

UNIVERSITE DES SCIENCES ET DE LA TECHNOLOGIE HOUARI BOUMEDIENE
Institut des Techniciens Supérieurs

THESE

PRÉSENTÉE EN VUE DE L'OBTENTION DU GRADE DE :

MAGISTER

En : ELECTRONIQUE

Spécialité : Instrumentation et Génie des Systèmes.

Par : M^r **SALAH BELKHIR**

SUJET :

**DISTRIBUTION DU CHAMP ELECTRIQUE ET
SECURITE DES TRAVAUX SOUS TENSION DANS
LES OUVRAGES A HAUTE TENSION.**

Soutenu, le 03 / 06 / 2003, devant le jury composé de :

Mr A. SOUALMIA	Professeur	(U.S.T.H.B)	Président
Mr H. MOULAI	Maître de conférences	(U.S.T.H.B)	Directeur de Thèse
Mr A. BOUBAKEUR	Professeur	(E.N.P)	Examineur
Mr A. MEKHALDI	Maître de conférences	(E.N.P)	Examineur
Mr S. TAHI	Chargé de cours	(U.S.T.H.B)	Examineur
Mr M. GHEZAILI	Dir. Recherche et Dév.	(SONELGAZ)	Invité

ملخص :

يحتوي هذا العمل دراسة حول توزيع شدة الحقل الكهربائي في شبكات التوتر العالي تفاديا لانفجار أعمال تحت التوتر. في هذا الغرض، سنقدم دراسة تحليلية و رقمية حول توزيع الحقل الكهربائي في الأشكال الأكثر تواجد في الميدان . من جهة أخرى، سنقدم طريقة حساب أقصر مسافة التي على كل منفذ عملية إحترامها حسب قيمة التوتر المتواجد في الشبكة المعنية. سنقدم أيضا تقيما لكل من العوامل المؤثرة على هذا الحساب كما نقدم مقارنة بين الطرق المختلفة الأكثر استعمالا. تم هذا العمل بمناقشة واستفسار النتائج المتحصل عليها.

RESUME :

Ce travail est consacré à l'étude de la distribution du champ électrique dans les systèmes des lignes à haute tension en vue des travaux sous tension. A cet effet, nous allons présenter une étude analytique et numérique sur la distribution du champ électrique dans les principales configurations rencontrées dans la pratique. D'autre part, nous présenterons une méthodologie de détermination des distances minimales d'approche en fonction du niveau de tension de la ligne que chaque opérateur effectuant des travaux sous tension doit respecter. Une estimation des différents facteurs intervenant dans les calculs sera présentée et une comparaison entre les différentes méthodes disponibles dans la littérature sera effectuée. Ce travail sera complété par une discussion et une interprétation des résultats obtenus.

ABSTRACT :

This work is devoted to the study of the electric field distribution in the electrode arrangements encountered in the high voltage systems in perspective of live workings. In this way, we are going to present an analytic and also numeric study about the electric field distribution in the main configurations encountered while executing live workings. On the other hand, we will present a methodology of determination of the minimal approach distances while varying the HV level and which every operator executing of live workings must respect. An assessment of the different factors intervening in the calculations will be presented and a comparison between the different available methods in the literature will be done. A discussion and an interpretation of the obtained results will also complete this work.

Mots clés : Haute tension – Réseaux électriques – Champ électrique – Travaux sous tension – Distance minimale d'approche.

Remerciements.

Le travail de cette thèse de Magister a été réalisé à l'Université des Sciences et de la Technologie Houari Boumediène 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 Achour SOUALMIA, Professeur à l'Université des Sciences et de la Technologie Houari Boumediène d'Alger "USTHB", 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 Ahmed BOUBAKEUR et Abdelouahab MEKHALDI, respectivement Professeur et Maître de conférences à l'Ecole Nationale Polytechnique d'Alger "ENPA" pour leur disponibilité à m'aider et avoir accepté de faire partie du jury de soutenance.

Que Monsieur Slimane TAHI, chargé de cours à l'Université des Sciences et de la Technologie Houari Boumediène d'Alger "USTHB", trouve ici l'expression de mon estime et mes remerciements pour m'avoir soutenu, encouragé et enfin accepté de faire partie du jury de soutenance.

Mes remerciements vont à l'adresse de Monsieur Mohamed GHEZAILI, Direction de Recherche et Développement à la Société Nationale d'Electricité et du Gaz "SONELGAZ" pour l'intérêt qu'il a 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 leur encouragements sincères.

Avec les mêmes sentiments, j'adresse mes remerciements à Madame MOULAI, ses mignons enfants et El-hadj 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 filles Amina et Sarah et mes fils 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

Désignations	Pages
<u>INTRODUCTION GENERALE</u>	1
<u>Chapitre I: CHAMP ELECTRIQUE ET TRAVAUX SOUS TENSION</u>	3
Introduction	3
I.1- Champ électrique	4
I.1.1- Intensité du champ électrique	4
I.1.2- Champ alternatif monophasé	5
I.1.3- Champ électrique triphasé	5
I.1.4- Champ électrique en haute tension	5
I.1.4.1- Classification du champ électrique	6
I.1.4.2- Importance de l'étude du champ électrique en haute tension	6
I.1.5- Champ électrique superficiel des conducteurs et dépendance des formes	6
I.1.6- Champ électrique entre deux conducteurs	11
I.2- Travaux sous tension	13
I.2.1- Méthodes de travail sous tension	14
I.2.1.1- Travail à distance	14
I.2.1.2- Travail au potentiel	15
I.2.1.3- Travail au potentiel intermédiaire (potentiel flottant)	15
I.2.1.4- Travail au contact	15
I.2.2- Calcul des distances minimales d'approche	17
I.2.2.1- Distances minimales d'approche	17
I.2.2.2- Méthodologie	17

I.3- Evaluation des tensions de décharge	18
I.3.1- Méthodes expérimentales	19
I.3.2- Types de surtension de décharge	21
I.3.3- Surtension de manœuvre	23
I.4- Tension de tenue	25
Conclusion	31
<u>Chapitre II: CALCULS ANALYTIQUES DU CHAMP ELECTRIQUE</u>	32
Introduction:	33
II.1- Système pointe-plan	33
II.1.1- Expression du champ électrique	33
II.1.2- Influence des paramètres sur le champ électrique	34
II.1.2.1- Influence de l'amplitude de la tension	34
II.1.2.2- Influence du rayon de courbure de l'électrode pointe	35
II.1.2.3- Influence de la distance inter électrodes	35
II.2- Calcul du champ électrique dans une ligne aérienne haute tension triphasée	38
II.2.1- Détermination de la matrice capacité	41
II.2.1.1- Calcul des coefficients des potentiels	42
II.2.1.2- Calcul des coefficients de la matrice des charges	43
II.2.2- Distribution du champ électrique dans les lignes aériennes THT	43
II.3- Distribution du champ électrique autour d'un opérateur	46
II.3.1- Cylindre posé sur la pointe à proximité d'une paroi	47
II.3.2- cylindre posé sur la pointe	54
Conclusion	56

<u>Chapitre III: CALCUL NUMERIQUE DU CHAMP ELECTRIQUE</u>	57
Introduction:	58
III.1- Système pointe-plan	58
III.2- Système cylindre-plan-paroi	59
III.3- Système cylindre-plan	67
III.4- Système de double cylindre en forme de T	72
Conclusion	75
<u>Chapitre IV: DISTANCES MINIMALES D'APPROCHE</u>	76
Introduction:	77
IV.1- Définitions générales	77
IV.1.1- Tension nominale du réseau	77
IV.1.2- Les surtensions	77
IV.1.3- Tension induite	81
IV.1.4- Décharge disruptive	81
IV.1.5- Probabilité de tension de décharge	82
IV.1.6- Tension à P % de décharge disruptive (Up)	82
IV.1.6.1-Tension 50 % de décharge disruptive: U_{50}	82
IV.1.6.2- Tension de tenue statistique à 90 %: U_{90}	82
IV.1.7- Tension statistique à 2 %: U_2	82
IV.1.8- Dispersion conventionnelle Se de la tension de décharge disruptive	83
IV.1.9- Valeur par unité	83
IV.1.10- Distance minimale d'approche	83
IV.1.10.1- Distance électrique: D_u	83
IV.1.10.2- Distance ergonomique: D_e	84
IV.1.11- domaine d'application	84
IV.2- Calcul des distances électriques	84
IV.2.1- Facteurs intervenant dans les calculs	84
IV.2.1.1- Actions sur les surtensions du réseau	84
IV.2.1.2- Surtensions statistiques	84
IV.2.1.3- Tenue de l'intervalle	84

IV.2.1.4- Facteurs de correction	87
IV.2.1.5- Isolateurs	88
IV.2.1.6- Longueur de l'objet flottant	89
IV.2.1.7- Tenue diélectrique de l'air	89
IV.2.2- Calcul de la distance électrique	90
IV.3- Application	91
IV.3.1- Calcul de la distance minimale d'approche	91
IV.3.1.1- Ligne de tension nominale $U = 220\text{kV}$	91
IV.3.1.2- Distances minimales d'approche pour différents niveaux de tension nominale	93
IV.4- Distance minimale d'approche appliquée par Sonelgaz	93
IV.5- Exemple typique de calcul de la distance minimale d'approche	95
Conclusion	97
<u>Chapitre V: RESULTATS ET DISCUSSIONS</u>	98
Introduction	99
V.1- Comparaison entre les résultats analytiques et numériques.	99
V.2- Distribution du champ électrique dans un système corps-plan-paroi	101
V.3- Variation des lignes équipotentiels.	107
V.4- Relation entre champ électrique et distance minimale d'approche.	109
V.5- Influence du rayon de courbure sur la distance minimale d'approche.	109
Conclusion	111
CONCLUSION GENERALE	112
REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES	114

INTRODUCTION GENERALE

Le champ électrique existe autour de tout ouvrage de transport d'énergie électrique, lignes et postes aériens. En haute et très haute tension, il atteint des valeurs tellement importantes qu'il pose des contraintes dans la conception des ouvrages et le tracé des lignes de transport répondant aux exigences actuelles des consommateurs, à savoir: une qualité et une continuité de service sans faille.

A cet effet, les distributeurs d'énergie électrique se sont vus obligés d'effectuer un maximum de travaux d'entretien et de réparation sur les ouvrages tout en étant sous tension [1-3]. D'où l'introduction des travaux sous tension "TST". Cependant, le souci majeur dans ces opérations reste la sécurité du personnel en charge de ces travaux.

