.2 : Champ électrique E_{max} appliqué au corps suivant l'axe de l'intervalle h et l'intervalle s.

| Paramètres | | Champ E | Tension de Service en kV | | | | |
|------------|------|------------------|--------------------------|-------|-------|-------|-------|
| h(m) | s(m) | $E_{max}(kV/cm)$ | 10 | 30 | 60 | 220 | 400 |
| 1 | 1 | E_{max} | 0,015 | 0,045 | 0,090 | 0,330 | 0,600 |
| | 1.5 | E_{max} | 0,012 | 0,036 | 0,072 | 0,263 | 0,478 |
| | 2 | E_{max} | 0,010 | 0,031 | 0,061 | 0,225 | 0,409 |
| 1.5 | 1 | E_{max} | 0,015 | 0,044 | 0,087 | 0,320 | 0,581 |
| | 1.5 | E_{max} | 0,011 | 0,033 | 0,066 | 0,243 | 0,442 |
| | 2 | E_{max} | 0,010 | 0,029 | 0,058 | 0,212 | 0,386 |
| 2 | 1 | E_{max} | 0,014 | 0,043 | 0,087 | 0,318 | 0,578 |
| | 1.5 | E_{max} | 0,011 | 0,033 | 0,065 | 0,240 | 0,436 |
| | 2 | E_{max} | 0,009 | 0,028 | 0,056 | 0,205 | 0,372 |

A partir des résultats du tableau 4.2, on trace les graphes (fig.4.11 et 4.12) ci-dessous montrant la variation de l'intensité du champ électrique E_{\max} en fonction de la tension pour différentes distances séparant l'opérateur de la paroi (TST ligne), ou bien de la terre (TST poste).

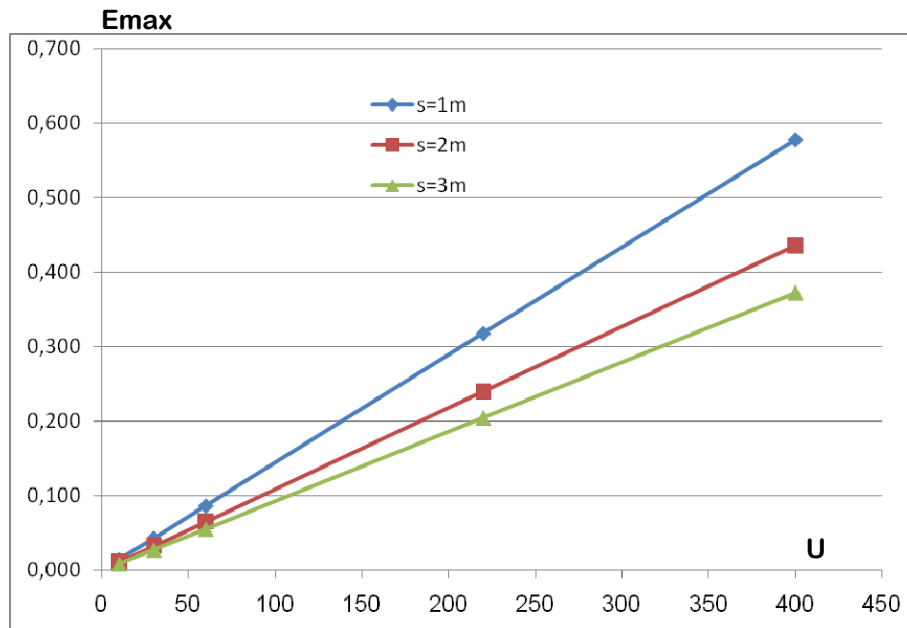


Figure 4.11 : Variation du champ électrique E_{\max} en fonction de la tension pour différentes valeurs de s avec $h = 2$ m

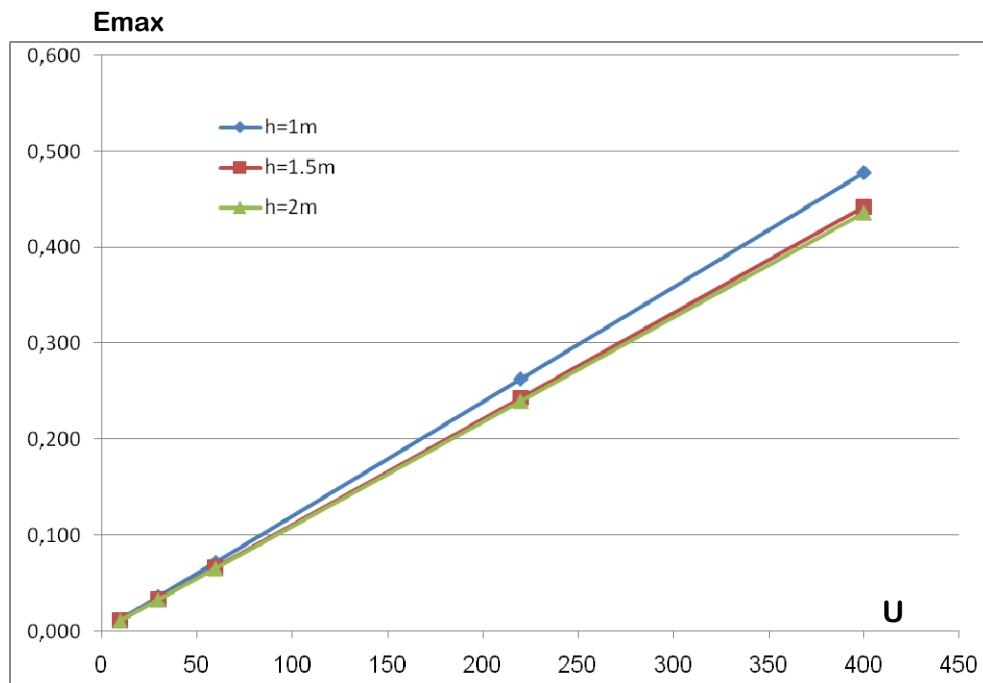


Figure 4.12 : Variation du champ électrique E_{\max} en fonction de la tension pour différentes valeurs de h avec $s = 1.5$ m.

Les graphes précédents montrent que l'intensité du champ électrique est beaucoup plus influencée par l'intervalle s que par l'intervalle h , d'où le risque de décharge est plutôt du côté console.

III- Configuration opérateur avec extension –paroi –plan.

Pour tenir compte de la main de l'opérateur, on l'assimile à un autre petit cylindre de longueur $l_1 = 0.8$ m et de rayon de courbure $r_p = 5$ cm (fig. 4.13). Dans ce cas, on étudie son influence sur la répartition du champ électrique. La figure 4.14 donne la cartographie du champ électrique pour une telle configuration.

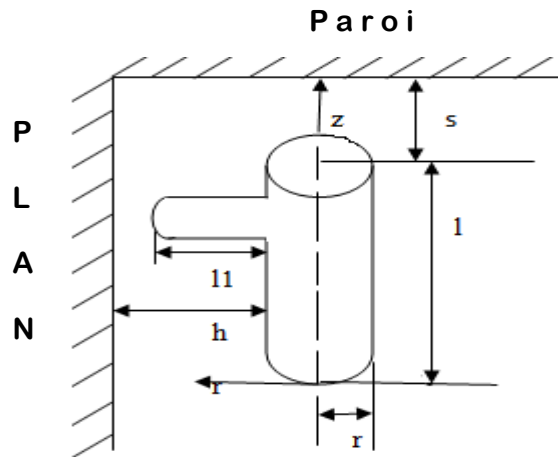


Figure 4.13 : Disposition cylindre avec extension –paroi- plan

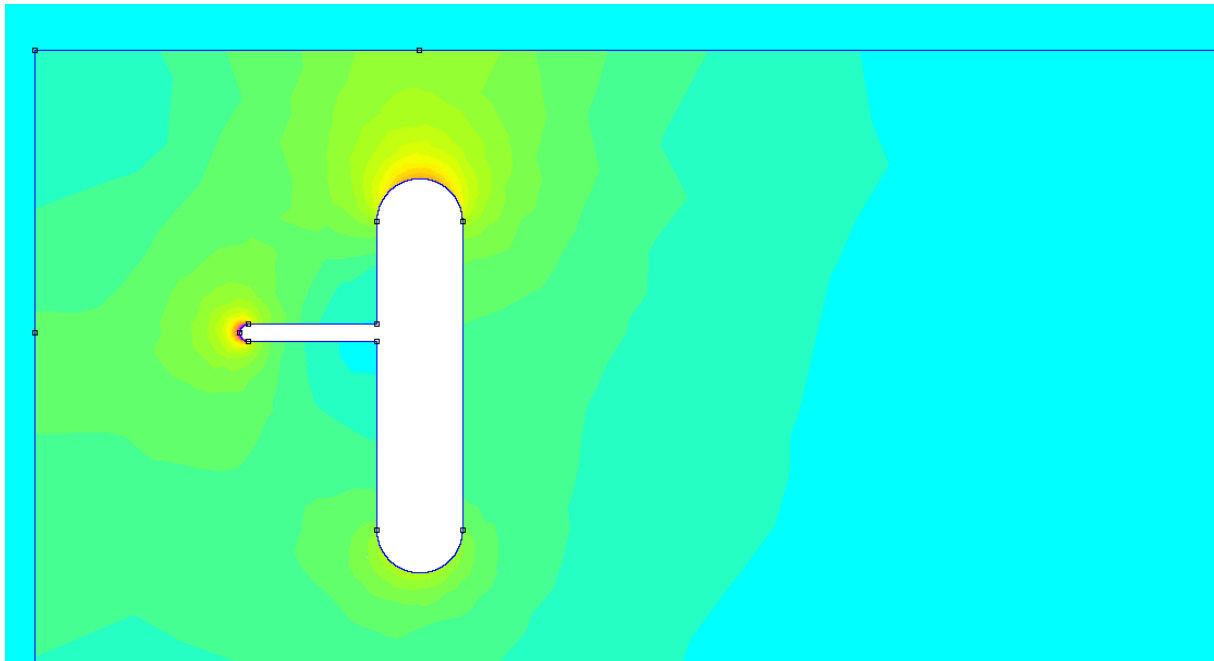


Figure 4.14: Distribution du champ électrique pour un système cylindre avec extension-plan-paroi, $U=220$ kV

Ce qui nous intéresse le plus, c'est la valeur maximale de l'intensité du champ électrique qui est dans cette configuration au niveau de la pointe (la main). Le tableau 4.3 rassemble les valeurs maximales du champ en fonction du niveau de tension pour différentes valeurs de la distance horizontale h.

Tableau 4.3: Variation du champ électrique maximal d'un opérateur avec extension paroi – plan.

| Paramètres | | Tension de service U (kV) | | | | |
|------------|-------------------|---------------------------|------|------|------|------|
| h (m) | E_{max} (kV/cm) | 10 | 30 | 60 | 220 | 400 |
| 1 | E_{max} | 0,06 | 0,17 | 0,34 | 1,25 | 2,27 |
| 1.5 | E_{max} | 0,03 | 0,08 | 0,17 | 0,62 | 1,13 |
| 2 | E_{max} | 0,02 | 0,06 | 0,13 | 0,47 | 0,85 |

La variation de l'intensité du champ électrique pour différents niveaux de tension en fonction de la distance qui sépare la pointe de la main au plan est présentée dans la figure 4.15.

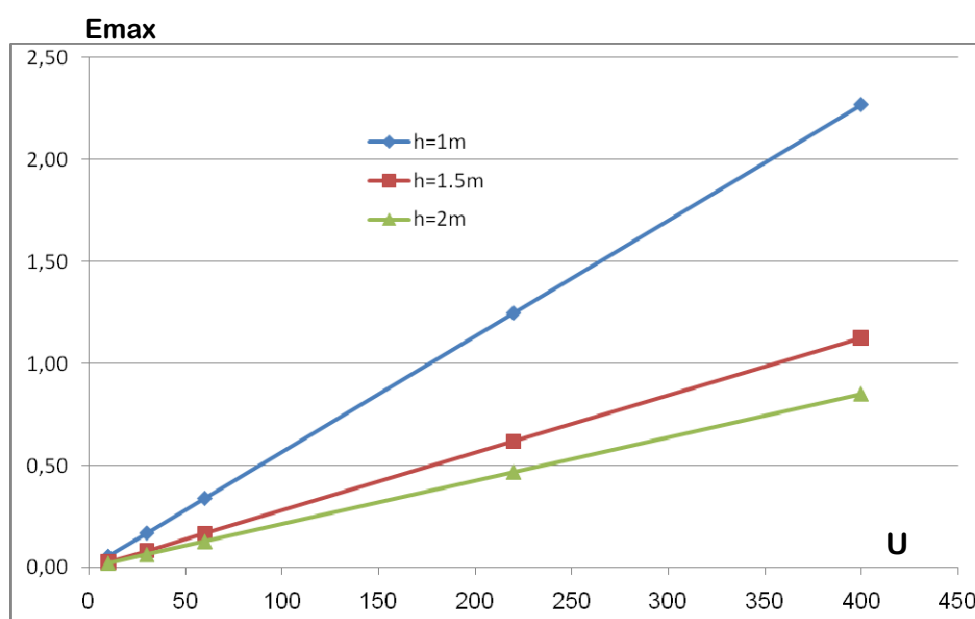


Figure 4.15 : Variation du champ électrique en fonction de la tension pour différentes valeurs de h.

On remarque que la valeur du champ électrique a fortement augmenté en tenant compte de la main, ce qui signifie son influence sur la variation du champ, surtout pour le niveau de tension 400kV. La valeur maximale du champ est multiplié presque par 3 lorsque la distance est réduite de moitié.

IV-Configuration plan (pylône)-tige (conducteur).

Ce système est représenté par un pylône de longueur normalisée suivant le niveau de tension et la section du conducteur de rayon r_p , supporté par une chaîne d'isolateurs de longueur $l = 2$ m (fig.4.16).

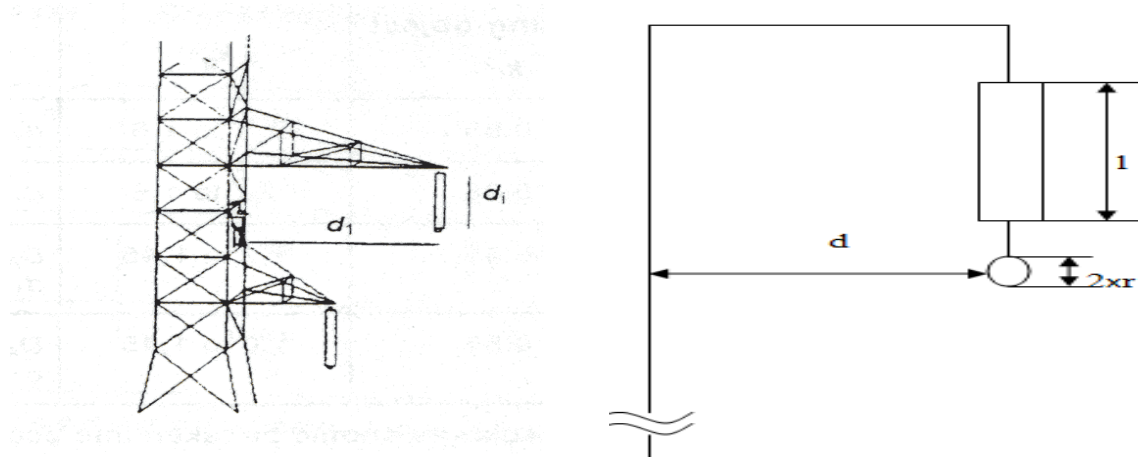


Figure 4.16: Système plan (pylône)-rod (conducteur).