Pour plus d'assurance, ces interventions sont confiées à un personnel habilité d'une part et il est exigé le respect de distances minimales d'approche et le respect rigoureux des conditions de travail (usage de procédures rigoureuses et d'outils fiables) définies par les normes [4-12] d'autre part.

Les travaux sous tension ne sont rendus possibles en partie que grâce à l'exploitation des résultats obtenus par l'utilisation de nouvelles techniques expérimentales et numériques ayant permis l'évaluation des tensions de décharge et l'analyse de la distribution du champ électrique.

La compréhension des phénomènes de prédécharge électrique dans l'air a permis de trouver des solutions pour les travaux sous tension. Le dimensionnement des distances minimales d'approche est l'élément essentiel dans toute opération de travail sous tension dont la sécurité du personnel en charge y dépend [13].

Ainsi, dans le présent travail, nous allons étudier et analyser les variations du champ électrique pour différentes configurations géométriques, les plus rencontrées dans les lignes aériennes à haute tension, notamment lors de l'opération de travaux sous tension. Nous procéderons à la détermination des distances minimales d'approche

conformément aux recommandations de la norme C.E.I 61472 [4] et présenterons une illustration de ces travaux sur un cas particulier du réseau Algérien.

Ce travail est constitué de cinq parties :

La première partie est consacrée à une approche descriptive sur le champ électrique, les travaux sous tension et la détermination des tensions de décharge.

La deuxième partie concerne les calculs analytiques du champ électrique.

Dans la troisième partie, nous présenterons une étude relative au calcul numérique du champ électrique.

La quatrième partie sera consacrée à l'étude et le calcul des distances minimales d'approche.

Ce travail sera terminé par une discussion des résultats obtenus et une conclusion générale.

CHAPITRE I

CHAMP ELECTRIQUE ET TRAVAUX SO TENSION " TST "

INTRODUCTION :

Plusieurs méthodes de calcul des champs électriques sont utilisées pour la représentation de l'évolution des perturbations et contraintes des champs électriques au voisinage d'un ouvrage Haute Tension. La plupart des formules donnent des résultats qui se rapprochent, la différence des unes aux autres est due aux consignes des paramètres fixés 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 considérable dans la compréhension des phénomènes de perturbation électrique dans l'air.

Depuis le développement de l'analyse numérique et de l'informatique, de nombreux problèmes ont trouvé des solutions avec une précision plus importante que celle 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 en fonction des besoins de la résolution, ce qui limite parfois fortement la précision des résultats recherchés.

I.1-CHAMP ELECTRIQUE :

I.1.1-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 ce domaine concerné, subit une force dans une direction définie à tout instant. On définit le champ électrique en tout point est une grandeur vectorielle égale à la force agissant sur une charge positive unitaire située en ce point. Deux types de champs électriques sont examinés, les champs électriques alternatifs monophasés et triphasés. L'intensité du champ électrique s'exprime en volts par mètre.

I.1.2-Champs alternatifs monophasés:

Une source de tension alternative monophasée, lorsqu'elle est raccordée à des surfaces limites conductrices (par exemples des électrodes), produit dans le volume concerné un vecteur champ électrique qui oscille suivant un axe déterminé [12]

I.1.3-Champs alternatifs triphasés:

Une source de tension alternative triphasée, lorsqu'elle est raccordée à des surfaces limites conductrices (par exemple des électrodes), produit un vecteur champ électrique qui tourne dans l'espace. Le vecteur tournant décrit une ellipse dont le grand axe représente l'amplitude et la direction de la valeur maximale du champ électrique, et dont le demi petit axe représente l'amplitude et la direction de la valeur minimale du champ électrique, qui se produit à un quart de période plus tard que la valeur maximale. Sur les surfaces limites conductrices, la direction du vecteur tournant devient oscillatoire et sa direction est perpendiculaire à la surface.

I.1.4-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 les installations, on 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 de 100 kV, le champ électrique à une distance de 6 mètres du conducteur central d'une 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 [17].

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

I.1.4.1-Classification :

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

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

I.1.4.2-Importance de l'étude des champs électriques en haute tension

Les champs électriques élevés constituent :

- une contrainte pour le matériel électrique.
- Un danger pour le personnel d'exploitation des postes, des lignes et des installations à haute tension.

Pour les isolations (par exemple : diélectrique des condensateurs) ou les isolations (par exemple : pylônes, isolateurs et parafoudres d'une ligne électrique) les valeurs locales du champ électrique sont déterminantes pour la fiabilité et la durée de vie du matériel considéré et la conception des ouvrages à haute tension en vue de leur fonctionnement sous tension.

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

Ces dernières années, les méthodes numériques qui font appel à l'ordinateur ont permis un progrès sensible dans le calcul des champs électriques et par conséquent un dimensionnement plus précis du matériel électrique.

I.1.5-Champ Electrique Superficiel des conducteurs et dépendances des formes:

D'une façon générale, le champ électrique superficiel se calcule par l'application du théorème de GAUSS. En particulier, les lois de la circulation du champ électrique, la conservation des charges et celles du déplacement électrique.

Loi de la circulation du champ E:

$$\vec{E}(r).d\vec{l} = -dU \quad (1)$$

Avec:

E : champ électrique en [V/m]

U: potentiel en [V]

dl : distance en [m]

D'où par intégration, on obtient l'expression simple exprimant le Champ E uniforme entre deux électrodes parallèles, d'intervalle d, portées à une dif potentiel U (fig.1).

$$E = U/d$$

Avec: U la d.d.p entre électrodes en [V]; d l'intervalle entre électrodes et le champ électrique uniforme entre les électrodes en [V/m]

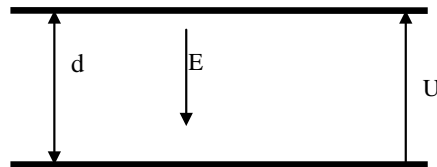


Fig.1 : Champ électrique uniforme entre deux électrodes parallèles

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

$$\vec{D} = \epsilon_0 \epsilon_r \vec{E} \quad (2)$$

Avec: ϵ_0 : permittivité du vide et ϵ_r : permittivité relative de l'isolation

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

$$\oiint_S \vec{D} \cdot d\vec{s} = \iiint_V \delta_{ch} \cdot dv = \sum_V q \quad (3)$$

Où δ_{ch} : densité de charge dans le volume v en $[C/m^3]$

Appliquées aux formes courantes en haute tension, ces lois aboutissent à des formules ci-dessous, nous permettant de calculer le champ électrique superficiel.

Pour l'extérieur d'un conducteur plein de rayon r , de longueur l et de charge q :

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

avec: q en $[C/m]$; r et l 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 :

$$E(r) = \frac{q}{4\pi \cdot \epsilon \cdot r^2} \quad (5)$$

avec: q en $[C/m^3]$

En outre, en appliquant la loi de la circulation du champ le long d'un contour fermé, on obtient pour le conducteur (fig.2):

$$\vec{E}(r) \cdot d\vec{r} = -dU \quad (6)$$

et en remplaçant $E(r)$ par l'expression (4) on aura:

$$dU = -\frac{q/l}{2\pi\epsilon} \cdot \frac{dr}{r} \quad (7)$$

On obtient en intégrant sur l'intervalle borné:

$$U = \frac{q/l}{2\pi\epsilon} \cdot \ln(r) \quad (8)$$

D'après la relation (4), $(q/l)/2\pi\epsilon$ est égale à $E(r) \cdot r$.

D'où, par combinaison, on obtient l'équation (9) qui nous permet de déterminer le champ électrique $E(r)$ créé par un conducteur porté à un potentiel U en un point à une longueur r du centre du conducteur :

$$E(r) = \frac{U}{r \cdot \ln(r)} \quad (9)$$

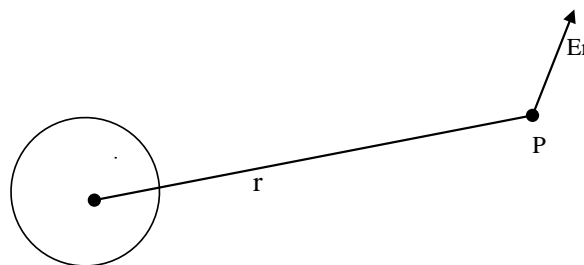


Fig.2 : Champ électrique créé par un conducteur

De même, pour un conducteur coaxial de la figure 3, le champ électrique est déterminé en appliquant l'équation (8): on écrit les relations des potentiels intérieurs et extérieurs U_{ext} comme suit:

$$U_{\text{int}} = \frac{q/l}{2\pi\epsilon} \cdot \ln(r_1) \quad (10)$$

$$U_{\text{ext}} = \frac{q/l}{2\pi\epsilon} \cdot \ln(r_2) \quad (11)$$

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

$$U = \frac{q/l}{2\pi\epsilon} \cdot \ln(r_2 / r_1) \quad (12)$$

et

$$E(r) = \frac{U}{r \cdot \ln(r_2 / r_1)} \quad (13)$$

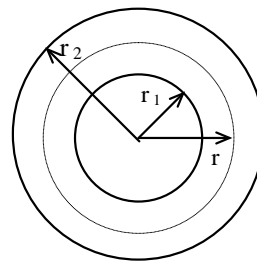


Fig.3: Champ électrique créé par un conducteur coaxial

On remarque dans les formules ci-dessus que, pour une tension fixée électrique E superficiel augmentera d'autant plus que le rayon du conducteur Ceci explique qu'en haute tension, tous les appareils et accessoires ont les rayons possibles (conducteurs en faisceau par exemple) et sont munis d'a

répartition du champ électrique. Des rayons sous dimensionnés provoquent une couronne avec toutes ses conséquences et favorisent le claquage de l'isolation.

En vertu des mêmes lois, le champ E est nul à l'intérieur des conducteurs. Cette propriété permet la construction des cages de Faraday, écran électrique (conductrice pour l'opérateur travaillant au potentiel), réalisation de chambre blindée pour l'atténuation des larges gammes de fréquences et protéger ainsi l'appareil de mesure sensible aux champs électromagnétiques.

En outre, le champ électrique dépend de la matière d'isolation, de la géométrie 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 alternatives ou de chocs positifs ou négatifs.

I.1.6-Champ Electricque entre deux conducteurs aériens:

Soient deux conducteurs cylindriques parallèles séparés par une distance d , de rayon identique r , de charge q^+ et q^- portés à une différence de potentiel U (composée) (fig .4).