Les figures 4.17 et 4.18 montrent la répartition spatiale du champ électrique dans une telle configuration où le champ est fortement concentré autour du conducteur.

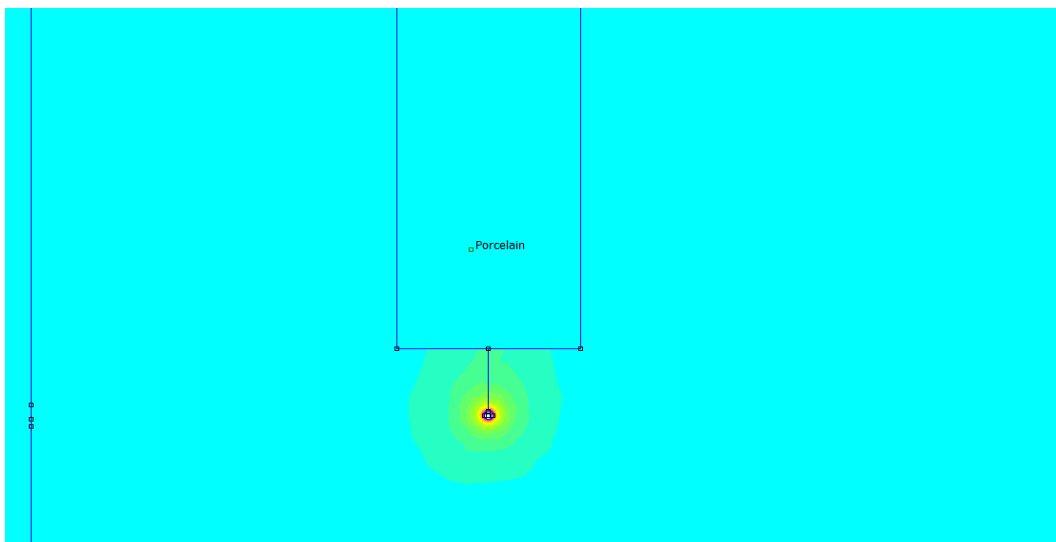


Figure 4.17: Distribution du champ électrique du système plan (pylône)-rod (conducteur) pour $r_p=1$ cm, $d=1$ m et $U=220$ kV.

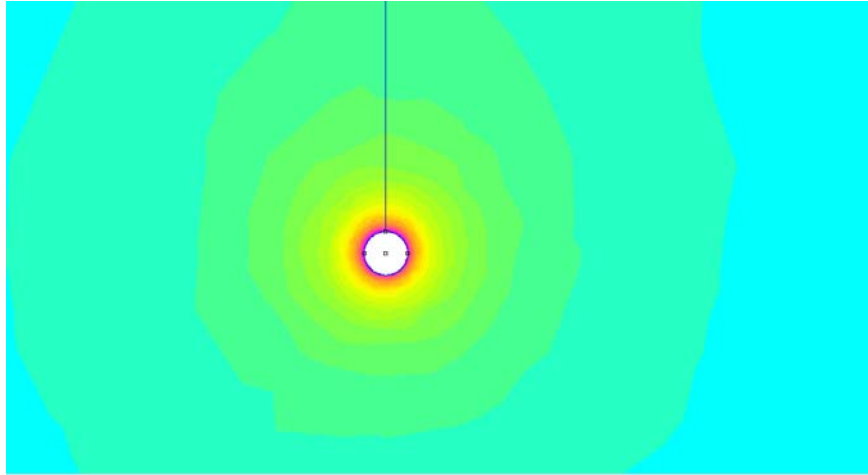


Figure 4.18 : Distribution du champ électrique autour du conducteur.

En modifiant la distance inter-électrode d (1 ; 1,5 ; 2 ; 3 ; 4m) et le rayon de conducteur r_p (1 ; 1,5 ; 2 cm), on étudie la variation du champ électrique entre les deux électrodes. Les résultats obtenus sont regroupés dans le tableau 4.4.

Tableau 4.4: Variation du champ électrique maximal, système plan (pylône)-rod (conducteur)

| Paramètres | | Champ E | Tension de service kV | | | |
|------------|------------|----------------------|-----------------------|------|-------------|-------------|
| d(m) | r_p (cm) | E_{max} (kV/cm) | 60 | 220 | 400 | 750 |
| 1 | 1 | E_{max} | 0,79 | 2,89 | 5,25 | 9,85 |
| | 1.5 | E_{max} | 0,57 | 2,09 | 3,81 | 7,14 |
| | 2 | E_{max} | 0,46 | 1,68 | 3,06 | 5,74 |
| 1.5 | 1 | E_{max} | 0,74 | 2,73 | 4,96 | 9,31 |
| | 1.5 | E_{max} | 0,54 | 1,99 | 3,62 | 6,78 |
| | 2 | E_{max} | 0,43 | 1,59 | 2,90 | 5,43 |
| 2 | 1 | E_{max} | 0,72 | 2,66 | 4,83 | 9,06 |
| | 1.5 | E_{max} | 0,53 | 1,93 | 3,50 | 6,57 |
| | 2 | E_{max} | 0,42 | 1,54 | 2,81 | 5,26 |
| 3 | 1 | E_{max} | 0,71 | 2,59 | 4,71 | 8,40 |
| | 1.5 | E_{max} | 0,51 | 1,87 | 3,40 | 6,38 |
| | 2 | E_{max} | 0,41 | 1,49 | 2,71 | 5,08 |

| | | | | | | |
|---|-----|------------|------|------|-------------|-------------|
| 4 | 1 | E_{\max} | 0,70 | 2,56 | 4,65 | 8,72 |
| | 1.5 | E_{\max} | 0,51 | 1,85 | 3,37 | 6,31 |
| | 2 | E_{\max} | 0,40 | 1,47 | 2,67 | 5,00 |

Remarque : les valeurs en gras représentent le champ électrique E_{\max} susceptibles de provoquer un claquage.

IV.1- Influence de l'amplitude de la tension sur le champ électrique.

Pour étudier l'influence du niveau de la tension sur le champ électrique pour ce système ayant un rayon du conducteur r_p et une distance inter électrode d , on fixe la valeur de r_p et de l'intervalle d et on varie les niveaux de tension avec les valeurs typiques: 60, 90, 150, 220 et 400 kV. Les figures 4.19a et 4.19b illustrent cette influence de la tension pour différentes valeurs de r_p et d .

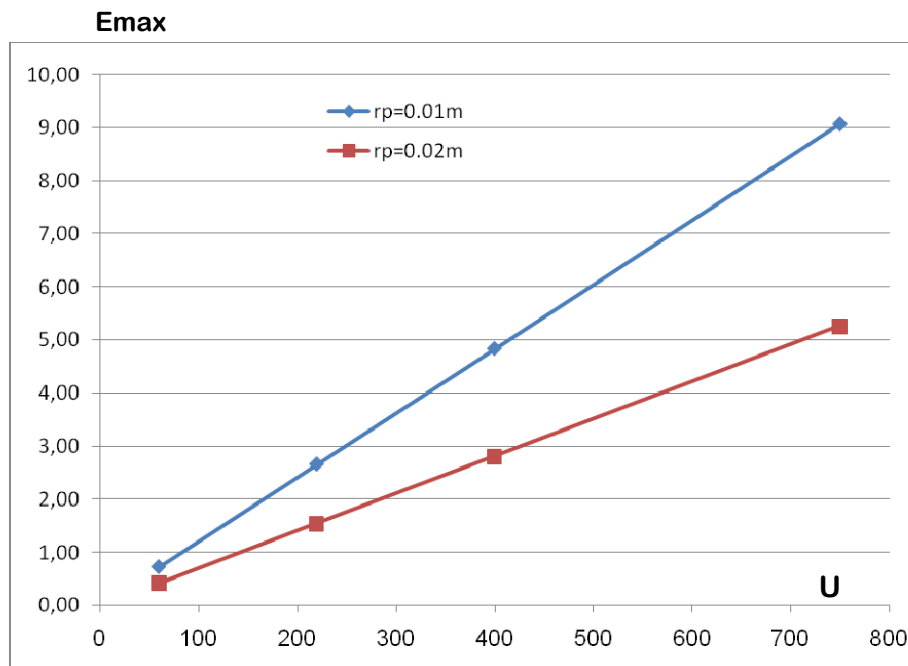


Figure 4.19a : Variation du champ électrique en fonction du niveau de tension pour $d=2m$; $r_p= 1cm$ et $2 cm$

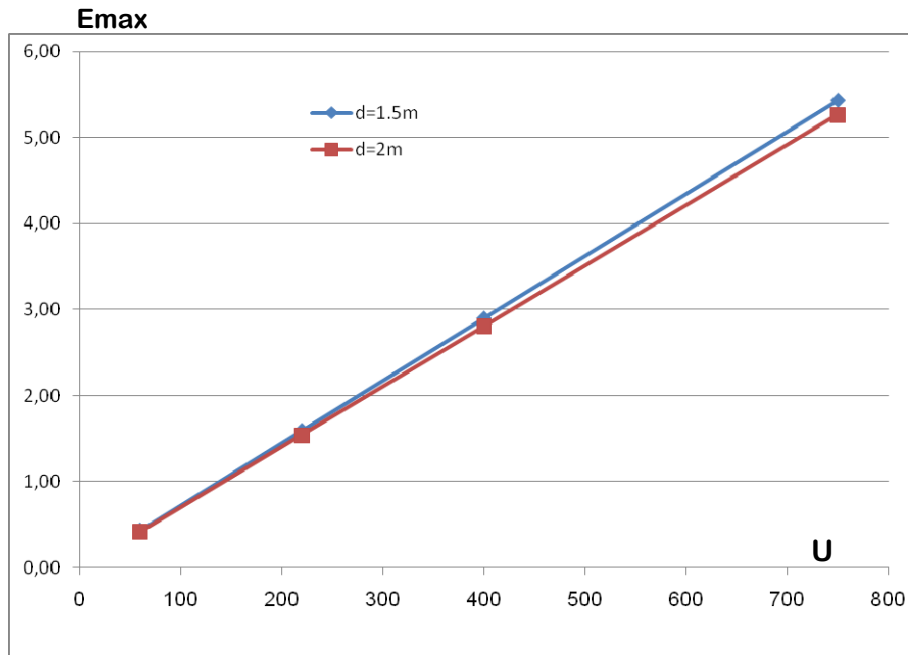


Figure 4.19b : Variation du champ électrique en fonction du niveau de tension pour $r_p= 2\text{cm}$; $d=1.5\text{m}$ et 2m

On remarque que le champ électrique varie avec la tension pour la même position dans l'intervalle inter-électrodes et pour un rayon fixe. Il augmente avec le niveau de tension appliquée (fig. 4.19a et 4.19b). Mais, ce qui est remarquable, c'est que le champ est beaucoup plus influencé par la variation du rayon de courbure que par la variation de la distance inter-électrode. On peut donc réduire de manière significative l'intensité du champ électrique par l'augmentation du rayon du conducteur seulement.

IV.2- Influence de la distance inter-électrodes sur le champ électrique.

On refait le même travail, mais cette fois ci, on prend des valeurs fixes, un niveau de tension $U=220\text{kV}$ avec deux rayons de courbure $r_p= 2\text{ cm}$ et $r_p= 1\text{ cm}$, et on varie la distance inter-électrodes de 1 à 4 m. La figure 4.20 donne la forme de cette dépendance. La valeur du champ électrique maximal est inversement proportionnelle à la distance inter-électrodes. Le champ maximal sur les parties vives diminue d'autant plus que l'on s'éloigne du plan.

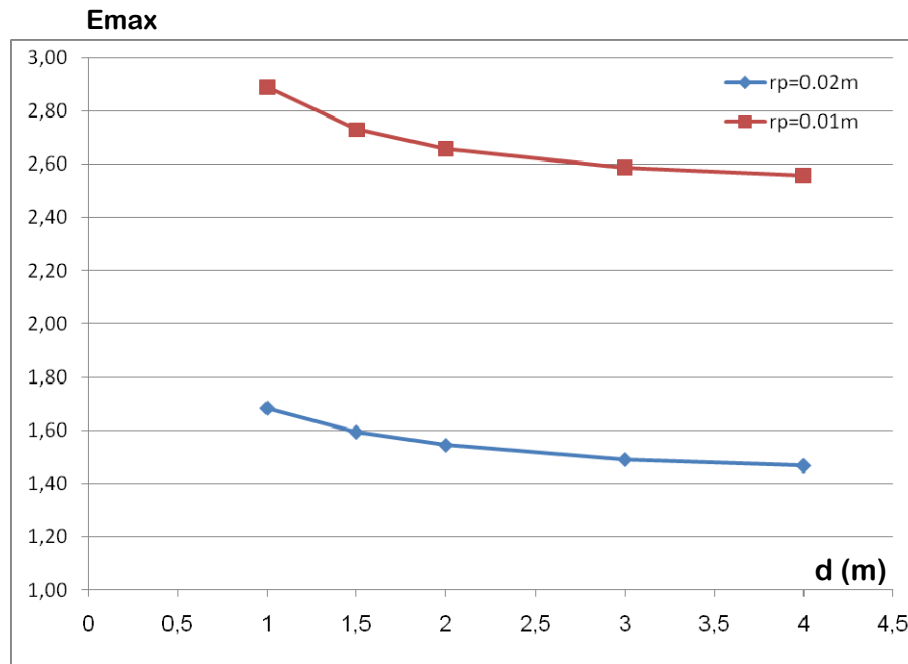


Figure 4.20: variation du champ électrique en fonction de la distance inter-électrodes pour $U=220kV$, $r_p=0.02m$ et $0.01m$.

V-Configuration plan (pylône) avec extension -tige (conducteur).

On prend le cas d'un opérateur positionné sur le pylône et qui travaille à distance avec des outils spéciaux (perches isolantes...) (fig. 4.21). Dans cette situation, on prend en considération l'influence de la pointe de la main de l'opérateur et /ou de l'outil sur la variation du champ électrique. La distribution du champ correspondant est présentée en figure 22.

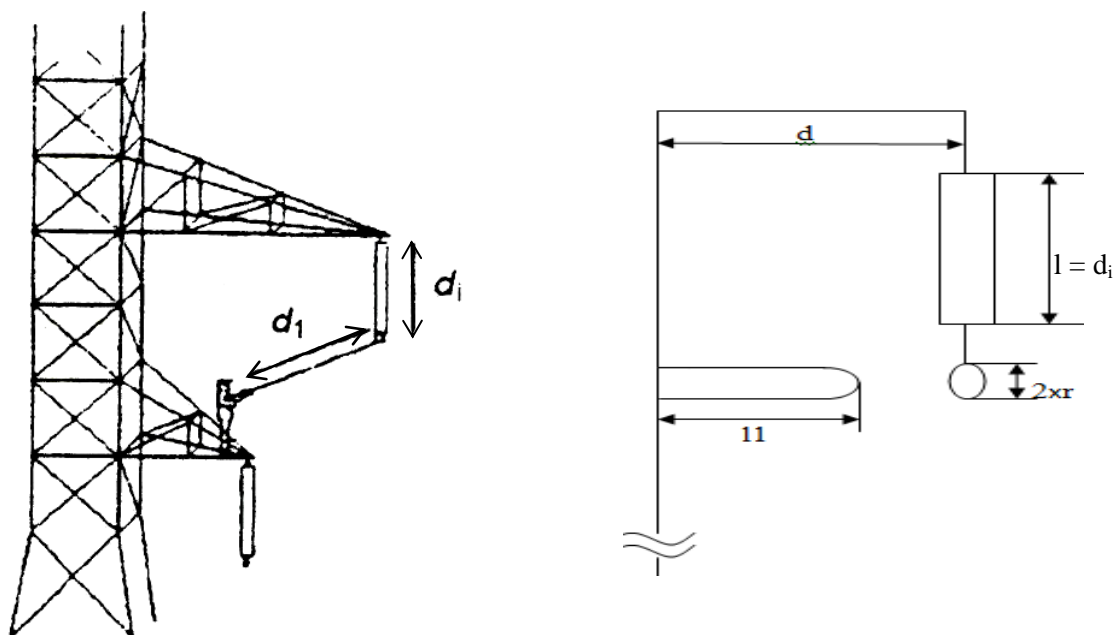


Figure 4.21 : Système plan (pylône) avec extension-pointe (conducteur)

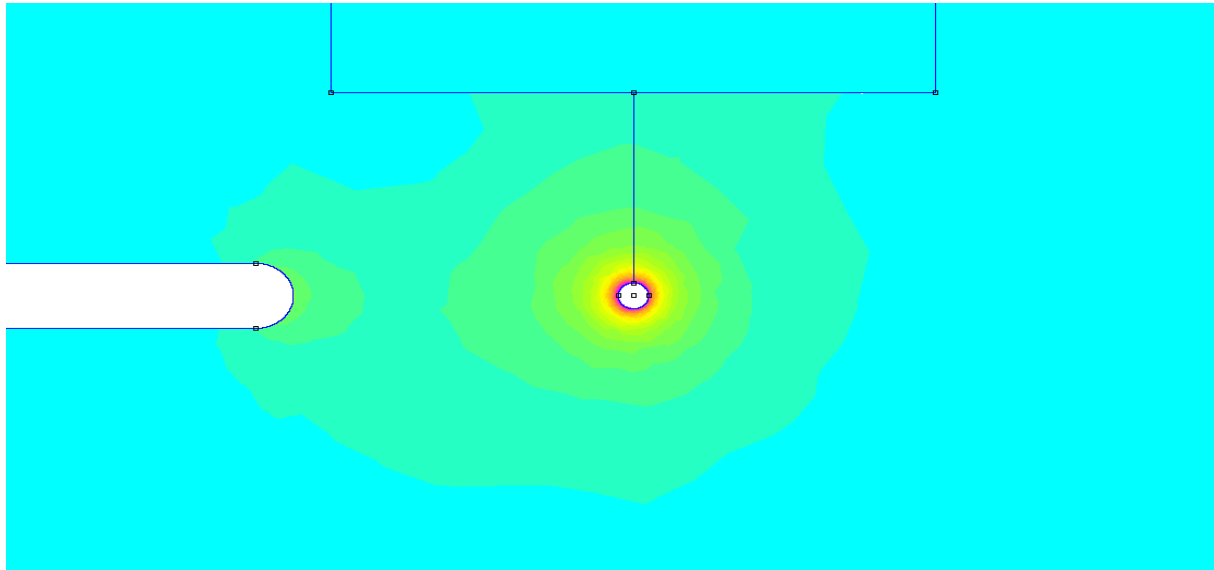


Figure 4.22 : Distribution du champ électrique d'un système plan (pylône) avec extension-rod (conducteur) pour $r_p= 1 \text{ cm}$, $d=1\text{m}$ et $U=220\text{kV}$.

Les résultats obtenus sont regroupés dans le tableau 4.5 ci-dessous :

Tableau 4.5: Variation du champ électrique maximum, E_{\max} d'un système plan (pylône) avec extension-tige (conducteur).

| | | | Tension de service U(kV) | | |
|------|------------------|--------------------------|--------------------------|------|-------------|
| d(m) | $r_p(\text{cm})$ | $E_{\max}(\text{kV/cm})$ | 60 | 220 | 400 |
| 1 | 1 | E_{\max} | 0,97 | 3,54 | 6,26 |
| | 1.5 | E_{\max} | 0,73 | 2,67 | 4,86 |
| | 2 | E_{\max} | 0,61 | 2,23 | 4,04 |
| 1,5 | 1 | E_{\max} | 0,78 | 2,87 | 5,21 |
| | 1.5 | E_{\max} | 0,57 | 2,09 | 3,80 |
| | 2 | E_{\max} | 0,46 | 1,67 | 3,04 |
| 2 | 1 | E_{\max} | 0,74 | 2,71 | 4,92 |
| | 1.5 | E_{\max} | 0,53 | 1,96 | 3,57 |
| | 2 | E_{\max} | 0,43 | 1,57 | 2,85 |
| 3 | 1 | E_{\max} | 0,71 | 2,61 | 4,75 |
| | 1.5 | E_{\max} | 0,51 | 1,88 | 3,42 |
| | 2 | E_{\max} | 0,41 | 1,49 | 2,72 |

| | | | | | |
|----------|-----|-----------|------|------|-------------|
| 4 | 1 | E_{max} | 0,70 | 2,57 | 4,67 |
| | 1.5 | E_{max} | 0,52 | 1,85 | 3,36 |
| | 2 | E_{max} | 0,40 | 1,46 | 2,67 |

La variation de l'intensité du champ électrique pour les différents niveaux de tension en fonction de la distance qui sépare la pointe de la main au conducteur est montrée dans la figure 4.23 ci-après pour deux valeurs du rayon de courbure.

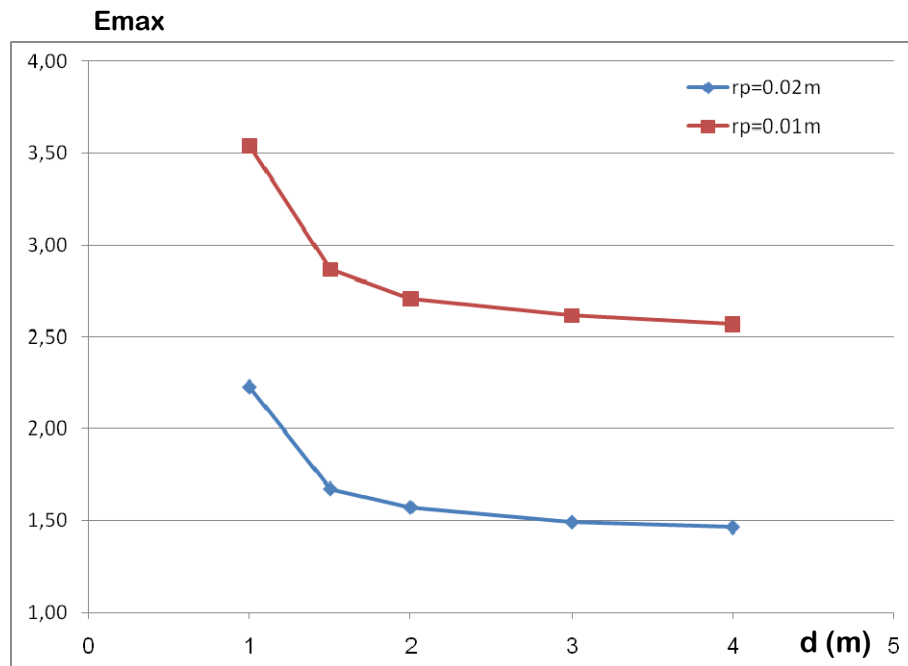


Figure 4.23: Variation du champ électrique, E_{max} en fonction de la distance inter-électrode pour $U=220$ kV, $r_p= 2$ cm et 1cm.

On relève que:

- Le champ limite est atteint dans le cas de la configuration de la figure 4.16 pour toutes les distances et rayons de courbures considérés sous la tension de 750kV. Les travaux sous cette tension présentent un risque d'amorçage.
- Les résultats présentés dans les tableaux 4.4 et 4.5 montrent des valeurs de champ électrique élevées (en gras) dépassant la limite de sécurité de travail sous tension. C'est le cas notamment des rayons de 0.01m sous la tension 400kV.

VI- Système à trois conducteurs cylindriques.

VI.1- Champ Electricque au niveau de lignes électriques triphasées.

Prenons le cas d'une ligne aérienne triphasée 220 kV à trois conducteurs disposés en nappe horizontale. Le diamètre de chaque conducteur est de 0.03 m, la distance D entre conducteurs vaut 2.40 m et la hauteur H par rapport au sol est de 30.6 m (Fig. 4.24).

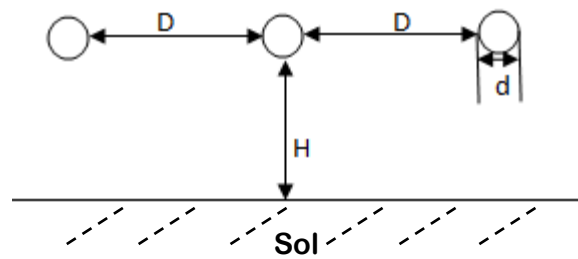


Figure 4.24: Schéma d'un système à trois conducteurs cylindriques en nappe horizontale.

La distribution et la variation du champ électrique entre conducteurs de la ligne sont données par les figures 4.25 et 4.26 suivant l'axe x.

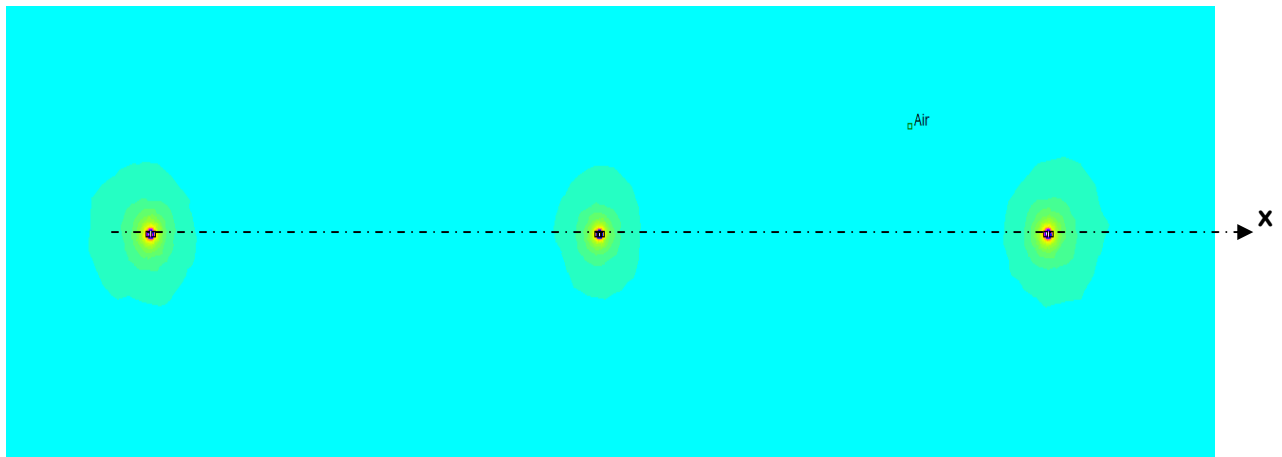


Figure 4.25: Distribution du champ électrique pour un système de trois conducteurs.

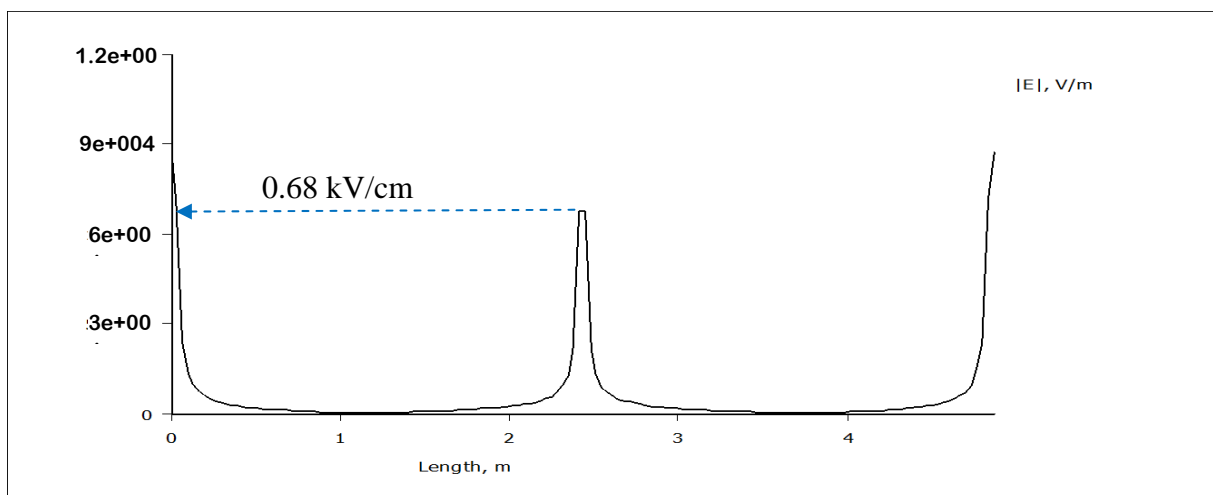


Figure 4.26: Variations du champ entre les trois conducteurs, $U=220\text{kV}$, $r_p = 1.5\text{ cm}$ et $D = 2.40\text{ m}$

VI.2 - Champ Electrique au niveau des postes électriques triphasés.

On considère un disjoncteur triphasé de 220kV (photo 4.1 modélisée par la fig.4.27) dont les paramètres sont déterminés par les normes appliquées: distance entre phases: $D = 2.40\text{ m}$; hauteur: $H = 2.40\text{ m}$. On trace les variations du champ électrique entre les phases du disjoncteur. Elles sont représentées sur les figures 4.28 et 4.29.



Photo 4.1 : Travail sous tension sur un disjoncteur 220kV dans un environnement triphasé.

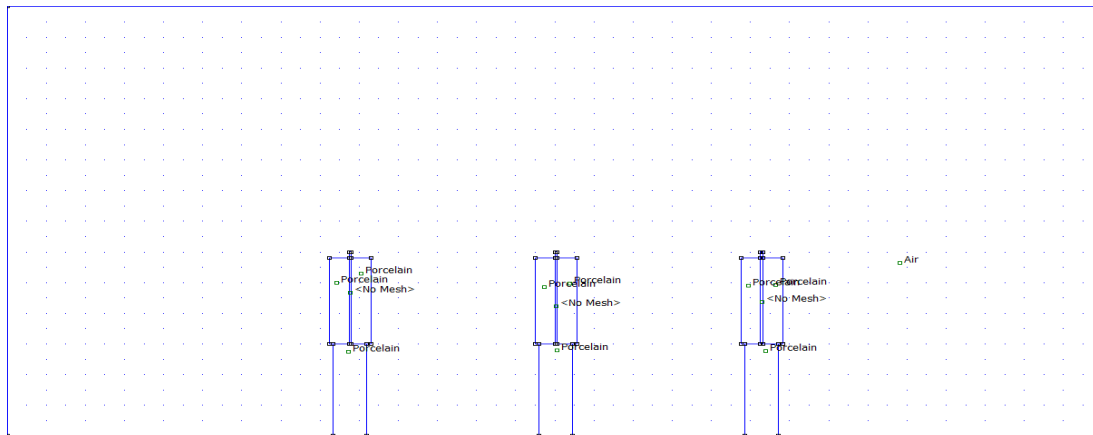


Figure 4.27: Modèle d'un disjoncteur dans un environnement à trois phases.