Commentaire [m1]:

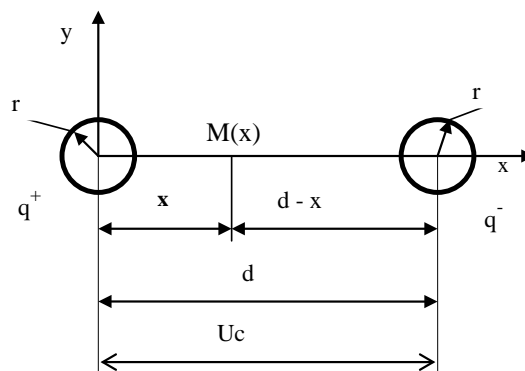


Fig.4 : Champ électrique entre deux conducteurs identiques parallèles

Sur l'axe des abscisses (ox), le champ électrique $E(x)$ en un point $M(x)$ entre deux conducteurs est égal à :

$$E(x) = \frac{1}{2\pi\epsilon} \left[\frac{q}{x} - \frac{q}{d-x} \right] \quad (14)$$

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

$$U_c = \frac{q}{2\pi\epsilon} \left[\int_r^{d-r} \frac{1}{x} dx + \int_r^{d-r} \frac{1}{d-x} dx \right] \quad (15)$$

En intégrant la relation (15), on obtient :

$$U_c = \frac{q}{2\pi\epsilon} \ln\left(\frac{d+r}{r}\right) \quad (16)$$

Et en introduisant la relation (16) dans (14) , il vient :

$$E(x) = \frac{U_c}{\ln\left(\frac{d+r}{r}\right)} \cdot \frac{d-2x}{x(d-x)} \quad (17)$$

Dans le cas des lignes aériennes haute tension où r est très petit devant d , la simplification des calculs, la tension U_c peut être prise égale à :

$$U_c \cong \frac{q}{2\pi\epsilon} \cdot \ln(d/r) \quad (18)$$

d'où on tire :

$$q = \frac{2\pi\epsilon U_c}{\ln(d/r)} \quad (19)$$

L'équation (14) montre bien que le champ maximum E_{\max} sera à la pé-
conducteur, $x = r$ et le champ minimum E_{\min} à l'entre axe, à $x = d/2$.

Pour le champ E_{\max} on peut écrire:

$$E_{\max} = \frac{1}{2\pi\epsilon} \left[\frac{q}{r} - \frac{q}{d-r} \right] \quad (20)$$

et comme r est très petit devant d , on peut simplifier en négligeant $q/(d-$

$$E_{\max} \cong \frac{1}{2\pi\epsilon} \frac{q}{r} \quad (21)$$

En fonction de la tension composée U_c entre conducteurs, on remplace
relation (19) et on obtient:

$$E_{\max} \cong \frac{U_c}{r \cdot \ln(d/r)} \quad (22)$$

Ci-dessus, on a considéré un système biphasé avec une tension
conducteurs. Si on pose $U_c = 2 \cdot V$, où V : tension simple, on peut donc exprimer
rapport à cette dernière:

$$E_{\max} \cong \frac{2 V}{r \ln(d/r)} \quad (23)$$

Cette formule approchée est aussi valable en triphasé. Un calcul analy-
fait au chapitre II pour une ligne triphasée.

I.2-TRAVAUX SOUS TENSION

De nos jours, en raison des exigences du consommateur de l'énergie élé-
qualité et continuité de service d'une part et la baisse des accidents enregist-
travaux sous tension d'autre part, de nombreux travaux s'effectuent sur
électriques en service par des opérateurs qualifiés.

D'après la situation de l'opérateur par rapport aux pièces et conduc-
tension (actifs) et d'après les moyens qu'il emploie pour se prémunir contre

d'électrocution et de court circuit, on distingue trois méthodes de travaux sc utilisées en HT et THT: travail à distance, au potentiel et au potentiel int (fig.5).

Chaque méthode considère que l'opérateur risque d'être soumis à une de potentiel disruptive. Il convient alors de le protéger soit par respect d'ur supplémentaire à la distance électrique, soit à l'aide des outils et matériel agré les risques de contact et d'amorçage avec les pièces conductrices portées à u autre que celui des pièces situées dans son environnement.

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

A cet effet, des zones de travail sont délimitées pour chaque méth distance minimale d'approche notée D_A . Cette dernière est définie comme la sc distance de tension D_u dépendant directement de la tension et d'une distan garde ou ergonomique ayant pour objet de libérer l'opérateur du souci du re: distance de tension.

I.2.1-Methodes de travail sous tension

I.2.1.1-Travail à distance :

L'opérateur est en contact avec la terre et utilise une perche isolante pour faire les travaux (fig.5a). Il doit pouvoir accéder en divers points du pylô maintenant une distance minimale de sécurité entre lui même et les parties sous

Avec cette méthode, on réalise plusieurs opérations telles que :

- Remplacement et rajout d'isolateurs en alignement ;
- Remplacement d'accessoires de chaîne ;
- Remplacement d'isolateurs en ancrage ;
- Remplacement et rajout des dispositifs amortisseurs.

I.2.1.2-Travail au potentiel :

L'opérateur, isolé de la terre, est directement au contact avec les p tension sur lesquelles il intervient et à chaque instant avec les pièces conduc manipule (fig.5b).

L'opérateur se déplace sur une échelle isolante ou une nacelle isolant cas, le port d'un vêtement conducteur (combinaison conductrice) est nécessai protection contre les effets du champ électrique (Effet de la cage de faraday).

Cette technique de travail sous tension ne s'applique qu'aux lignes à tension (THT). Elle est couramment employée pour intervenir sur des pièce (visite de pinces, remplacement de raquettes de garde, pose de bretelles, etc.).

I.2.1.3-Travail au potentiel intermédiaire (potentiel flottant) :

L'opérateur est isolé de la terre et n'est pas directement au contact avec sous tension sur lesquelles il intervient (fig.5c). Il se déplace sur une échell dans une nacelle isolante ou sur une plate -forme isolante; on dit qu'il est flottant.

I.2.1.4-Travail au contact :

Cette méthode est utilisée en basse tension. Le monteur porte des g protèges bras. Il intervient à partir d'un élévateur à nacelle isolante ou d'une p isolante (fig.5d).

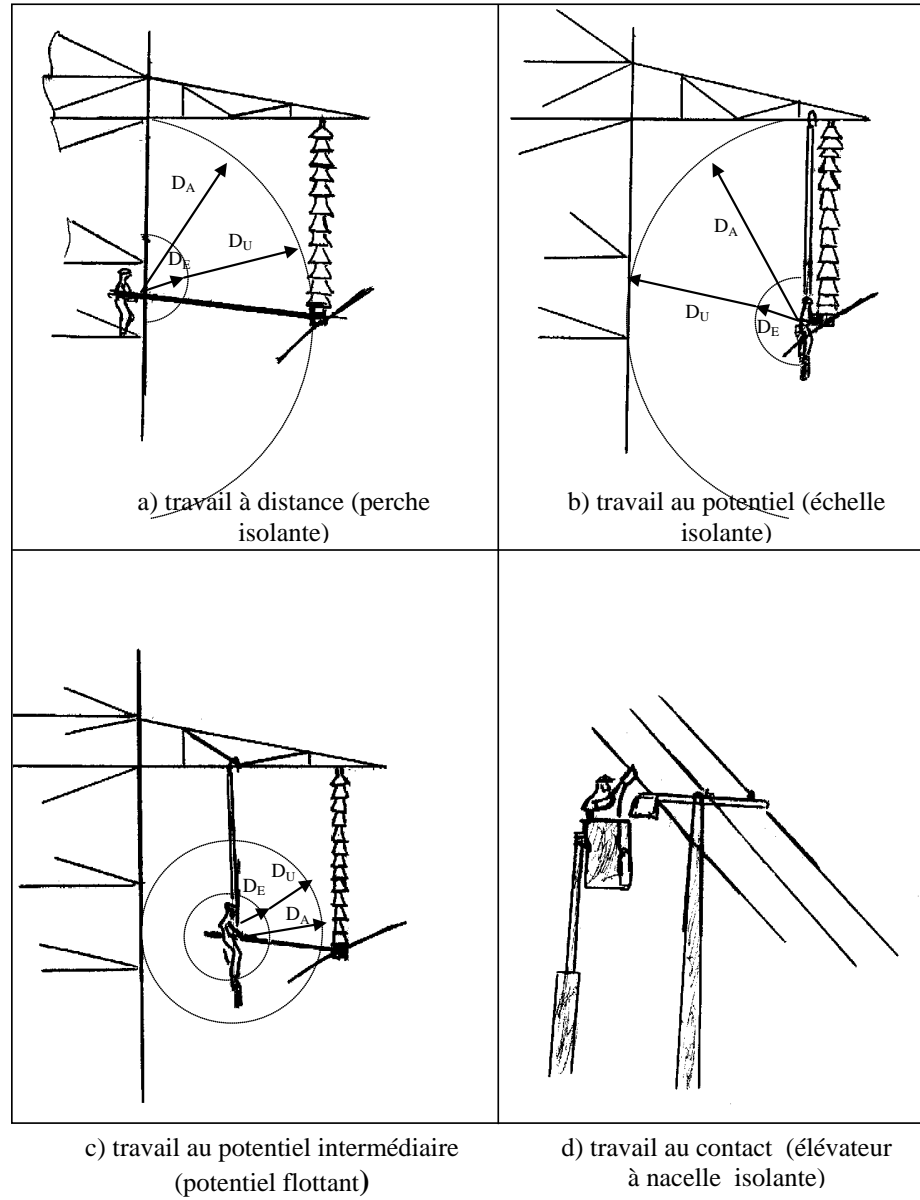


Figure 5 : Différentes méthodes de travaux sous tension.

I.2.2- Calcul des distances minimales d'approche :

Dans ce travail, nous allons présenter la méthodologie suivie pour la détermination des distances minimales d'approche[4, 9, 10, 11]. Ces distances seront ultérieurement comparées à celles adoptées par les équipes de travail de SONELGAZ. L'illustration de ces calculs sera présentée sur un cas pratique relatif aux lignes à haute tension.

Nous allons également présenter une évaluation des tensions de déclenchement de la méthodologie suivie pour la détermination des surtensions statistiques de déclenchement que la pertinence de chaque type de surtension.

I.2.2.1-Distance minimale d'approche (D_a) :

C'est la distance minimale dans l'air qui doit être maintenue entre la plus proche partie du corps du monteur ou tout outil conducteur qu'il manipule, et les lignes à des potentiels différents [4].