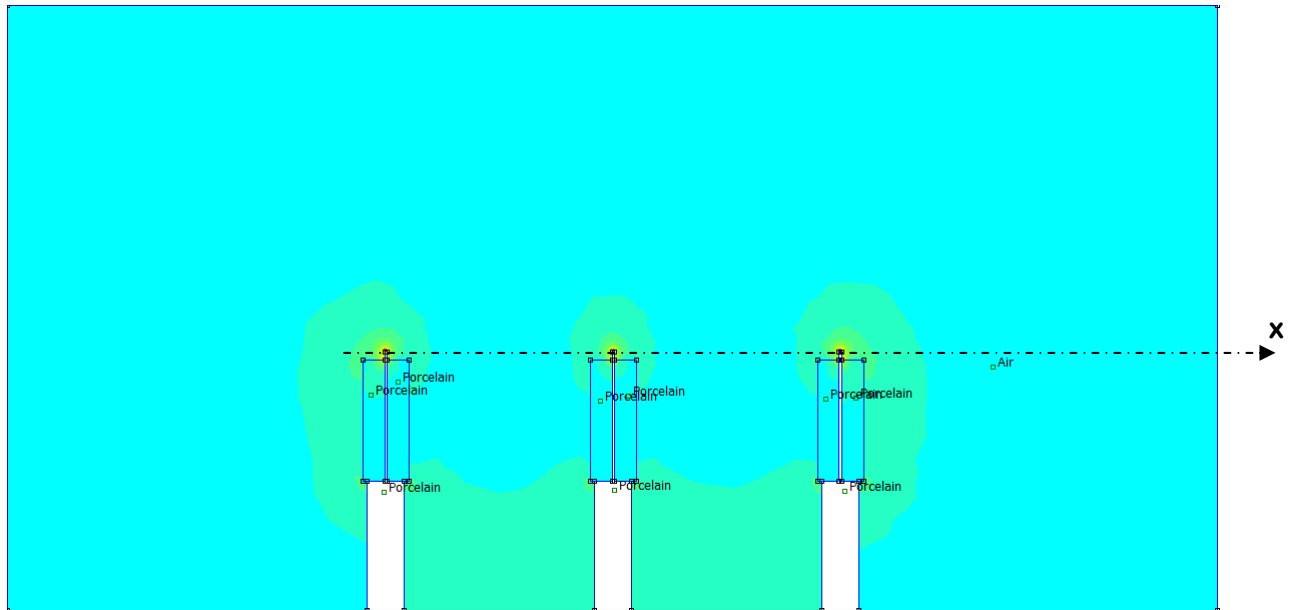


Figure 4.28 : Distribution du champ électrique autour d'un disjoncteur à trois phases, $U=220\text{kV}$ et $D = 2.40\text{m}$

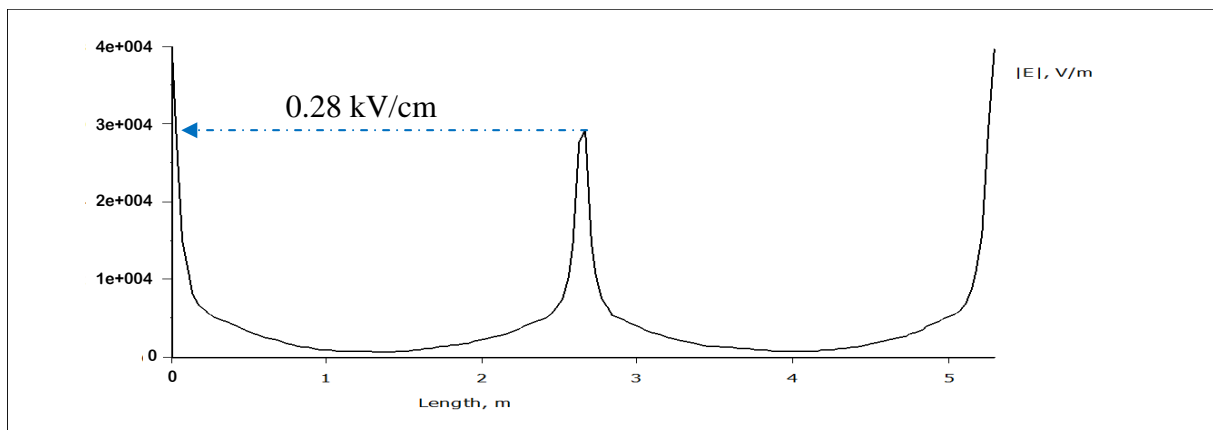


Figure 4.29: Variations du champ entre les trois phases d'un disjoncteur de 220kV , $D=2.40\text{m}$.

Pour une même configuration où la tension et l'intervalle sont constants, les courbes de variation du champ selon la direction x représentées par les figures 4.26 et 4.29 respectivement pour la ligne et le poste électrique sont similaires. Cependant, l'écart entre les valeurs du champ est important. Le champ électrique au voisinage du conducteur central de la ligne est d'environ 0.7 kV/cm alors que celui du poste est près de 0.3 kV/cm .

Conclusion.

Les logiciels numériques sont très utiles dans l'évaluation et la distribution du champ électrique car ils présentent des avantages importants dans les configurations géométriques complexes où les méthodes analytiques sont très limitées.

Le niveau de tension est un paramètre fondamental dans l'accroissement du champ électrique dans les ouvrages de haute tension.

Le renforcement du champ électrique régnant autour des pointes acérées sous tension est un élément précurseur quant à l'amorçage d'arcs électriques. Par conséquent, le rayon de courbure de ces parties acérées joue un rôle important quant au dimensionnement des distances minimales d'approche lors des travaux sous tension sur les ouvrages à haute et très haute tension.

De plus, les distances séparant les pièces sous tension sont un élément à surveiller car pouvant être réduites à tout instant de manière involontaire par la manipulation de pièces conducteurs.

Toutefois, la validation des résultats numériques est souhaitable avec une confrontation à des mesures expérimentales.

Introduction.

La disponibilité permanente de l'énergie électrique ayant de bons facteurs de qualité est d'une grande importance d'autant plus que le besoin en consommation augmente de façon continue. Plusieurs études sur les causes de l'interruption de l'énergie ont été menées afin d'améliorer sa qualité [60, 61]. Cependant, on ne peut trouver que peu de travaux consacrés aux techniques de rétablissement du fonctionnement normal du réseau sans opérer de coupures [7, 62]. La densité des réseaux, la multiplicité et la complexité des opérations des travaux sous tension futurs nécessitent l'usage d'outils de différentes formes et de meilleure précision.

Le développement de techniques de travaux sous tension (TST) dans les lignes aériennes nécessite la connaissance des éléments constitutifs de ces lignes et aussi les outils utilisés dans l'exécution de ces TST [1-3,7, 9, 10].

Dans ce chapitre, nous allons exploiter les résultats du modèle numérique et étendre notre étude à des configurations et formes d'électrodes dont seule la modélisation numérique est capable de déterminer la distribution du champ électrique et des lignes équipotentielles avec une précision acceptable.

Le but visé dans cette partie est d'utiliser les résultats du calcul du champ pour la détermination des distances minimales d'approche pour des rayons de courbure non conventionnels en vue de travaux futurs exceptionnels.

I- Distribution du champ dans un système corps-plan-paroi.

La figure 5.1 montre la disposition d'une telle configuration. Dans cette configuration, nous considérons un système proche de celui rencontré lors de travaux sous tension où l'opérateur est au potentiel de la ligne face aux structures du pylône représentées par le plan et la paroi.

La figure 5.2 montre une cartographie de la distribution spatiale du champ électrique et des lignes équipotentielles. Pour une distance de 1,5 m entre le corps et la paroi et 2 m entre la main et le plan, la concentration maximale du champ se trouve au niveau de la main soumise à une tension de 220 kV, qu'elle soit nue ou portant des outils de travail conducteurs. Tout le corps est supposé soumis au même potentiel qui est celui de la ligne.

La figure 5.3 montre les variations du champ électrique dans la direction 'y' radiale à la main supposée cylindrique. Dans cette direction, la composante axiale du champ E_x n'est pas nulle.

Afin d'apprécier l'influence du rayon de courbure d'un outil sur l'intensité du champ électrique, nous avons tracé suivant l'axe des abscisses, les courbes des figures 5.4, 5 et 6 pour différents rayons de courbure. Le champ maximum, à la surface de l'outil, passe de 2 kV/cm à 4.5 kV/cm lorsque son rayon de courbure est réduit de 2 cm à 0.5 cm. On observe

également une augmentation de la composante E_y lorsque le rayon de courbure est réduit, alors qu'il est quasiment nul pour le rayon de 2 cm.

L'importance relative entre E_x et E_y est dépendante de la position relative par rapport au plan et à la paroi. Le rapport entre les deux composantes en fonction de la position dans la surface sous champ est donné dans la figure 5.7. Ceci signifie que l'avènement d'un amorçage peut avoir lieu sur l'une ou l'autre surface, dépendamment de la position relative.

La chaîne d'isolateurs est supposée dans un état permettant l'exécution de travaux sous tension, conformément aux recommandations de la CEI 61-472 [1]. Elle est aussi supposée non génératrice de modifications majeures dans la distribution du champ dans l'aire de travail. Elle peut être assimilée à un objet flottant de nature isolante.

De plus, les accessoires des chaînes d'isolateurs sont constitués de pièces de diamètre supérieur à 20 mm pour les lignes 220 kV et 16 mm pour les lignes 60 kV. Les travaux sous tension peuvent nécessiter l'utilisation d'outils spéciaux de diamètre inférieur à 20 mm pour les lignes 220 kV. D'autre part, les calculs des distances minimales d'approche sont effectués en tenant compte de la tension de manœuvre de décharge U_{50} pour une configuration tige (de diamètre 12.5 mm)-plan [1,2].

La recherche des valeurs maximales de E_x et de E_y autour de l'extrémité (tige) du corps montre que la valeur maximale de la composante moyenne E se situe sur le point 1 le plus extrême dans le sens de l'axe des x . Par contre, la valeur maximale de la composante E_y se situe aux alentours du point 2 de la figure 5.1.

Le tableau 5.1 montre un état des variations des valeurs max du champ résultant pour différents niveaux de tension lorsque la distance x et le rayon de courbure r_p sont variés. On retrouve toujours la relation de proportionnalité entre le champ électrique et le niveau de tension appliqué. La diminution de la distance x n'engendre qu'une très faible augmentation de la valeur maximale du champ sur l'extrémité du corps, alors que la diminution du rayon de courbure augmente la valeur du champ de manière significative.

Ce modèle donne des résultats quelque peu inattendus qui consistent en la supériorité permanente de la composante E_y sur E_x .

Lorsque la longueur L du bras est augmentée, tout autre paramètre géométrique étant constant, les valeurs maximales du champ électrique E_x et E_y augmentent. Le tableau 5.2 donne un état récapitulatif des variations des composantes max du champ résultant pour différents niveaux de tension lorsque L , x et r_p sont variés.

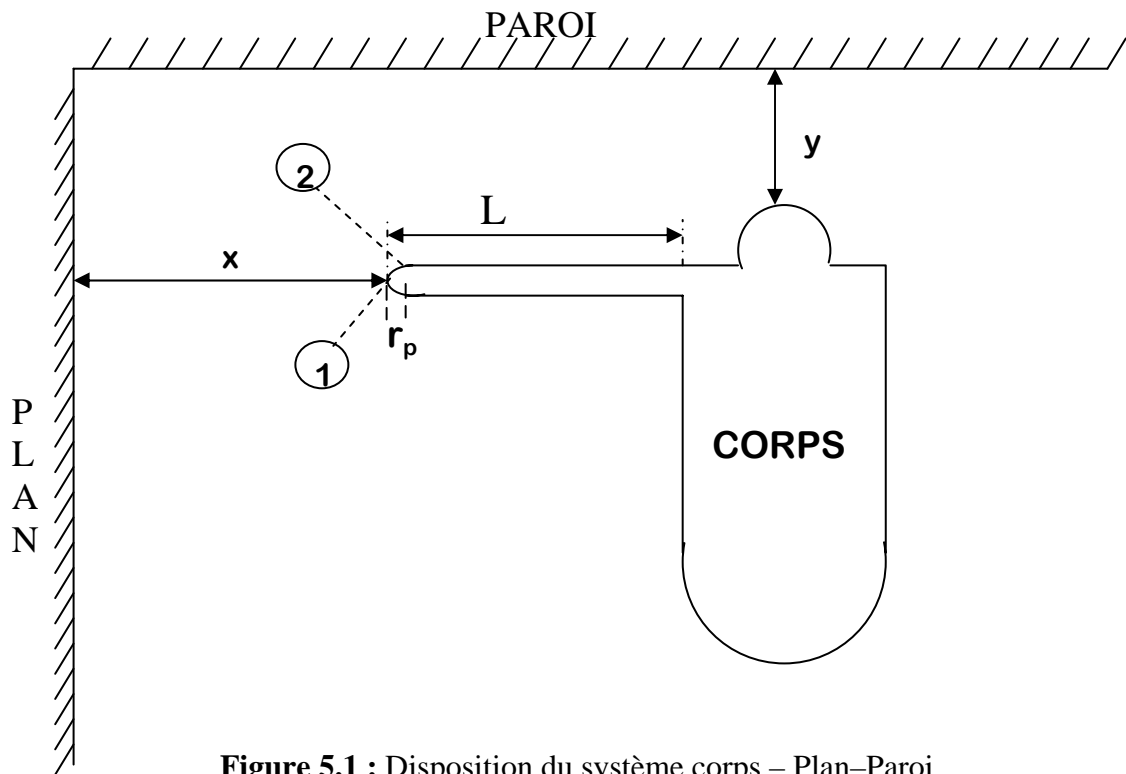


Figure 5.1 : Disposition du système corps – Plan–Paroi

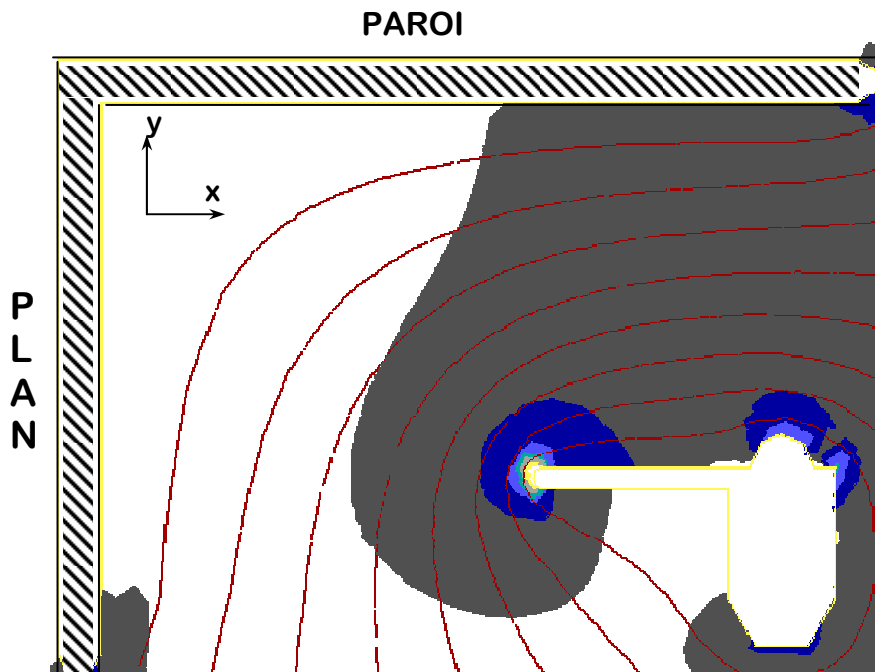


Figure 5.2 : Cartographie du champ électrique et des équipotentielles dans le système corps plan paroi :
 $U=220\text{kV}$; $x=2\text{m}$; $y=1,5\text{m}$; $L=0,8\text{m}$; $r_p=2\text{cm}$