La distance minimale d'approche D_A est déterminée par [4, 14]:

$$D_A = D_U + D_E \quad (24)$$

où D_u (distance électrique) est la distance dans l'air qui protège d'un claquage des lignes à haute tension sous tension.

D_E est la distance ergonomique qui tient compte de la maîtrise de l'outil par le monteur. La distance minimale d'approche mise en œuvre au cours des procédures de travail. La valeur de D_E est comprise entre 0,2 m et 1 m.[1,4,5]

I.2.2.2- Méthodologie :

La méthode de calcul de la distance minimale d'approche repose sur les considérations :

- a) – Déterminer la surtension statistique [4] attendue dans l travail (U_2), (valeur de la surtension ayant une probabilité de 2% d'être et à partir de celle-ci déterminer la surtension de tenue statistique l'isolation dans la zone de travail (U_{90}) (valeur à 90% de la tension de te
- b) – Calculer la distance électrique minimale D_U corresponda
- c) – Ajouter une distance supplémentaire pour prendre en c facteurs ergonomiques associés au travail sous tension tels que les m involontaires de l'opérateur.

I.3-Evaluation des tensions de décharge:

La détermination de l'intervalle de tenue diélectrique de l'air est bas résultats d'essais statistiques en utilisant le modèle de Weibull [6-8, 11, 14].

Ce modèle exprime la probabilité de rupture d'un diélectrique d'int soumis à une surtension de crête. La surtension peut être soit, à fréquence i (surtension lente ou permanente), soit en choc de manœuvres ou de foudre.

Pour le lissage des points expérimentaux, on utilise les méthodes des carrés et du maximum de vraisemblance [6,7].

Des essais portés sur des surtensions permanentes, de choc de manoe choc de foudre, il ressort que la valeur de la tension d'amorçage d'un intervalle en fonction de la vitesse de montée du front. La tension de rupture augn la vitesse du front. Pour un choc de manœuvres normalisé 250/2500 μ s, la 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 dé modèle de Weibull où le lissage peut être approché par des polynômes de degré

La probabilité de rupture est donnée par l'expression suivante [11, 14

$$P(X, \alpha) = 1 - \exp\left\{-\left(\frac{X - X_s}{X_0}\right)^\alpha\right\}$$

avec:

X : variable aléatoire (correspond à la tension U d'amorçage)

X_s : paramètre de localisation et apparaît comme un seuil au dessous duquel le phénomène régi par la variable X ne se produit pas (correspond au seuil de la tenue à 100%) ;

X_0 : paramètre d'échelle correspondant à une probabilité de 50% (correspond à la tension U_{50})

α : paramètre de forme

I.3.1-Méthodes expérimentales:

Les essais ont été effectués sur des intervalles d'air échantillons (diélectrique régénératrice). Les expériences consistent à soumettre l'échantillon considéré à une tension alternative, de fréquence industrielle 50 Hz, de vitesse constante de claquage. Pour chaque vitesse de la rampe, l'essai est répété N fois.

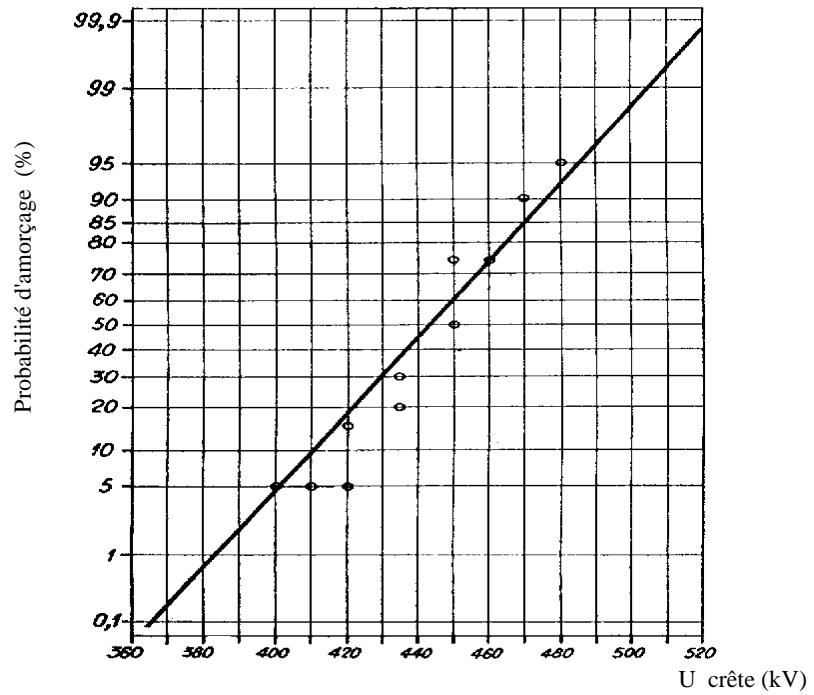
La probabilité de claquage est donnée par la relation:

$$P(i) = \frac{i}{N + 1} \quad (25)$$

où:

N : nombre total de tests;

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



Onde: 145/3700 μ s polarité positive.
 $U_{50} = 443$ kV; σ (kV) = 26 ; σ (%) = 5.9 %

Fig.6 :Probabilité d'amorçage d'un intervalle tige-plan (distance dans l'air: 1 m) en fonction de l'amplitude du choc de manœuvre appliqué.

A partir du tracé de $P_d(U)$ représenté par la figure 6, on peut déterminer les paramètres U_{50} et l'écart type σ caractérisant les propriétés diélectriques d'un intervalle tige-plan. On peut en déduire la probabilité d'amorçage pour toute autre amplitude de même forme d'onde.

L'écart type σ représente la dispersion des tensions d'amorçage. Sa valeur peut être déterminée de la droite (fig .6) 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 %; cette tension "tension de tenue" U_0 de l'intervalle.

Pour un choc de manœuvres en polarité positive (fig.6), l'écart correspondant à la tension d'amorçage est environ 6 %. En polarité négative, c de l'ordre de 13%, mais comme la valeur U_{50} est nettement plus élevée qu' positive [6,7,17], la tension de tenue est elle-même plus élevée, et l'on n'a gé pas à s'en préoccuper.

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

I.3.2- Types de surtension de décharge :

Les tensions de décharges constituent le paramètre principal dans la dét de la distance minimale d'approche qu'un opérateur travaillant sous tension c respecter. Cette distance représente l'isolation externe auto-génératrice (inter qui assure l'isolement et la sécurité sous les contraintes électriques qui sont [17].

Les diverses contraintes liées aux tensions électriques sont:

- La tension à fréquence industrielle, dans les conditions d'exploitation, en régime permanent non perturbé.
- La surtension temporaire à fréquence industrielle (fréquence du fréquence voisine qui survient suite à un déclenchement brusque d'une charge i
- La surtension de manœuvres : transitoire ou onde de choc de manœ
- 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 d 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 front s'il s'agit d'ondes de choc): les isolations supportent très souvent des tensions 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 élevée lorsque le rayon de courbure des électrodes est plus grand.

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

Par ailleurs, il est à signaler qu'il existe certaines contraintes électriques auxquelles aucune isolation économiquement réalisable ne résisterait: c'est le cas des isolateurs dus à la foudre. Compte tenu des distances entre phases et ferrures des poteaux, ils doivent être de quelques mètres, les coups de foudre directs sur les conducteurs 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 (isolateurs génératrice) et on installe des éclateurs ou parafoudres. Aussi, la pose adéquate de garde mis à la terre draine et évacue le coup de foudre. Il est à rappeler que 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.

S'agissant des autres contraintes de tension, les essais de laboratoire ont montré que les protections contre les surtensions de manœuvre assureront une couverture

De ce fait, dans nos travaux on se base sur les contraintes de décharge surtension de manœuvres.

I.3.3-Surtensions de manœuvre:

Les surtensions de manœuvre sont dues suite:

- à la coupure des courants de lignes à vide, de câbles à vide ou de condensateurs;
- à la coupure de faibles courants inductifs ou magnétisants (transfo vide ou chargés par inductances shunts);
- 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 le phénomène disruptif et le réamorçage étant difficilement reproductible en d'essais, le seul moyen d'investigation des surtensions est l'essai et la mesure réseau, à l'aide de camions laboratoire spécialement équipés à cet effet également des compteurs de surtensions qui, placés en de nombreux points d'ont permis d'établir des statistiques de surtensions.

La connaissance des distributions statistiques des surtensions est incluse dans la conception probabiliste de la coordination des isolements: détermination 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 ce qui est dû à la fermeture et à la refermeture des lignes à vide (enclenchement et réenclenchement). L'enclenchement à deux temps avec l'insertion transitoire d'une inductance d'amortissement, ou synchronisation électronique de la fermeture des pôles. Les contraintes de surtension sont alors abaissées.

Les relevés opérés sur les réseaux ont montré que les surtensions lors d'une manœuvre atteignent des valeurs de l'ordre de:

- 3 fois environ la valeur de crête en cas de coupure de circuit ou de réamorçage;
- supérieure à 3 fois la valeur de crête en cas de coupure de circuit ou de réamorçage et sans résistance de décharge.
- supérieure à $3 \div 4$ fois la valeur de crête en cas de coupure de circuit inductif ou magnétisant.
- supérieure à 2 fois la valeur de crête en cas de mise sous tension d'un circuit 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 présente une non linéarité d'une part et une faiblesse de la tenue diélectrique en cas d'impulsions de polarité positive dont les durées coïncident avec celles des surtensions lors d'une manœuvre. Cette faiblesse est liée à la structure fortement divergente du champ électrique E.

Ces études ont dégagés quatre (04) propriétés fondamentales des distances de tenue de l'air, à savoir: [14,17]

1. **La non linéarité:** la distance de tenue n'est pas linéaire.

2. **La dispersion:** A un intervalle "d", on applique une série de chocs de même amplitude U_1 , puis une autre série de U_2 , puis U_3 et ainsi de suite avec une progression constante ΔU . On observe à partir d'un certain niveau de tension une probabilité croissante d'amorçage. La loi de probabilité d'amorçage

est assimilée à une loi de GAUSS-LAPLACE qui, tracée sur papier gaussienne, prend l'allure d'une droite (fig.6).