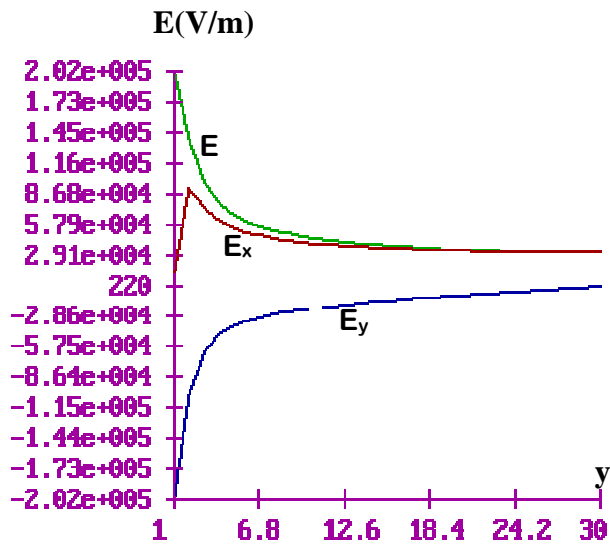


Figure 5.3: E suivant y : $U=220$ kV ;
 $x=2$ m ; $y=1,5$ m ; $L=0,8$ m ; $r_p=2$ cm

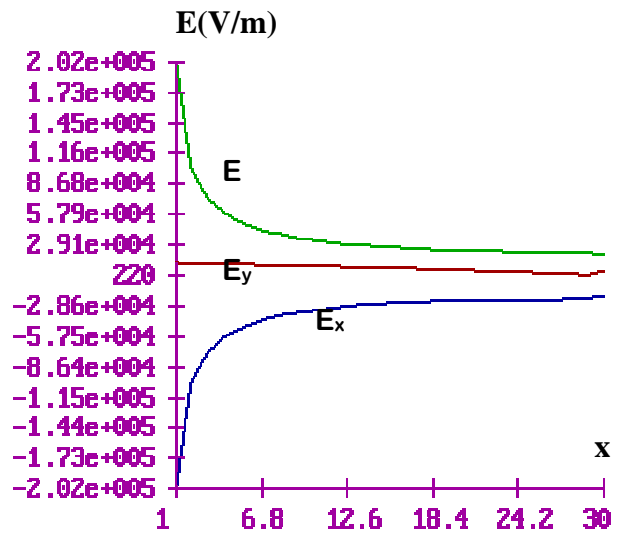


Figure 5.4 : E suivant x : $U=220$ kV ; $x=2$ m ;
 $y=1.5$ m ; $L=0,8$; $r_p=2$ cm

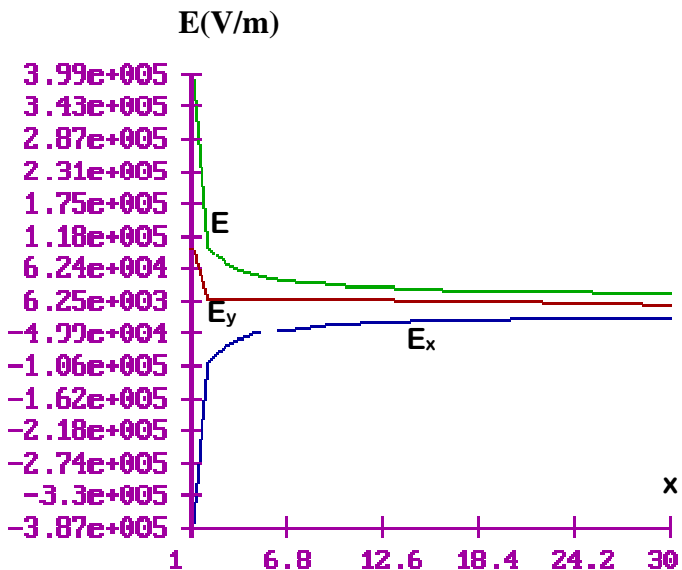


Figure 5.5 : E suivant x : $U=220$ kV $x=2$ m ; $y=1.5$ m ;
 $L=0,8$ m ; $r_p=1$ cm

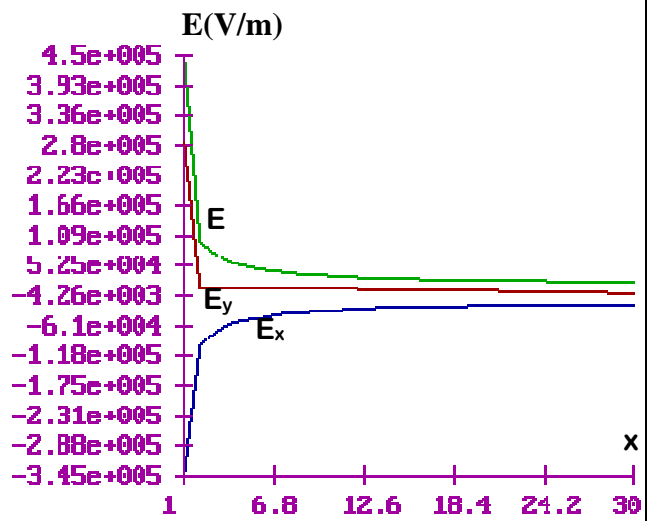


Figure 5.6: E suivant x : $U=220$ kV $x=2$ m ;
 $y=1.5$ m ; $L=0,8$ m ; $r_p=0.5$ cm

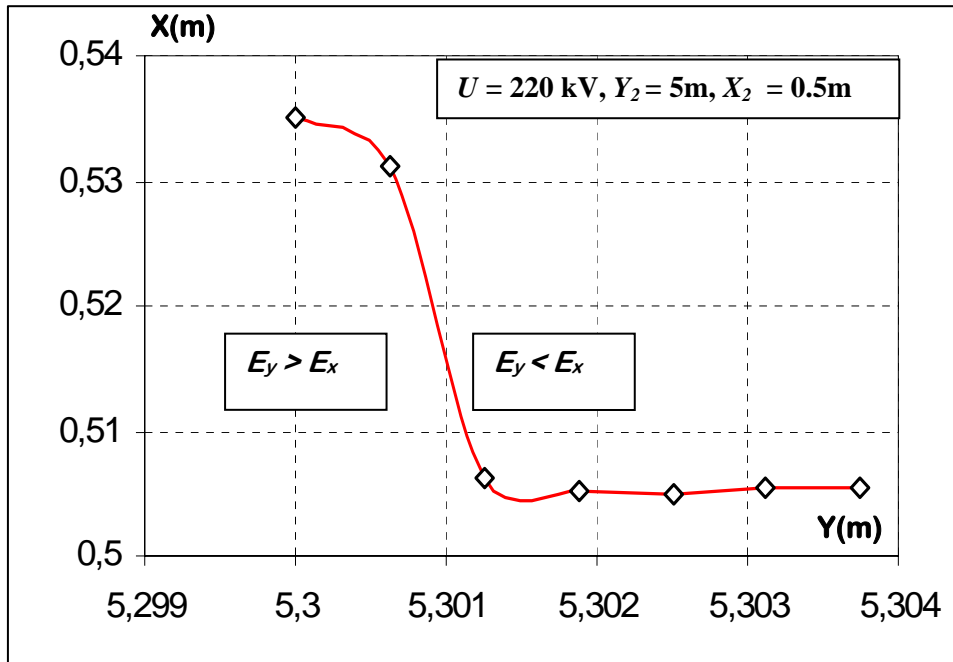


Figure 5.7: Courbe d'égalité entre la composante axiale du champ E_y et la composante radiale E_x

Tableau 5.1: Variations des composantes du champ électrique pour différentes valeurs de r_p et x .

| E _{max} (kV/cm) | | L=0,8m, y=1,5m | | | | | | |
|--------------------------|---------------------|----------------|------|------|------|------|------|-------------|
| | | U(kV) | | | | | | |
| x(m) | r _p (cm) | 3 | 10 | 30 | 60 | 120 | 150 | 220 |
| 2 | 2 | 0,02 | 0,10 | 0,29 | 0,61 | 1,23 | 1,53 | 2,25 |
| | 1 | 0,04 | 0,13 | 0,41 | 0,82 | 1,63 | 2,05 | 3,03 |
| | 0.5 | 0,06 | 0,21 | 0,61 | 1,22 | 2,43 | 3,04 | 4,50 |
| 1 | 2 | 0,03 | 0,10 | 0,30 | 0,63 | 1,24 | 1,54 | 2,26 |
| | 1 | 0,04 | 0,14 | 0,43 | 0,83 | 1,64 | 2,07 | 3,05 |
| | 0.5 | 0,06 | 0,22 | 0,61 | 1,24 | 2,45 | 3,04 | 4,52 |
| 0,5 | 2 | 0,03 | 0,10 | 0,31 | 0,64 | 0,78 | 1,57 | 3,61 |
| | 1 | 0,05 | 0,14 | 0,44 | 0,84 | 1,66 | 3,04 | 3,83 |
| | 0.5 | 0,06 | 0,22 | 0,63 | 1,25 | 2,45 | 3,07 | 5,77 |

Tableau 5.2: Variations des composantes du champ électrique pour différentes valeurs de r_p , L et x.

| E _{max} (kV/cm) | | y=1,5m | | | | | | |
|--------------------------|--------------------|--------|------|------|------|-------------|--------------|--------------|
| | | U(kV) | | | | | | |
| x, L (m) | r _p (m) | 3 | 10 | 30 | 60 | 120 | 150 | 220 |
| x=1,5; L=1,3 | 0,02 | 0,03 | 0,13 | 0,38 | 0,78 | 1,51 | 1,92 | 4,01 |
| | 0,01 | 0,04 | 0,16 | 0,50 | 0,97 | 1,87 | 2,35 | 3,37 |
| | 0,005 | 0,07 | 0,25 | 0,69 | 1,45 | 2,81 | 3,27 | 6,00 |
| x=1; L=1,8 | 0,02 | 0,06 | 0,12 | 0,40 | 0,84 | 1,93 | 2,40 | 3,04 |
| | 0,01 | 0,07 | 0,18 | 0,58 | 1,27 | 2,40 | 3,08 | 4,19 |
| | 0,005 | 0,09 | 0,28 | 0,92 | 1,63 | 3,29 | 4,35 | 5,46 |
| x=0,5; L=2,3 | 0,02 | 0,08 | 0,38 | 1,13 | 2,21 | 4,34 | 5,47 | 7,70 |
| | 0,01 | 0,12 | 0,42 | 1,25 | 2,44 | 4,80 | 5,90 | 8,43 |
| | 0,005 | 0,14 | 0,49 | 1,42 | 2,81 | 5,62 | 11,17 | 10,15 |

II-Variations des lignes équipotentiels.

Le logiciel utilisé [56, 59] nous a également permis de tracer dans le domaine étudié les variations des lignes équipotentiels avec une simplicité similaire à celle du tracé des lignes de champ électrique. La figure 5.8 représente les différentes dimensions du système inter électrodes et la distribution des lignes équipotentiels. La distribution des amplitudes des potentiels selon l'axe des abscisses "x" entre les points A et B est représentée sur la figure 5.9 où l'on observe que les potentiels sont assez élevés jusqu'au moins la moitié de l'espace inter électrodes.

La distribution des équipotentiels entre les points A et C selon l'axe des y (fig.5.10) est similaire à celle obtenue selon l'axe des x. Cependant, les valeurs relatives du potentiel à l'intérieur de l'espace inter electrodes sont supérieures en direction de y. Egalement, lorsque le rayon de courbure de la pointe est réduit, le potentiel sur celle-ci n'est pas altéré (fig.5.11), seule la distribution des potentiels à l'intérieur de l'espace inter électrodes est affectée.

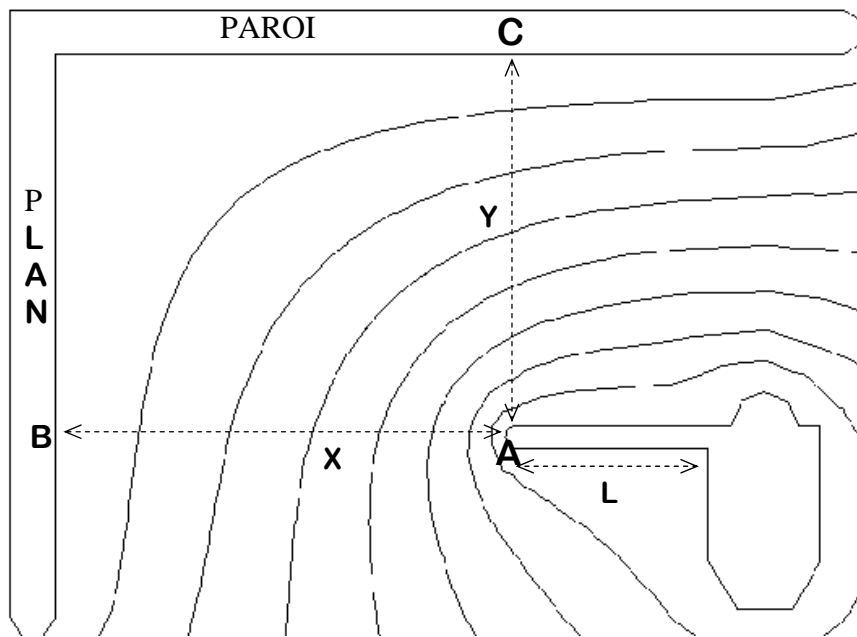


Figure 5.8: Lignes équipotentielles dans un système corps plan paroi, $U=220\text{kV}$; $x=2\text{m}$; $y=1.5\text{m}$, $L=0.8\text{m}$; $r_p=2\text{cm}$