3. **La durée du front:** la forme de l'onde influe par la raideur sur la formation du leader et son déplacement pour causer enfin l'ionisation. Plus que la pente (du/dt) caractérisant la raideur du front augmente, l'écart de l'électrode peut atteindre des valeurs considérables (plusieurs fois la tension d'amorçage U_{50}) avant que le pontage de l'intervalle n'ait pu se former. 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} .

4. **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 de l'ordre de $1/10$ à $1/6$, les streamers se propagent jusqu'au plan formant un pont conducteur entre les électrodes (claquage).

I.4 – Tensions de tenue

Le facteur essentiel qui détermine l'évolution des décharges dans les intervalles d'air est le champ électrique. Les paramètres géométriques définissent les 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 (fig.7) (choc de surtension à fréquence industrielle ...). Aussi, la tenue à la polarité positive est meilleure qu'en polarité négative, le phénomène de dispersion existe également qu'il s'agisse de déterminer U_{50} et l'écart type σ . Ce dernier est égal à 3 % pour l'onde de choc [11,17].

Pour un choc de foudre de polarité positive, la tension U_{50} d'un intervalle tige-plan est donnée par la relation empirique ci-après[17]:

$$U_{50} = (360 + 150 k) d \quad (26)$$

Avec:

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

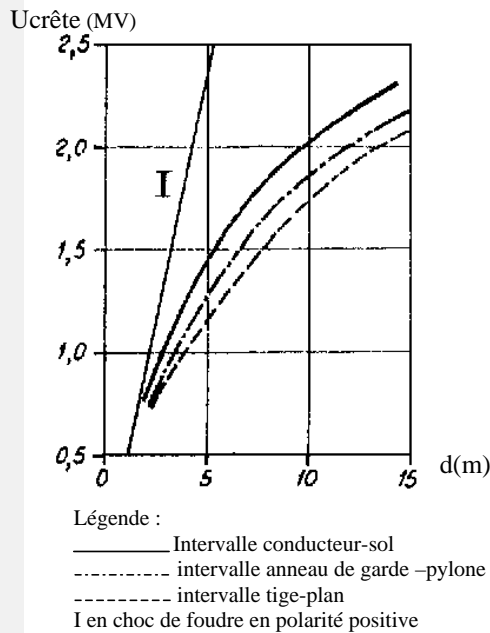


Fig.7 Tension de tenue en choc de manœuvre, pour trois configurations des électrodes.

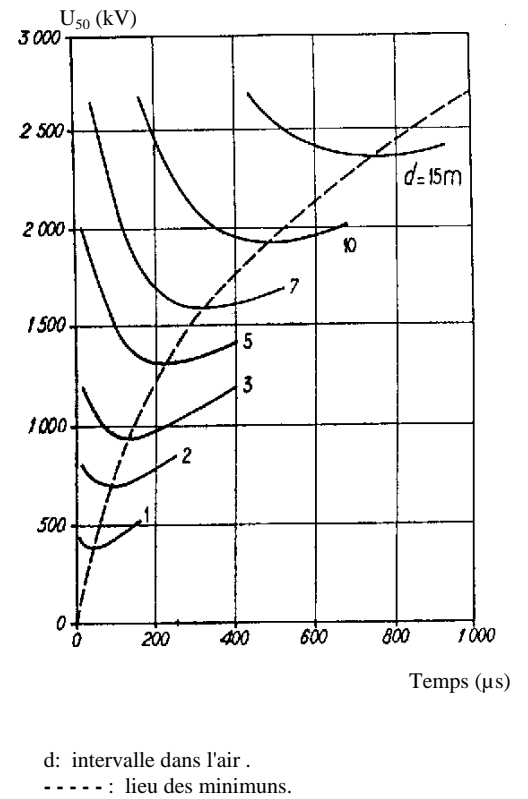


Fig. 8 Minimum des tenues en fonction de la durée du front du choc appliqué en polarité positive -système pointe-plan- selon [17].

La courbe $U_{50} = f(d)$ que l'on obtient à partir de tous les minimums de U_{50} correspondant au front de "montée critique" peut être exprimée analytiquement par la formule suivante, obtenue empiriquement à partir d'essais de simulation de su choc de manœuvre[17].

$$U_{50} = K \frac{3400}{1 + (8/d)} \quad (27)$$

où:

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

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

K : facteur géométrique (tableau 1). ($K=1$ pour le système pointe-plan)

Cette relation empirique est valable pour " d " n'excédant pas 15 m: constitué par une électrode de polarité positive et une cathode à potentiel armature pylône..).

Tableau 1 : Facteur d'intervalle K, relatif à diverses configurations géométriques intervenant dans la construction des lignes.

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: Facteur d'intervalle K à prendre en compte pour le calcul de la tenue diélectrique entre phases.

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

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

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

$$\alpha = \frac{U_1}{U_1 + U_2} \quad (28)$$

Pour les calculs, on choisit du tableau 2 la valeur du facteur k le plus proche de $\alpha = 0.33$ et 0.50 [17]: valeurs donnant des résultats acceptables.

La relation empirique (27) appliquée à différentes configurations géométriques montre que la tension de tenue U_{50} minimale est celle de la configuration (fig.7). D'où la distance d'intervalle "d" relative à la tension d'amorçage U_5 assure largement la tenue des autres configurations.

Aussi, les essais de laboratoire effectués sur la tenue d'intervalle pour différentes ondes de choc ont donné les relations empiriques ci-après permettant de déterminer la tension statistique d'amorçage à U_{50} [11].

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/m³

1. Pour une tension à fréquence industrielle perm temporaire, U_{50} est exprimée par la relation empirique suivante:

$$U_{50RP} = 750\sqrt{2} \ln(1 + 0.55d^{1.2}) \quad (29)$$

avec:

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

2. Pour une surtension à front lent (choc de manœuvre exprimée par la relation empirique suivante:

$$U_{50RP} = 1080 \ln(0.46d + 1) \quad (30)$$

avec:

U_{50RP} en (kV, crête); d en (m) allant jusqu'à 25 mètres

Pour les chocs de manœuvre normalisés, la relation de Paris ci-dessus précise.

$$U_{50RP} = 500d^{0.6} \quad (31)$$

3. Pour une surtension à front rapide (choc de foudre exprimée par la relation empirique suivante:

$$U_{50RP} = 530d \quad (32)$$

avec:

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

La figure 9 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

également que la protection contre les surtensions de manœuvres couvre les a de surtension.

Pour les autres configurations d'électrodes telles que:

- conducteur-armature pylône.
- conducteur-sol.
- conducteur-conducteur;
- l'altitude $H \neq 0$

où

- le milieu est humide (présence de pollution).
- Il y a présence d'un corps étranger dans l'intervalle.

On détermine la tension de tenue U_{50} relative à la situation donnée, pointe- plan en appliquant un facteur de correction global K_t .

$$U_{50} = K_t U_{50RP} \quad (33)$$

avec : $K_t = k_s \cdot k_g \cdot k_a \cdot k_i \cdot k_F$

où:

k_s : facteur prenant en considération la nature statistique de la tension de

k_g : facteur d'intervalle prenant en compte la configuration géomé électrodes.

k_a : facteur atmosphérique tenant compte de l'altitude au dessus du ni mer.

k_i : facteur qui prend en compte l'influence des isolateurs détériorés.

k_F : facteur d'objet à potentiel flottant.

L'estimation de ces facteurs sera donnée au chapitre IV.

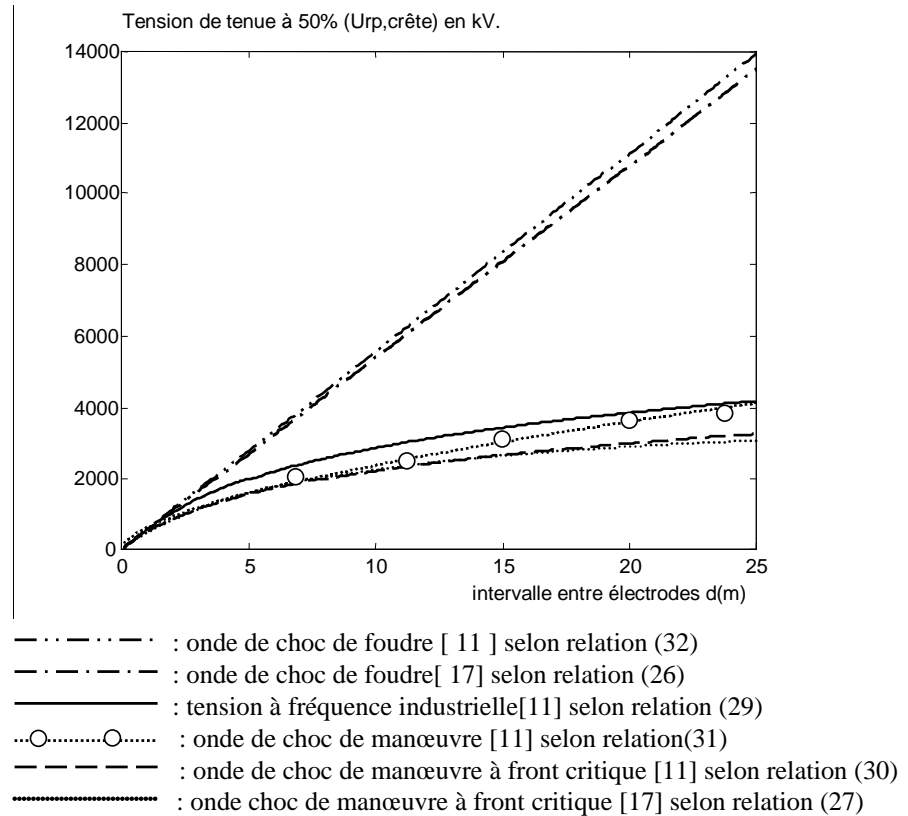


Fig.9 : U_{50RP} en fonction de la distance inter-électrodes d ,
relatives aux différentes relations empiriques.

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 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 donne une tension de tenue significativement plus faible que sous des surtensions à front critique 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 positif de manœuvre de front critique.

CHAPITRE II

CALCUL ANALYTIQUE DU CHAMP ELECTRIQUE

INTRODUCTION:

Pour la plupart des configurations complexes des éléments d'ouvrages à haute tension soumis à une différence de potentiel, il n'existe pas d'expression exacte pour calculer le champ électrique, mais il existe des expressions approchées donnant des résultats significatifs. Pour cela, on adopte plusieurs configurations qui diffèrent entre elles suivant leur géométrie et leur emplacement vis-à-vis d'autres parties constitutives de la ligne. Parmi les configurations qu'on retrouve le plus dans les systèmes à haute tension, la configuration pointe-plan est celle qui suscite le plus d'attention de la part des spécialistes et concepteurs.

II.1 –SYSTEME POINTE- PLAN :

II.1.1 –Expression du champ électrique :

Afin de rendre possible le calcul analytique du champ électrique, le système pointe-plan est dans la majorité des cas assimilé à une configuration hyperboloïde –plan [33]. Nous avons considéré une géométrie pointe–plan (Fig.10) dans laquelle le champ électrique est beaucoup plus important que dans les autres configurations.

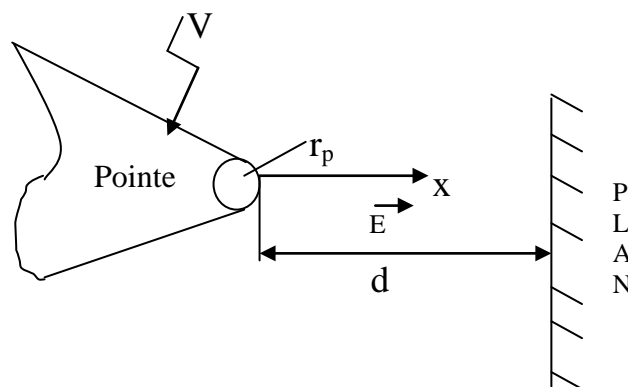


Fig.10 configuration pointe plan assimilée à une partie d'hyperboloïde

Le champ électrique pour une configuration hyperboloïde-plan est donné par l'expression (34) [33-34] :

$$\mathbf{E} = \frac{2V}{\frac{r_p \cdot d + 2 \cdot d \cdot x - x^2}{d}} \cdot \frac{1}{\ln \frac{4 \cdot d}{r_p}} \quad (34)$$

Où :

$E(V/m)$: Champ électrique à la distance x de la pointe

$V(Volt)$: Tension appliquée à la pointe

$r_p(m)$: est le rayon de courbure de la pointe .

$d(m)$: la distance inter - électrodes.

$x(m)$: la position dans l'intervalle inter – électrodes.

Dans notre étude, on s'intéresse aux variations du champ électrique entre la pointe et le plan.

A partir de la relation (34), traitée par l'environnement MATLAB, nous avons étudié l'influence des différents paramètres (tension appliquée, rayon de courbure de la pointe, distance inter-électrodes ...) sur le champ électrique

II.1.2 - Influence des paramètres sur le champ :

II.1.2.1-influence de l'amplitude de la tension :

On trace les variations du champ électrique le long de l'intervalle inter – électrodes pour un rayon de courbure de l'électrode pointe et une distance inter-électrodes donnés , pour différents niveaux de tension V : 60 kV ,150kV et 220 kV ; on prend : $d = 2$ m , $r_p = 0,006$ m. L'électrode pointe est soumise à la tension U alors que le plan est au potentiel zéro volt.

Les figures 11a et 11b montrent les variations du champ électrique entre une électrode pointe et le milieu de l'intervalle inter- électrodes. Sa valeur maximale E_{max} se situe sur la pointe, à $x = 0$; le champ augmente de façon linéaire avec le niveau de tension. Il est très important sur la pointe et diminue rapidement en s'éloignant d'elle.

II.1.2.2- Influence du rayon de courbure de l'électrode pointe :

On calcule le champ électrique pour une tension et une distance inter – électrodes données, pour différents rayons de courbure :

$$r_p = 0,006 \text{ m}, r_p = 0,01 \text{ m} ; r_p = 0,02 \text{ m}.$$

Il apparaît dans le tableau 4 que lorsqu'on augmente le rayon de courbure de la pointe, la valeur maximale du champ électrique diminue d'une manière très sensible .

II.1.2.3-Influence de la distante inter- électrodes :

On calcule le champ électrique pour une tension et un rayon de courbure donnés en fonction de la distance inter- électrode : $d = 1 \text{ m} ; 1.5 \text{ m} ; 2 \text{ m}$

On relève (Tableau 4) que la valeur maximale du champ est également affectée lorsque la distance inter- électrodes est variée de 1 à 2 m. Mais, elle présente une légère diminution. Par contre, l'influence du niveau tension appliquée est assez importante. Le champ électrique varie de manière proportionnelle avec la tension appliquée.

Tableau 4: Variation de l'intensité maximale du champ électrique pour différentes distances inter- électrodes et différents rayons de courbure.

d(m)	r_p (m)	Emax (kV/m)	U (kV)		
			60	150	220
1	0.006	“	3070	7700	11200
	0.01	“	2000	5000	5350
	0.02	“	1350	2830	4210
1.5	0.006	“	2900	7250	10600
	0.01	“	1870	4700	6880
	0.02	“	1010	2630	3850
2	0.006	“	2780	6950	10200
	0.01	“	1790	4488	6600
	0.02	“	1000	2500	3655

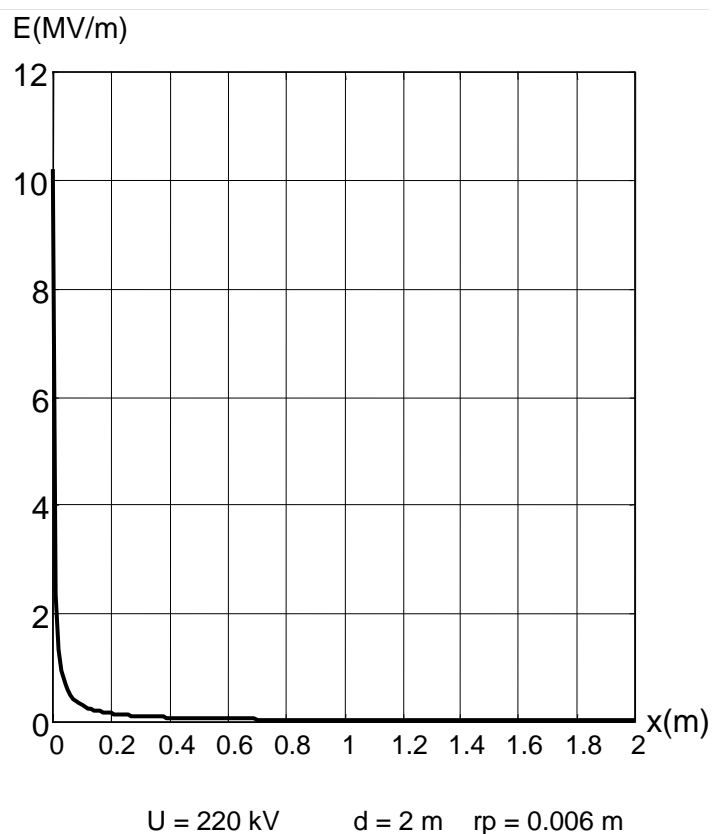
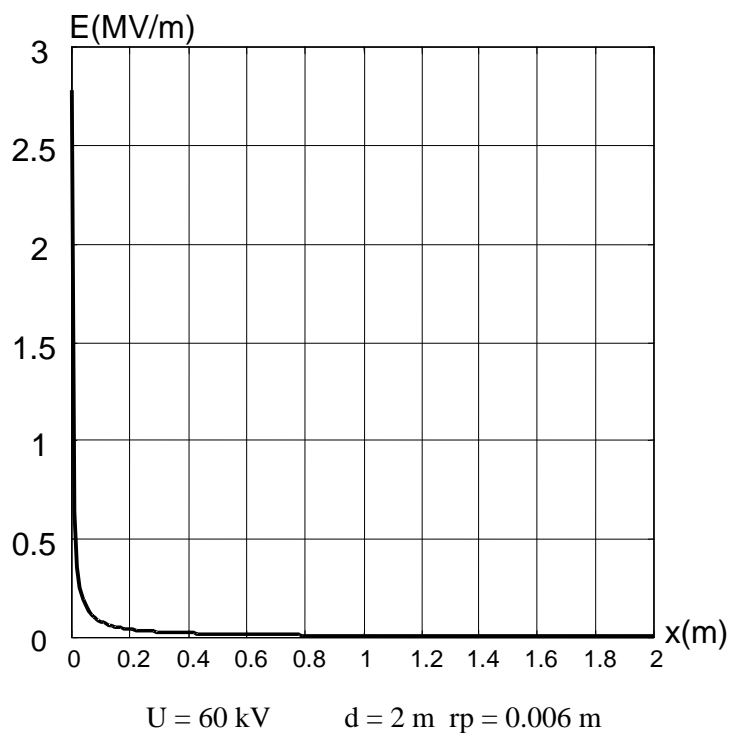


Figure 11a : Influence de l'amplitude de la tension sur le champ électrique E pour une configuration pointe –plan, rayon de courbure $r_s = 6 \text{ mm}$