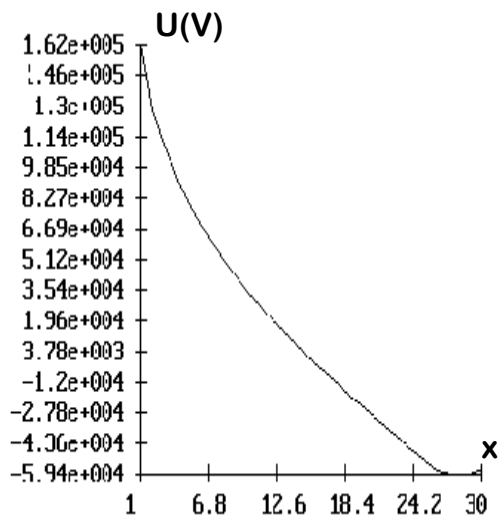


Figure 5.9: Variation du potentiel entre main (tige) et plan selon x , $U=220\text{kV}$, $x_{\text{max}}=2\text{m}$, $y_{\text{max}}=1.5\text{m}$, $L=0.8\text{m}$, $r_p=2\text{cm}$

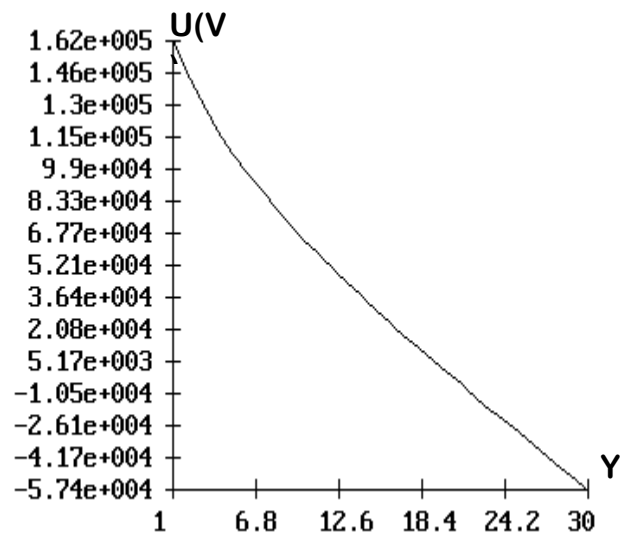


Figure 5.10: Variation du potentiel entre main (tige) et plan selon y , $U=220\text{kV}$, $x_{\text{max}}=2\text{m}$, $y_{\text{max}}=1.5\text{m}$, $L=0.8\text{m}$, $r_p=2\text{cm}$

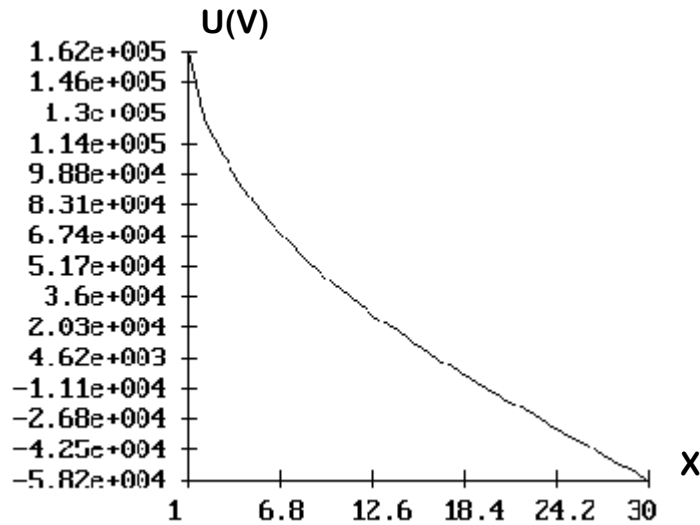


Figure 5.11: Variation du potentiel entre main (tige) et plan selon x, $U=220\text{kV}$, $x_{\text{max}}=2\text{m}$, $y_{\text{max}}=1.5\text{m}$, $L=0.8\text{m}$, $r_p = 0.5\text{cm}$

III-Configuration disjoncteur – opérateur dans un environnement de poste.

Les travaux sous tension sur les ouvrages des postes électriques présentent techniquement les mêmes contraintes que celles des lignes aériennes. Cependant, l'opérateur présente plus d'espace et de possibilités de manœuvre par rapport aux lignes aériennes, notamment pour celles du réseau Algérien dont la conception d'origine n'a pas été conçue spécialement pour travaux sous tension. Dans cette configuration, on étudie le cas d'un opérateur intervenant à distance sur un disjoncteur à haute tension dans un poste électrique par l'utilisation d'équipements spéciaux (exemple : nacelle, perches isolantes, ...) (Fig.5.12 et 5.13).

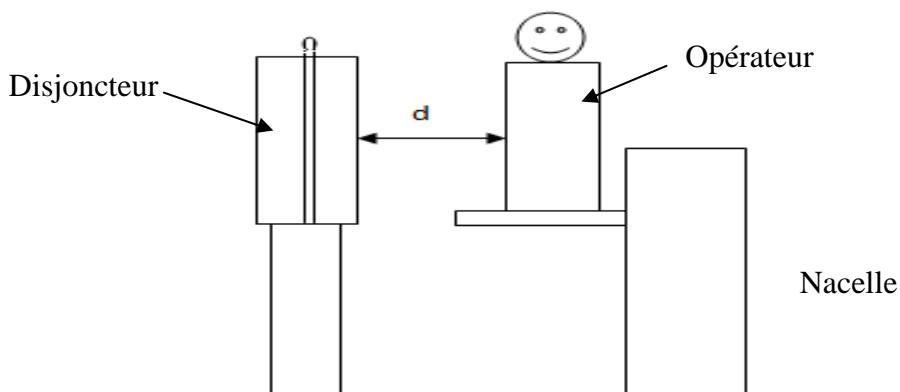


Figure 5.12 : Schéma d'une configuration disjoncteur-opérateur

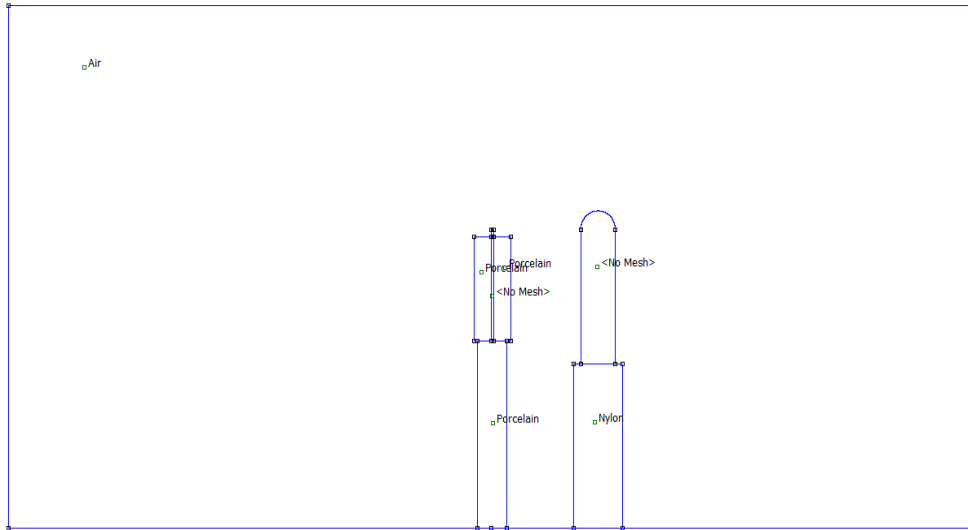


Figure 5.13: Domaine d'étude et configuration disjoncteur –opérateur

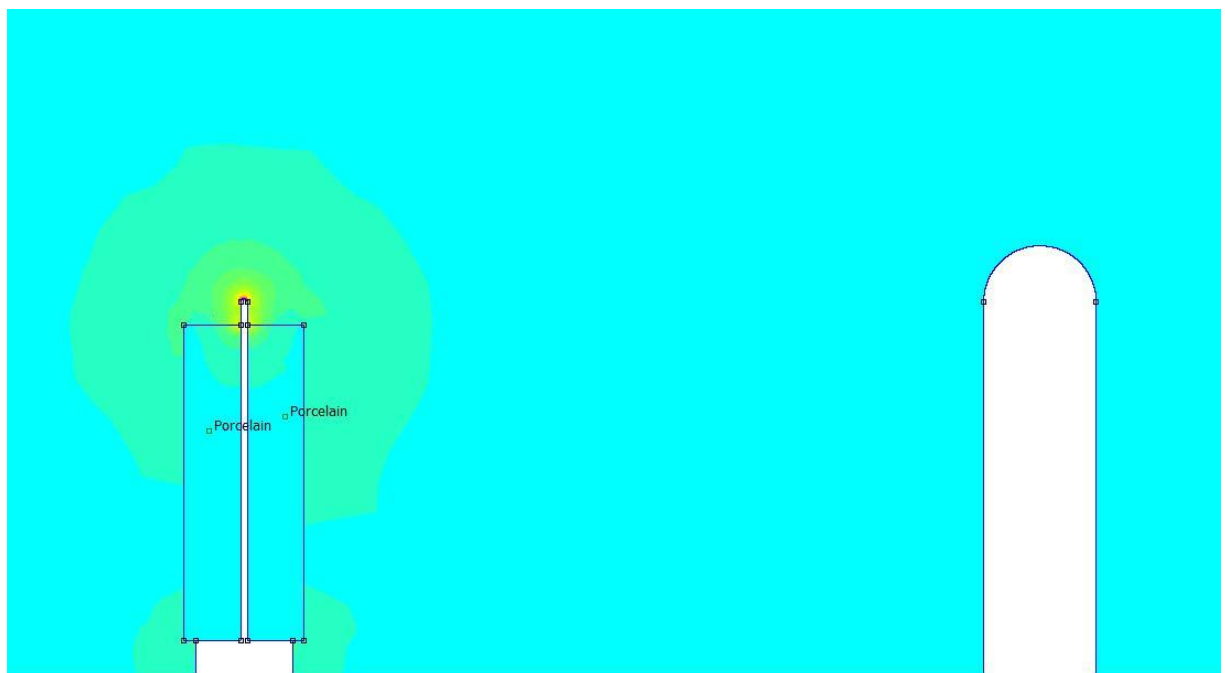


Figure 5.14 : Distribution du champ électrique dans la configuration disjoncteur –opérateur pour $d=3\text{m}$ et $U=220\text{kV}$

Nous avons étudié la variation du champ électrique de ce système en agissant sur la distance $d = 1, 2, 3$ et 4 m. Les résultats obtenus sont regroupés dans le tableau 5.3.

Tableau 5.3: Variations du champ électrique maximal du système disjoncteur-opérateur

| | | U(kV) | | | |
|-------|--------------------------|-------|------|------|------|
| d (m) | | 30 | 60 | 220 | 400 |
| 1 | E _{max} (kV/cm) | 0,20 | 0,42 | 1,55 | 2,81 |
| 2 | E _{max} (kV/cm) | 0,19 | 0,37 | 1,34 | 2,44 |
| 3 | E _{max} (kV/cm) | 0,18 | 0,35 | 1,27 | 2,31 |
| 4 | E _{max} (kV/cm) | 0,17 | 0,34 | 1,25 | 2,27 |

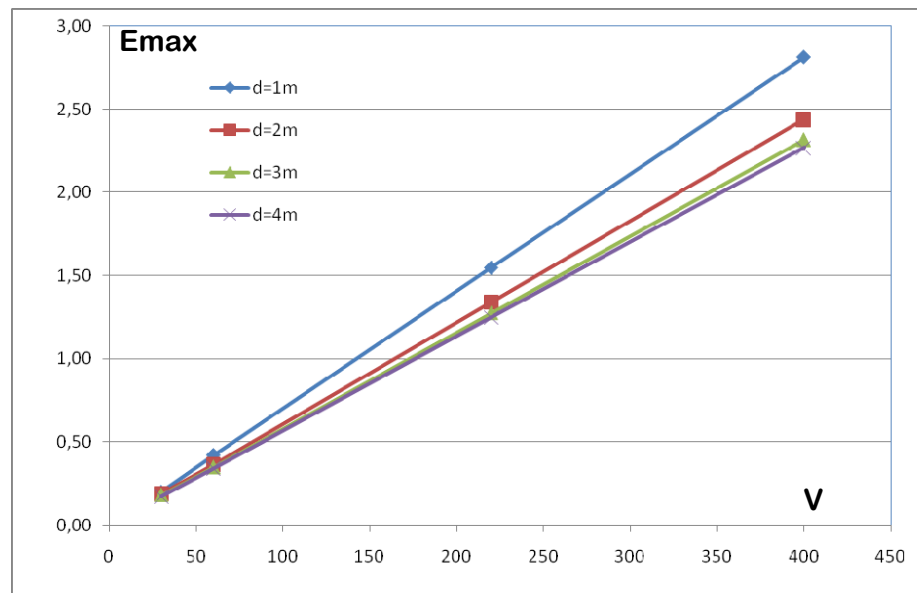


Figure 5.15: Variation du champ électrique E_{max} en fonction de la tension pour différentes distances inter-électrodes.

Que ce soit pour une ligne aérienne ou un poste de transformation, la variation du champ électrique augmente de façon très significative lorsque le niveau de tension est augmenté. L'augmentation de la distance ne réduit pas fortement les valeurs du champ sur les surfaces vives du système étudié.

Une différence est également relevée par rapport à la configuration du système : Un changement dans la configuration engendre une modification dans la répartition du champ. Ainsi, la valeur maximale du champ électrique en dépend.

IV. Comparaison entre les différentes normes pour la détermination du champ électrique maximum.

La loi de variation du champ électrique critique en fonction de la tension, pour une pointe normalisée de 6.25 mm, est applicable pour les différentes normes et auteurs. Les résultats obtenus par le biais du calcul numérique sont concordants par rapport au champ maximum (figure 5.16), excepté pour la formule de Paris qui donne des valeurs de champ limite plus importantes [57, 58]. Ceci est dû à la distance minimale d'approche déterminée par cette formule.

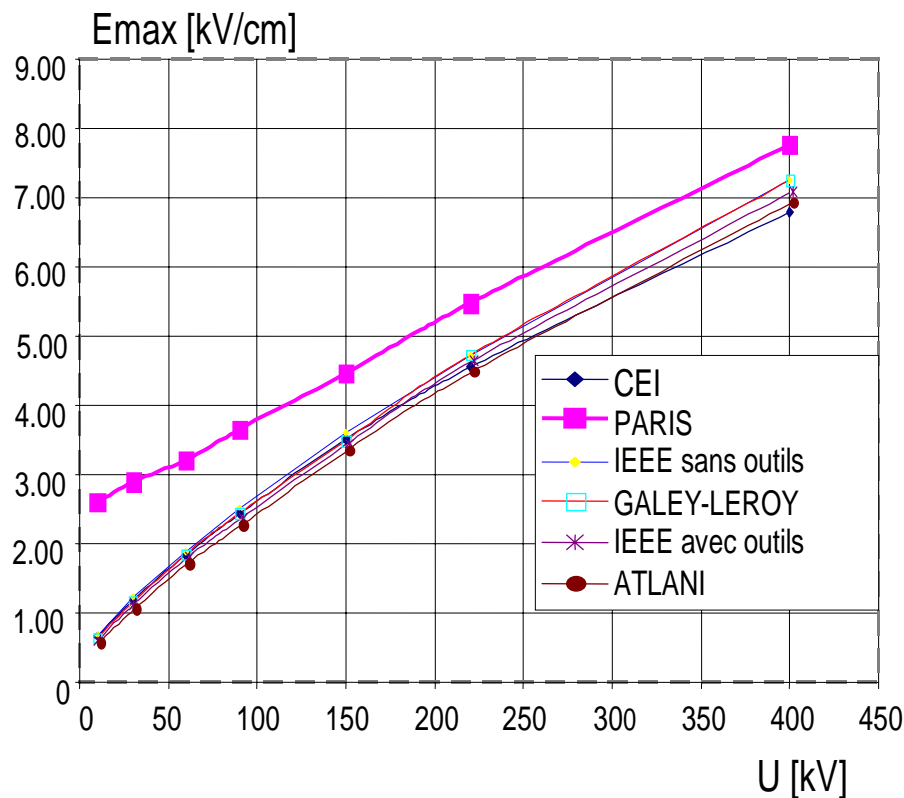


Figure 5.16. Variations du champ électrique maximum en fonction de la tension pour une tige de rayon normalisé de 6.25mm, selon différentes normes et auteurs, distance inter-électrodes $d = 1\text{m}$

IV- Relations entre champ électrique et distance minimale d'approche (DMA).