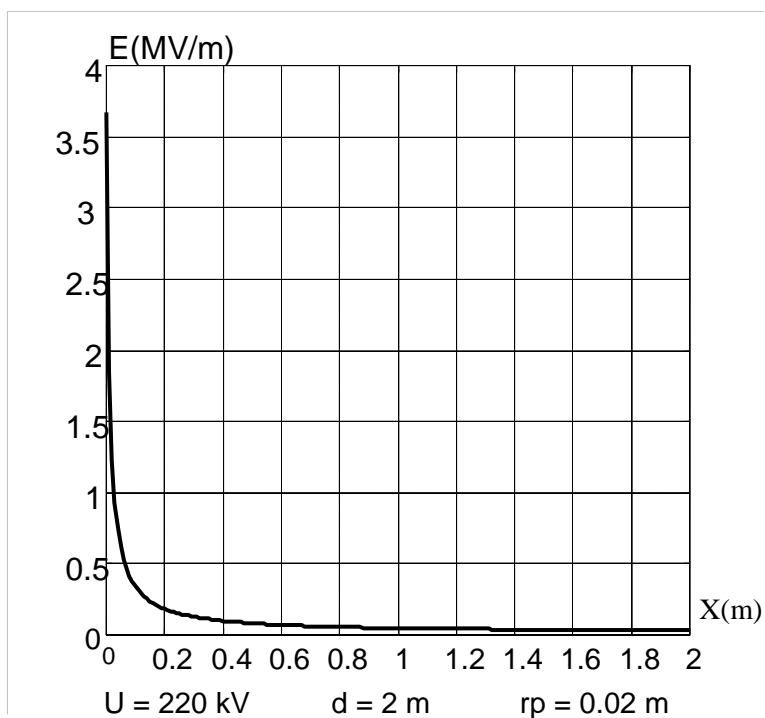
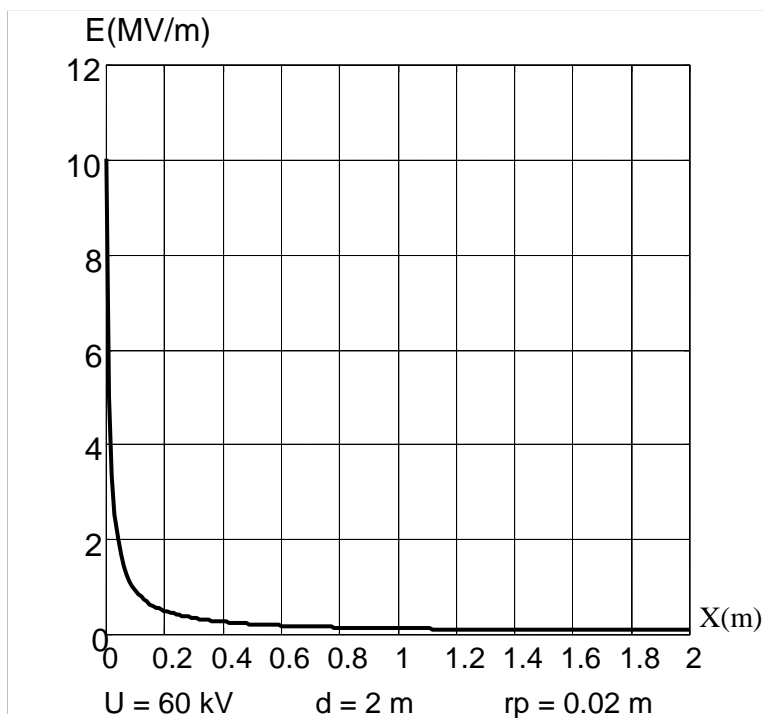


Figure 11b : Influence de l'amplitude de la tension sur le champ électrique E pour une configuration pointe –plan, rayon de courbure $r_p = 20$ mm

II.2-CALCUL DU CHAMP ELECTRIQUE DANS UNE LIGNE

AERIENNE TRIPHASEE:

Afin de mieux apprécier les grandeurs du champ électrique lors de l'introduction d'une personne ou d'un objet dans un environnement d'une ligne haute tension, il est utile de connaître les variations de ce champ autour de la ligne seule.

Dans un repère orthonormé (ox, oy), une charge q_i crée un champ électrique E_i ayant une composante horizontale E_{x_i} sur l'axe (ox) et une composante verticale E_{y_i} sur l'axe (oy).

Par conséquent, plusieurs charges q_i créent :

$$E_x = \sum_{i=1}^n E_{x_i} \quad (35)$$

$$E_y = \sum_{i=1}^n E_{y_i} \quad (36)$$

E_x : composante horizontale globale de n charges (n conducteurs) suivant ox;

E_y : composante verticale globale de n charges (n conducteurs) suivant oy;

Tel que:

$$E = \sqrt{E_x^2 + E_y^2} \quad (37)$$

Pour le calcul, on considère le modèle de la figure 12, ci-dessous:

Où:

q_i^+ = charge du conducteur i;

q_i^- = image de la charge du conducteur i par rapport au sol;

d_i = l'abscisse du conducteur i;

h_i = hauteur du conducteur i

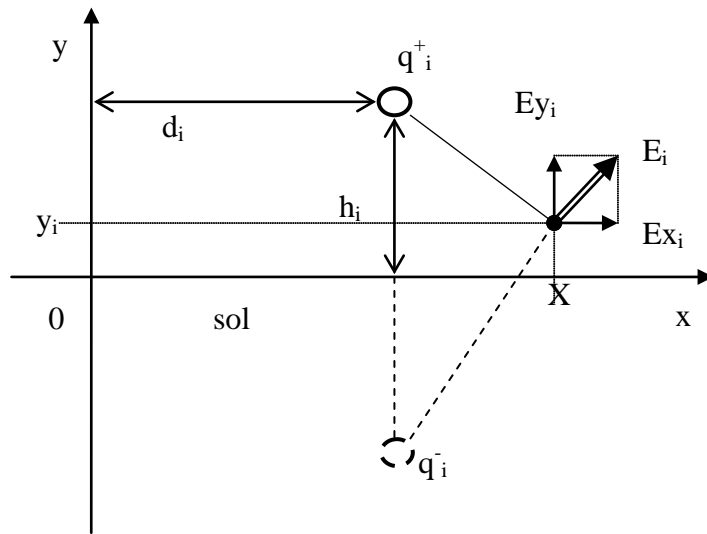


Fig 12 : Modèle de la ligne

La composante horizontale E_{x_i} (V/m) est :

$$E_{x_i} = \frac{|q_i|}{2\pi\epsilon} \left[\frac{(x - d_i)}{(x - d_i)^2 + (h_i - y)^2} - \frac{(x - d_i)}{(x - d_i)^2 + (y + h_i)^2} \right] \quad (38)$$

La composante verticale E_{y_i} (V/m) est :

$$E_{y_i} = \frac{|q_i|}{2\pi\epsilon} \left[\frac{(h_i - y)}{(x - d_i)^2 + (h_i - y)^2} + \frac{(h_i + y)}{(x - d_i)^2 + (y + h_i)^2} \right] \quad (39)$$

Pour déterminer le champ électrique, il y a lieu d'exprimer $q_i = C_i V_i$ et de l'intégrer dans la relation du champ électrique du conducteur (phase) correspondant.

Avec:

C_i (F/m): capacité équivalente correspondant au conducteur i ;

V_i (V): tension simple du conducteur i .

La capacité C_i dépend de la configuration des électrodes :

- cylindrique-plan (conducteur-sol);
- cylindrique-cylindrique (conducteur-conducteur);
- sphérique-sphérique (éclateur);

- pointe-plan

Néanmoins pour les lignes aériennes, on peut adopter soit la formulation (40) ci-dessous pour la simplicité des calculs:[17-18] ou la méthode de calcul matricielle des capacités pour tenir compte de toutes les interférences, relation (43).

$$C_i = \frac{10^{-9}}{18 \ln(d/r)} \quad (40)$$

avec:

C_i = capacité équivalente du conducteur en (F/m);

r = rayon du conducteur en (m);

d = distance entre conducteurs (phase) équidistants en (m).

Dans le cas où la phase est composée de plusieurs conducteurs élémentaires (faisceau) et si les faisceaux ne sont pas équidistants (fig.13), on remplace dans la relation précédente (40):

- r par r_{moy} déterminé par la relation ci-après :

$$r_{\text{moy}} = \left(n \cdot r \cdot R^{n-1} \right)^{1/n} \quad (41)$$

- d par d_{moy} : distance moyenne géométrique calculée par la relation (42):

$$d_{\text{moy}} = \left(\prod_{i=1}^{i=N} d_i \right)^{1/N} \quad (42)$$

où:

n = nombre de conducteurs constituant le faisceau (la phase).

r = rayon d'un conducteur du faisceau en [m].

N : nombre de faisceaux (de phases).

R = rayon du cercle circonscrit du faisceau.

d_i = distance entre faisceaux (phases) en [m]; $i = 1$ à N ($N=3$ en triphasé).

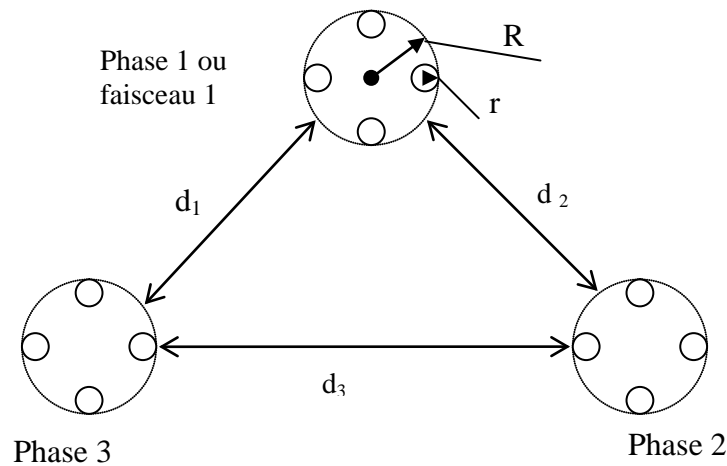


Fig.13 : configuration d'une ligne aérienne triphasée en faisceaux à 4 conducteurs ($n = 4$) et $N = 3$

résultats seraient plus précis en introduisant dans le calcul du champ électrique les interférences mutuelles des conducteurs. Pour cela, on utilise la matrice des capacités linéiques dans les calculs.

Sachant que la matrice des charges s'exprime par:

$$[q] = [C].[V] \quad (43)$$

avec: $[C]$ la matrice des capacités et $[V]$ la matrice uni colonne des tensions des conducteurs.

Cette relation nous permet de calculer les charges portées par chaque conducteur en fonction de leur potentiel respectif.

II.2.1- Détermination de la matrice des capacités:

Pour cela, on détermine la matrice des coefficients de potentiels et par son inversion on déduit celle des capacités.

II.2.1.1- Calculs des coefficients des potentiels: [P_{ij}]

Ces coefficients sont définis comme suit :

$$P_{ij} = \frac{1}{2\pi\epsilon_0} \cdot \ln \frac{D'_{ij}}{D_{ij}} \quad (44)$$

avec $P_{ij} = P_{ji}$

$$P_{ii} = \frac{1}{2\pi\epsilon_0} \cdot \ln \frac{2h_{imoy}}{r_i} \quad (45)$$

$$D_{ij} = \sqrt{d_{ij}^2 + (h_j - h_i)^2} \quad (46)$$

$$D'_{ij} = \sqrt{d_{ij}^2 + (h_j + h_i)^2} \quad (47)$$

où:

d_i, d_j : respectivement l'abscisse des conducteurs (i) et (j)

d_{ij} distance entre le conducteur (i) et le conducteur (j)

h_i, h_j : respectivement la hauteur des conducteurs (i) et (j) par rapport au sol;

h_{imoy} : hauteur du conducteur (i) par rapport au sol pris égale à la hauteur d'accrochage diminuée de 2/3 de la flèche médiane ;

On forme la matrice des coefficients des potentiels soit: [P_{ij}]

$$[P_{ij}] = \begin{bmatrix} P_{11} & P_{12} & P_{1i} & \dots & P_{1n} \\ P_{21} & P_{22} & \dots & \dots & P_{2n} \\ P_{j1} & \dots & P_{ij} & \dots & P_{jn} \\ \vdots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ P_{n1} & \dots & P_{ni} & \dots & P_{nn} \end{bmatrix} \quad (48)$$

II.2.1.2- Calcul des coefficients de la matrice des charges [q] :

Pour un réseau triphasé de succession de phase définie par: 1, a², a, la matrice uni-colonne des tensions de phase s'écrit:

$$[V] = \begin{bmatrix} V1 \\ V2 \\ V3 \end{bmatrix} = V_0 \cdot \begin{bmatrix} 1 + j0 \\ -0.5 + j(1/2)\sqrt{3} \\ -0.5 - j(1/2)\sqrt{3} \end{bmatrix} \quad (49)$$

et donc :

$$[q] = [C].[V] = [P]^{-1}].[V] \quad (50)$$

II.2.2- Distribution du champ électrique dans les lignes aériennes THT

Pour des raisons de symétrie et de simplicité, on considère la ligne THT ayant les données de base proche de la réalité et on trace pour différentes situations (zones) les variations du champ électrique en appliquant la résolution ‘‘ MATLAB’’ aux relations analytiques (35-50).