La méthode développée nous a permis d'accéder à l'estimation des distances minimales d'approche dont le protocole de calcul, en fonction du niveau de tension, est décrit dans la CEI 61472 [1]. La distance minimale d'approche dépend essentiellement du gradient de tension qui règne dans l'environnement où le travail doit être exécuté. Cette dépendance est rapportée dans la figure 5.17. Les résultats obtenus sont en bon accord avec ceux données dans la IEEE Std 516 [2] pour presque les mêmes conditions (DMA phase-terre, ligne 60 Hz, utilisant un facteur transitoire de surtension égal à 2.2 avec outils dans l'air pour des altitudes inférieures à 900 m).

Ces données peuvent être bien exprimées par une fonction polynomiale de la forme:

$$DMA = 6.10^{-6}.U^2 + 15.10^{-4}.U + 60.10^{-2} \tag{5.16}$$

Où U est la tension entre phases en kV et DMA est en m.

Sur la même figure, nous avons également présenté les variations du champ électrique max correspondant à chaque distance minimale d'approche en fonction du niveau de tension appliquée, pour un système d'électrodes tige-plan. Les deux variables (Champ électrique et distance minimale d'approche) évoluent de manière similaire lorsque la tension est variée.

Une relation empirique de type polynomiale est la mieux indiquée pour lier les variations du champ max à la distance minimale d'approche. Ces variations sont exprimées dans la figure 5.18. Le champ max suit ainsi une loi de la forme:

$$E_{max} = 0.06D^2 + 0.36D + 0.36 \text{ avec un coefficient de détermination } R^2 = 0.995.$$

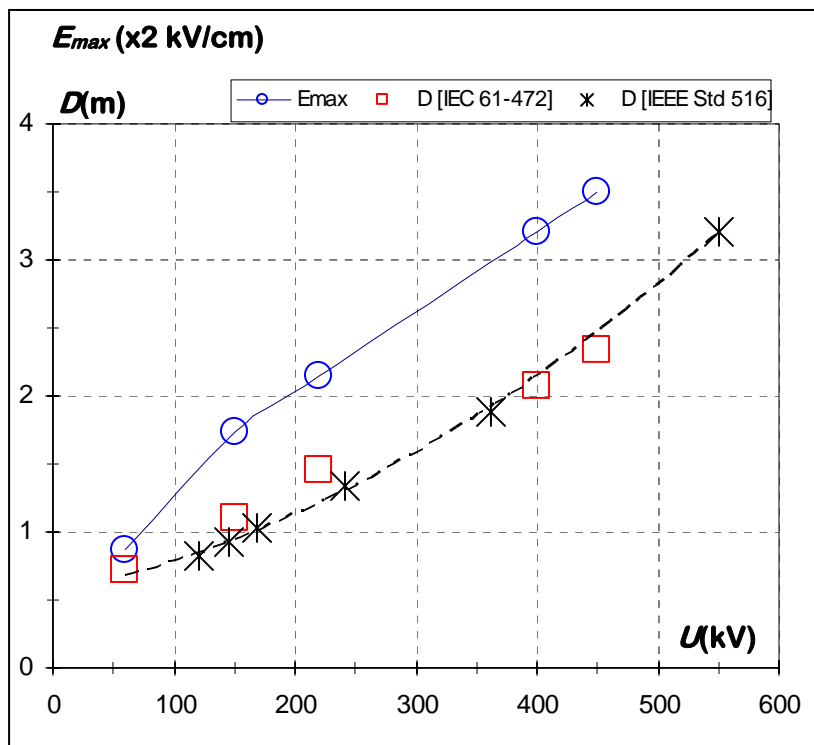


Figure 5.17: Variations du champ E_{max} et de la distance minimale d'approche en fonction de la tension pour une tige de rayon normalisé de 6.25 mm

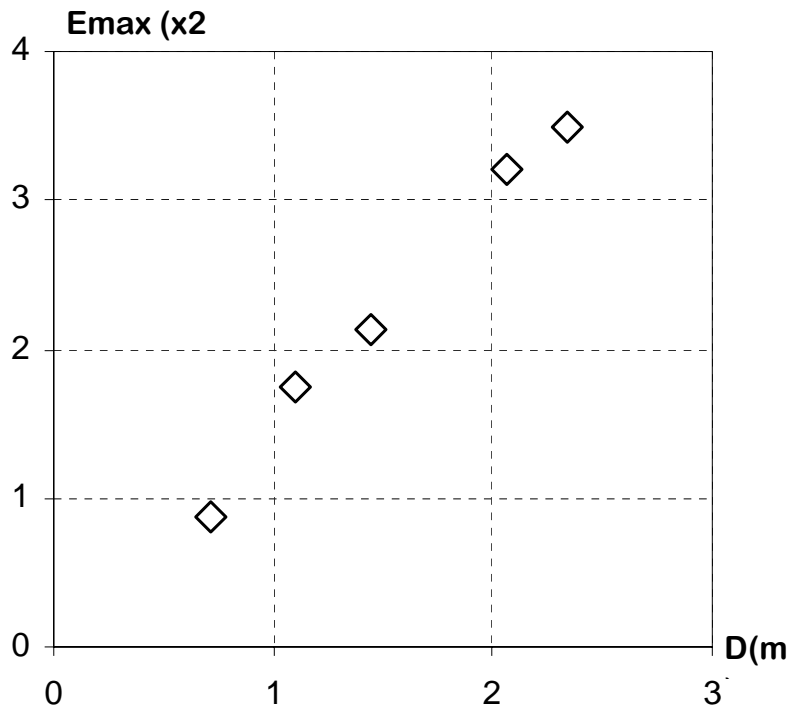


Figure 5.18: Variation du champ E_{max} en fonction de la distance minimale d'approche pour une pointe de rayon normalisé de 6.25 mm

V- Influence du rayon de courbure sur la distance minimale d'approche.

Les méthodes de détermination des distances minimales d'approche communément utilisées [1, 2, 5] considèrent des outils ou des corps sous tension de forme arrondie de rayon égal à 6,25mm [57-59].

Le renforcement du champ électrique régnant autour des pointes acérées sous tension est un élément précurseur quant à l'amorçage d'arcs électriques. Par conséquent, le rayon de courbure de ces parties acérées joue un rôle important quant au dimensionnement des distances minimales d'approche. Nous avons ainsi déterminé pour chaque niveau de tension, une relation de dépendance qui devrait relier la distance minimale d'approche au rayon de courbure. La figure 5.19 montre de telles variations.

Les résultats obtenus montrent que les distances minimales d'approche doivent être d'autant plus importantes que le rayon de courbure des outils utilisés est petit [57, 61, 62]. Cependant, cette importance devient minime pour les rayons de courbure supérieurs à 20 mm. Sur la même figure, nous avons également reporté les valeurs de la DMA correspondant aux tensions considérées, obtenues par interpolations dans l'équation (5.16). Un bon accord est trouvé entre ces valeurs, obtenues dans les conditions décrites précédemment, et celles

obtenues selon la CEI 61-472 pour une altitude de 200 m et un facteur de surtension transitoire égal à 2.2 [63,64].

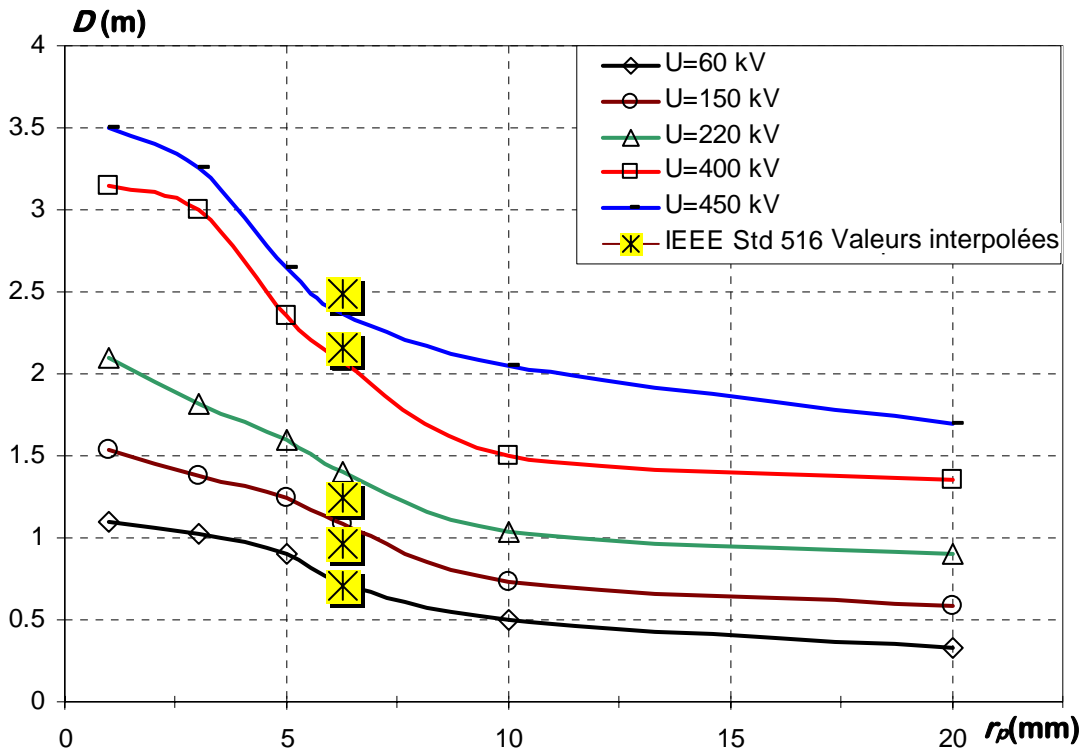


Figure 5.19: Variations de la distance minimale d'approche D en fonction du rayon de courbure de la pointe r_p dans le système tige-plan pour différents niveaux de tension [64].

VI-Discussions.

Ce travail a permis le développement d'une technique permettant l'extension des méthodes de calcul des distances minimales d'approche, décrites essentiellement dans les normes CEI 61 472 et IEEE Std 516 et qui concernent principalement les variations de ces distances en fonction du niveau de tension de la ligne, sachant que la rigidité de l'air est très dépendante de la distance inter électrodes. Le seul élément intégrant la géométrie du système est compris dans le facteur d'intervalle "gap factor" tenant compte des propriétés macroscopiques du tronçon de ligne considéré.

Les essais expérimentaux ayant abouti à la mise en œuvre de ces normes concernent les tensions de claquage sous tension de manœuvre dans un système tige-plan de dimensions assez grandes, où les paramètres essentiels sont la tension statistique d'amorçage et la distance. La difficulté pratique de mener ce genre d'expériences sur des pointes assez acérées nous a incités de contourner cela par la prise en compte du champ électrique au lieu de la tension. Car les conditions d'amorçage des arcs dépendent aussi bien du niveau de tension appliqué que de la géométrie des objets se trouvant dans la zone de la distance inter potentiels la plus courte; le milieu étant toujours de l'air. C'est ainsi que l'intérêt de tenir compte du champ électrique sur la zone vive de travail pour le dimensionnement des DMA devient plus

approprié et permet d'avoir une connaissance assez précise des gradients max qu'il peut atteindre. Ceci est d'autant plus d'actualité que les opérations de travail sous tension ont tendance à devenir de plus en plus nombreuses, pouvant nécessiter parfois l'usage d'outils de précision dont les dimensions peuvent être assez acérées par rapport à celles communément considérées.

Notre travail s'est singularisé par la prise en compte de la distance et du champ électrique pour prendre en considération de manière précise les affinités géométriques du système où sera exécuté le travail sous tension.

Cet avantage du champ nous a permis également d'affiner le dimensionnement des distances d'approche en tenant compte de manière précise des formes des objets flottants intervenant souvent dans la zone vive de travail et aussi de la morphologie de l'opérateur (être humain ou machine) par rapport à la structure du pylône ou aussi à la console et à la phase adjacente.

C'est à ce titre que le calcul du champ électrique s'est avéré être un outil important de passage aux distances d'approche dans la technique développée. Cette évaluation du champ électrique peut être faite aujourd'hui avec suffisamment de précision indifféremment des nombreux logiciels de calcul du champ électrique.

Il est évident que la technique développée a été validée par le confortement de nos résultats par ceux prévus par les normes CEI 61 472 et IEEE std 516 pour des applications particulières [64]. L'écart le plus important est de 1.32% (correspondant à 3.1 cm) qui est plus petit que la différence entre les valeurs généralement considérées pour la distance ergonomique relative aux mouvements involontaires (30 cm en basse tension et 50 cm en haute tension).

Conclusion.

Contrairement aux systèmes d'électrodes axisymétriques (pointe-plan et tige-plan) où la composante radiale E_y du champ est quasiment nulle, le système corps-plan-paroi présente des composantes axiales E_x et radiales E_y aussi importantes les unes que les autres. Leur importance relative est dépendante de l'emplacement vis à vis du plan et de la paroi.

Le renforcement du champ électrique régnant autour des pointes acérées sous tension est un élément précurseur quant à l'amorçage d'arcs électriques. Par conséquent, le rayon de courbure de ces parties acérées joue un rôle important quant au dimensionnement des distances minimales d'approche.

Bien que le niveau de tension soit le facteur essentiel dans l'estimation des distances minimales d'approche, la distribution du champ électrique autour des parties actives est un élément dont on doit tenir compte, spécialement pour la prévision de futurs travaux non usuels. Une technique consistant à utiliser les méthodes numériques est ainsi développée afin d'adapter les méthodes empiriques pour l'évaluation des distances minimales d'approche lorsque des outils de dimensions non conventionnelles sont appelés à être utilisés.

Ce travail, basé sur l'étude analytique et numérique du champ électrique dans différentes configurations géométriques, nous a permis de mettre en évidence les paramètres influents sur le renforcement du champ électrique dans des systèmes d'électrodes proches des dispositions que l'on retrouve fréquemment dans les pylônes des lignes aériennes et les postes électriques haute et très haute tension. Ceci nous a conduits par la suite au dimensionnement des intervalles permettant des travaux sous tension.

Dans une ligne électrique, les différentes courbes de distribution du champ électrique montrent que pour une tension fixée, les rayons des conducteurs, l'intervalle entre conducteurs et la disposition des conducteurs (type d'armement) constituent les paramètres essentiels influents dans la répartition spatiale du champ. Le champ électrique superficiel E augmente d'autant plus que le rayon du conducteur ou/et l'intervalle entre conducteurs diminue. Ceci explique le fait qu'en haute et très haute tension tous les appareils et accessoires ont de grands rayons possibles (conducteurs en faisceau par exemple) et sont munis d'anneaux de répartition du champ électrique. Des rayons et intervalles sous dimensionnés provoquent l'effet couronne avec toutes ses conséquences et favorisent le claquage de l'isolation.

Les résultats obtenus à partir du calcul numérique viennent conforter ceux obtenus par l'étude analytique où il est mis en évidence un renforcement du champ électrique au niveau des terminaisons d'électrodes présentant des profils arrondis.

Le niveau de tension appliqué demeure l'élément le plus décisif quant à la grandeur du champ électrique et à la dimension de la distance minimale d'approche à respecter par les opérateurs réalisant des travaux de réparation ou de maintenance sur les ouvrages électriques en service (sous tension). De plus, les dimensions des équipements et outils utilisés lors de travaux sous tension jouent un rôle important quant au renforcement local du champ électrique et ainsi sur le dimensionnement des distances minimales d'approche.

En outre, les distances minimales d'approche sont utilisées dans le dimensionnement de la silhouette des pylônes des lignes aériennes HT/THT. Un sous dimensionnement présente des risques d'amorçage et un surdimensionnement un coût de revient élevé.

Un dimensionnement optimal est possible dans la mesure de la connaissance des caractéristiques du réseau et des statistiques fiables sur les surtensions de manœuvre. La confirmation des résultats de calcul par des essais de simulation en grandeur réelle est souhaitable.

Sur le plan pratique, on doit tenir compte de la grande variété des topologies de réseaux électriques et de leur mode d'exploitation qui rend difficile la généralisation de conclusions bien tranchées. C'est d'autant plus difficile qu'en dépit de nombreuses simulations effectuées (fermetures sur ligne compensée et non compensée avec et sans charge).

Les réseaux que l'on a considérés correspondent à des réseaux où l'on manœuvre traditionnellement des disjoncteurs munis de résistances de fermeture qui permettent de limiter les surtensions à des niveaux de l'ordre de 2 à 2.2 pu. Des niveaux de limitation

inférieurs peuvent être accessibles en utilisant des disjoncteurs plus performants avec résistance de fermeture et synchronisation et, des parafoudres.

Enfin, ce travail s'inscrit dans un axe de recherche qui reste en cours et qui pourrait contribuer à la mise en place d'un domaine de recherche « Systèmes de Sécurité en Haute Tension ».

- [1] Norme C.E.I 61-472, "Travaux sous tension- Distance Minimales d'Approche- Méthodes de calcul", 1998, 10-27.
- [2] *IEEE Std 516*, "Guide for maintenance methods on energized power lines", 2003.
- [3] IEEE Std 4-1995, "Standard techniques for high voltage Testing", Power Systems Instrumentation and Measurements Committee of the IEEE Power Engineering Society, 1995.
- [4] Norme C.E.I 60-743, "Terminologie pour les outils et l'équipement utilisé dans les travaux sous tension", 1983 et 1995 (partie 2: Système de mesure).
- [5] E Kuffel, W S Zaengl and J Kuffel, "High voltage engineering fundamentals" Newnes, Butterworth-Heinemann, Second Edition, 2000, p.481.
- [6] C. GARY -Techniques de l'ingénieur, D4 II, "Réseaux et Appareillages", D 670 - 1 à 18.
- [7] Christian Atlani, "Travaux sous tension", Techniques de l'ingénieur, D4 140-1 à 9.
- [8] P. Johannet et B. Dalle, "Réseaux et Appareillages, Techniques de l'ingénieur, D 673-1 à 30.
- [9] G. Gela, "Live Working and maintenance Techniques", CIGRE 2000-P1-03.
- [10] L. Tione, "An Overview of live Working and Maintenance Techniques", CIGRE 2000-P1-01.
- [11] L. Thione, "An Overview of live line diagnostic techniques", CIGRE 2000 -P1-02.
- [12] Norme C.E.I 71-1, "Coordination des isolements – Partie 1: Définitions, principes et règles", Novembre 1995.
- [13] Norme C.E.I 71-2, "Coordination des isolements – Partie 2: Guides d'application", 1995.
- [14] H. Moulai, S. Belkhir, Y. Kadoum et A. Mameri, "Mesure des champs électriques à fréquence industrielle", Séminaire National sur la Métrologie en Haute Tension, Tiaret, Algérie, 15 et 16 Décembre 2002.
- [15] S.Belkhir, H.Moulai, F.Soukeur, "Comparative Study of Minimum Approach Distances Dimensioning and Application for High Voltage Live Works", The 3rd International Conference on Electrical Engineering Design and Technologies (ICEEDT'09), Oct. 31 – Nov. 02, 2009, Sousse, Tunisia.

- [16] S. Belkhir, "Distribution du champ électrique et sécurité des travaux sous tension dans les ouvrages à haute tension", Mémoire de Magister, USTHB, Alger, Mai 2003.
- [17] S. Belkhir, H. Moulai, Y. Kadoum et A. Mameri, "Calcul des distances minimales d'approche en vue des travaux sous tension", Séminaire National sur la Métrologie en Haute Tension, Tiaret, Algérie, 15 et 16 Décembre 2002.
- [18] Norme C.E.I 60-1, "Techniques des essais à haute tension; Première partie: définitions et prescriptions générales relatives aux essais", Deuxième Edition :1989-11, 1989.
- [19] Norme C.E.I 60-2, "Techniques des essais à haute tension; deuxième partie: Systèmes de mesure", Deuxième Edition 1994-11, 1994..
- [20] Norme C.E.I 60-2, "Techniques des essais à haute tension" Amendement 1- 1994-11, 1994.
- [21] P. Johannet et B. Dalle, "Réseaux et Appareillages", Techniques de l'ingénieur, D4 II, D 673 -1 à 20.
- [22] S. Belkhir, H. Moulai, M.L. Benyahia, A. Mameri et Y. Kadoum, "Sécurité des travaux sous tension sur les lignes à haute tension", 1st International Conference on Energy Efficiency, ICEE' 2003, Algiers, May 25-26, 2003.
- [23] M. Brahami, F. Soukeur, H. Sayah, "Lignes de transport d'énergie et perturbations électromagnétiques, 4^{ème} Conférence Nationale sur la Haute tension, Ghardaia, Algérie, 16-17 Janvier 2002.
- [24] Norme C.E.I 833, "Mesure des champs électriques à fréquence industrielle", Genève Suisse, Première Edition, 1987.
- [25] H. Moulai, S. Belkhir, A. Mameri et Y. Kadoum, "Evaluation du champ électrique dans les systèmes à haute tension en vue des travaux sous tension- approche numérique", 5^{ème} conférence nationale sur la haute tension, Oran, Algérie, 1, 2 et 3 Décembre 2003.
- [26] Hubert Lombroso, "Electrostatique et dynamique des particules chargées", 4^{ème} édition, DUNOD, 1995.
- [27] K. Hameyer, R. Belmans, J. Driesen, P. Berghmans, U. Palmner and E.M. Freeman, "Field simulations for high voltage applications", High Voltage Engineering Symposium, August 1999, Conference Publication N° 467, IEE, 1999.

- [28] H. Moulai et A. Beroual, "Courants de streamers dans l'huile minérale pour transformateurs sous tension alternative – Transition au claquage", 3^{ème} Conférence Nationale sur la Haute tension, Guelama, Algérie, 16-17 Novembre 1999. pp.45-48.
- [29] G. Raju et al., IEEE Trans. on Dielectrics and Electrical Insulation, Vol. 2 N°5, 1995.
- [30] Michel Aguet & Michel Ianoz, "Traité d'électricité-Haute Tension", Volume XXII, 2^{ème} édition, 2004.
- [31] F. W. Peek, "Dielectric phenomena", McGraw Hill, 1920.
- [32] M. HAIDARA, "Impulsions de Trichel dans les diélectriques liquides" thèse de doctorat, Grenoble 1988.
- [33] F. Eichorn, IEEE Transactions on Electrical Insulation, Vol.12- pp. 2-18, 1997.
- [34] Fred Gardiol, "Traité d'électricité – ELECTROMAGNETISME", Vol. III, édition 1996.
- [35] A. Eriksson, J. Grandl, O. Knudsen, "Contrôle optimisé des surtensions de manœuvres en lignes au moyen de disjoncteurs sans résistance de fermeture", Cigré 1990, 13-305, 1990.
- [36] D. Leroux, S. Breault, A. Dutil, G. Croteau, "Utilisation de parafoudres sur les lignes à 735 kV comme solution alternative de contrôle des surtensions de manœuvre. Validation par des essais en réseau", Conférence et Exposition Electricité 96, Montréal 28 avril au 3 mai 1996.
- [37] Claude Gary, "Effet couronne en tension alternative, "Technique de l'Ingénieur-D4-640,3-1 à 7
- [38] J.K. Bladow, T.L. Weaver, "Contrôle des surtensions pour le projet de ligne de transport 500kV Californie – Orégon", Cigré 1990 13-304, 1990.
- [39] Cigré WG13.07, "Controlled switching of HVAC circuit breakers. Guide for application lines, reactors, capacitors, transformers", Electra 183, avril 1999 and 185, august 1999.
- [40] Cigré TF 13.00.1, "Controlled switching –A state-of-the-art survey", Electra 163, December 1995 and 164, February 1996).
- [41] L.W. Marks, "Line discharge by potential transformers", IEEE PAS, April 1969, pp. 293- 297.
- [42] EDF-Direction des études et recherches – H112, "La coordination d'isolement du réseau à 400 kV".

- [43] O. Lesaint, P. Gournay and R. Tobazeon, "Investigation on transient currents associated with streamer propagation in dielectric liquids", *IEEE Transactions on Electrical Insulation*, Vol.26 N° 4, August 1991, pp. 699-707.
- [44] J.E. Beehler, "Weather, Corona, and the decay of trapped energy on transmission lines", *IEEE PAS*, May 1964, pp. 512-520.
- [45] M. Kanya Kunari, O. Rajesh Kumar, P.V Nambudiri, K.N Srinivasan, "Computation of electrical environmental effects of transmission lines", *High Voltage Engineering Symposium*, , Conference Publication N° 467, IEE, August 1999, pp.2.160.P6-2.163.P6.
- [46] A.S. Abdellah, "Electric Fields from transmission lines nearby peopled areas in Egypt. Theory versus experiment", *High Voltage Engineering Symposium*, Conference Publication N° 467, IEE, August 1999, pp. 2.119.
- [47] A. Bendaoud, M. Brahami et A. Tilmatine, "Calcul et perturbation des pertes par effet couronne dans les lignes T.H.T à courant alternatif ", 3^{ème} Conférence Nationale sur la Haute tension, Guelma, Algérie, 16-17 Novembre 1999, pp. 79-84.
- [48] T. Keikko, J. Isokorpi, L. Korpinen, "Practical problems in calculating electric fields of transmission lines", *High Voltage Engineering Symposium*, Conference Publication N° 467 IEE, August 1999, pp. 2.103.P6- 2.106.P6.
- [49] O.E. Ibrahim, "An expression for the electric field distribution in rod-plane gaps." *IEEE Trans. on Elect. Ins.*, Vol. 23 N°3, June 1988, pp. 493-494.
- [50] P.L. Levin, A.J. Hansen, D. Beatovic, H. Gan & J.H. Petrangelo, "A unified boundary-element finite element package", *IEEE Trans Elect. Ins.*, Vol. 28 No.2, 1993, p.161.
- [51] Michel Saint-Jean, Janine Bruneaux & Jean Matricon, "Electrostatique et magneto-statique", Physique, Editions BelinSup, 2001.
- [52] Mohamed Okbi, "Electricité et électrostatique", Physique Générale, 2^{ème} Edition, OPU, 2006.
- [53] Jean Michel Bauduin & Annie Guerillot, "Electromagnétisme", Ellipses Editions, 2001.
- [54] P. L. Levin, A. J. Hansen, H. Gan and J.H. Petrogelo, *IEEE Trans. on Elect. Ins.*, Vol. 26 1991, pp. 1094-1103.

- [55] COELHO (R.) et DEBEAU (J.). – Properties of the tip-plane configuration (Propriétés de la configuration pointe-plan). *J. Phys. D : Appl. Phys.*, 4, 1971, p. 1 266-1 280.
- [56] R. TOBAZEON, Préclaquage et claquage des liquides diélectriques, *Techniques de l'Ingénieur, Traité Génie électrique*, D 2-450, pp.1-28.
- [57] S. Belkhir, H. Moulai, F. Soukeur, "Safe Distance Approach Dimensioning -Application to high Voltage Live Works", *Proceeding of the 5th IET International System Safety Conference 2010*, Manchester, UK, 18-20 October 2010, ISBN 978-1-84919-303-0, ISSN 0537-9989, Inspec Reference PEP0567Z.
- [58] S. Belkhir, H. Moulai, F. Soukeur and M. Ouhrouche, "Electric field assessment for application to live working", *ACTA Press, International Journal of Power and Energy Systems*, Vol. 30, No. 3, 2010, pp. 192-198, ISSN: 1078-3466. DOI: 10.2316/Journal.203.2010.3.203-4465.
- [59] H. Moulai, S. Belkhir and F. Soukeur, " Electric Field Assessment in High Voltage Systems: Application to Live Working on Overhead Lines", *ACTA Press, Proceedings of the 5th International conference on Power and Energy Systems, EUROPE 05*, 15-17 June 2005, Benalmadena, Malaga, Spain. ISSN: 1482-7891.
- [60] A. Domijan, Jr., R.K. Matavalam, A. Montenegro, W.S. Wilcox, Y.S. Joo, L. Delforn, J.R. Diaz, L. Davis & J. D'Agostini, "Effects of normal weather conditions on interruptions in distribution systems", *International Journal of Power & Energy Systems*, Vol.25, No 1, 2005, pp. 54-62.
- [61] M. Wu, S.S.P. Shen & D.O. Koval, "Modeling lightning caused transmission line outages in Alberta", *Proceedings of the Fifth IASTED International Conference on Power and Energy Systems*, Benalmadena, Spain, June 15-17, paper No 468-129, 2005, pp. 106-111.
- [62] N. Baljepali, S.S. Venkata, C.W.Jr. Richter, R.D. Christie & V.J. Longo, "Distribution system reliability assessment due to lightning storms", *IEEE Trans. On Power Delivery*, Vol. 20, Issue 3, July 2005, pp. 2153-2159.
- [63] S. Belkhir, H. Moulai et F. Soukeur, "Extension de la CEI 61-472 pour l'exécution de travaux sous tension avec des outils non normalisés", *Algerian Journal Of Technology*, *Proceedings de la 6^{ème} Conf. Nat. sur la H.T.*, Taghit, 05-07 Novembre 2007.
- [64] S. Belkhir, H. Moulai, Y. Ouchen, L. Kaboul, "Etude Comparative et Contribution au Dimensionnement des Distances Minimales d'Approche lors des Travaux Sous Tension", *Algerian Journal of Technology*, *Proceedings de la 7^{ème} Conf. Nat. sur la H.T.*, Sidi Belabbes, 19-21 Avril 2009.