- Ligne aérienne Un =220 kV en nappe horizontale;
- Conducteur en Almélec de rayon: r = 0.015 m;
- Hauteur par rapport au sol: h = 26 m;
- Intervalle entre conducteurs: d= 4 m ;
- Flèche: f = 8 m

La variation du champ électrique est illustrée par les figures 14, 15, 16 et 17 dont chacune représente une zone particulière où un opérateur peut se trouver lors des travaux sous tension.

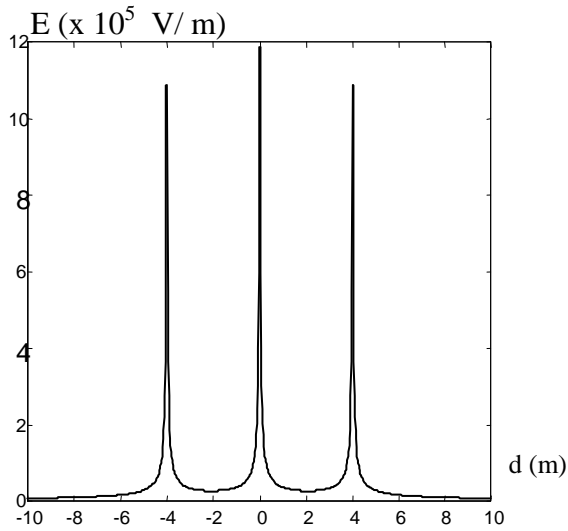


Fig.14 : Variation du champ électrique E au niveau des conducteurs (à 26 m du sol) en faisant un déplacement latéral de 10 m de part et d'autre. Ligne en nappe horizontale, U=220kV ; d=4m.

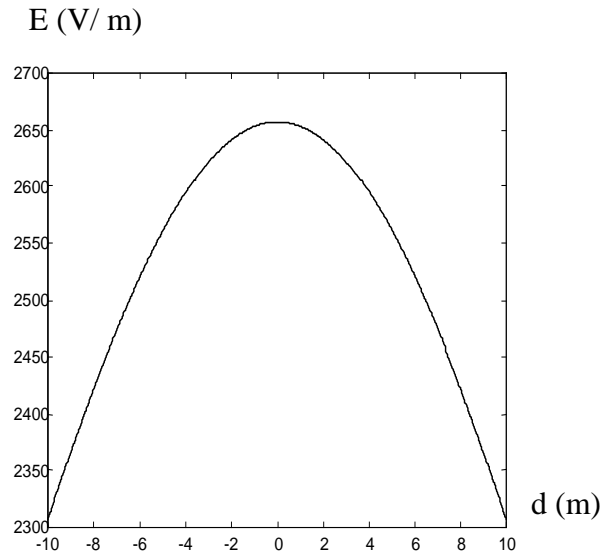


Fig.15 : Variation du champ électrique E à 1,50m du sol en faisant un déplacement latéral de 10 m de part et d'autre. Ligne en nappe horizontale, U=220kV ; d=4m.

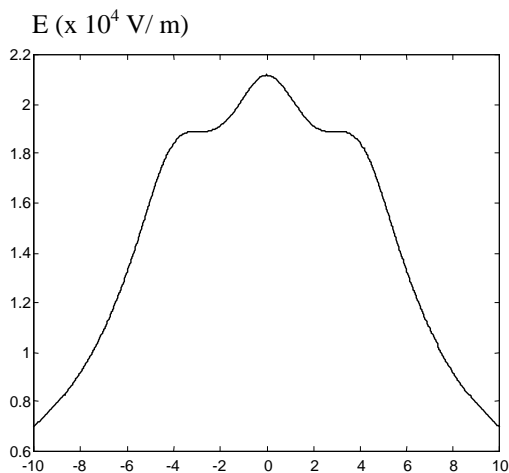


Fig.16 : Variation du champ électrique E à 28m du sol en faisant un déplacement latéral de 10 m de part et d'autre. Ligne en nappe horizontale, U=220kV ; d=4m.

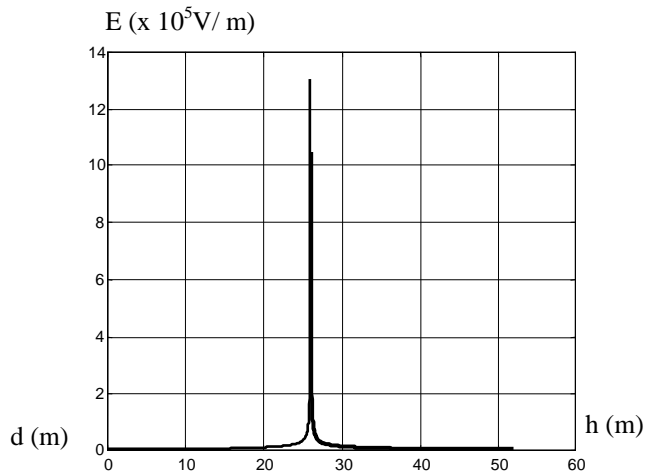


Fig.17 : Variation du champ électrique E en faisant un déplacement du sol vers le conducteur central. Ligne en nappe horizontale, U=220kV ; d=4m.

Aussi, pour la même ligne $U=220\text{kV}$ en nappe horizontale, nous avons étudié l'influence de l'intervalle 'd' entre conducteurs sur la variation du champ électrique E. Elle est représentée par la figure 18.

Pour appréciation, le champ électrique au niveau du conducteur central, est égale à : 2052 kV/m pour un intervalle $d = 0.5\text{m}$; $1372,6\text{ kV/m}$ pour un intervalle $d = 2\text{ m}$ et $1005,5\text{ kV/m}$ pour un intervalle $d=10\text{ m}$. Une relation empirique de la forme : $E = 1702,3 \cdot d^{-0,2631}$ 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 19 montre les variations du champ électrique maximal lorsque le rayon des conducteurs est varié. Une relation empirique de la forme : $E = 111,48 \cdot r^{-0,5747}$ lie le champ électrique E au rayon du conducteur r.

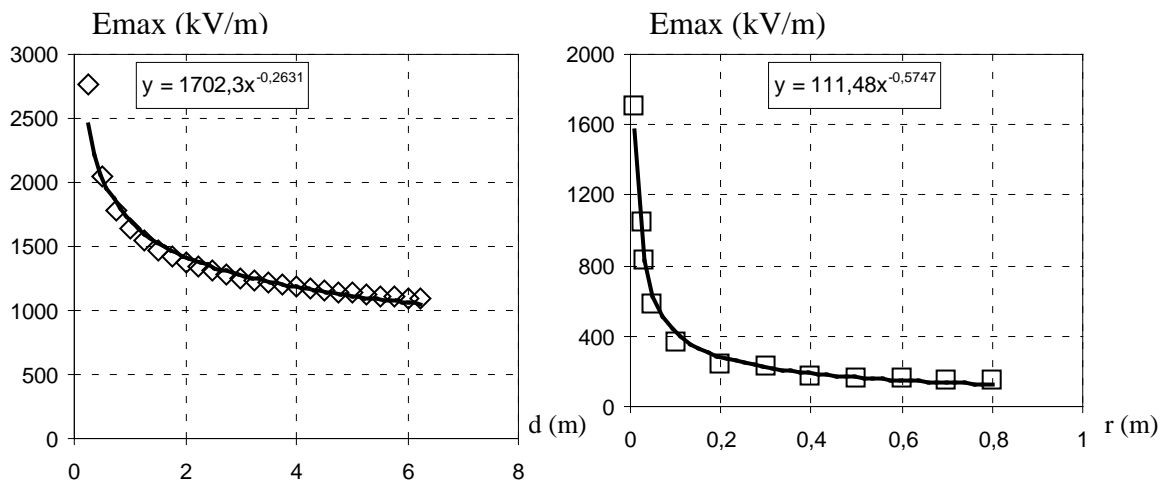


Fig.18 : Variations du champ à 3mm de la surface du conducteur central de rayon 15mm et situé à 26m du sol, en fonction de la distance entre conducteurs. Ligne triphasée de 220kV en nappe horizontale

Fig.19 : 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 : $U_n = 220$ 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 (type chat). 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.

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. Autrement dit, lorsque le rayon du conducteur sous tension augmente, la variation spatiale du champ électrique E diminue et le champ E tend vers un champ de plus en plus uniforme.

Ceci explique qu'en HT et THT tous les appareils ont de grands rayons et sont munis d'anneaux de répartition du champ car les rayons et les intervalles sous dimensionnés provoquent l'effet couronne, avec toutes ses conséquences: bruit, atteinte du champ disruptif et favorisent le claquage de l'intervalle d'air (isolation).

Aussi, on peut relever que la variation du champ E donnée par la figure 19 concordent avec la forme du champ électrique critique (E_{seuil}) prévu par la relation de Peek [18].

II.3- Distribution du champ électrique autour d'un opérateur:

Dans cette hypothèse on assimile un opérateur par un cylindre conducteur porté à un potentiel U celui de la pièce sur laquelle il intervient.

II.3.1-Cylindre posé sur la pointe à proximité d'une paroi :

On se propose de calculer la distribution du champ électrique autour d'un opérateur sur une ligne électrique. Pour cela, l'opérateur est assimilé à un cylindre de rayon $d/2$ et de longueur l (Fig.20) soumis à un potentiel U ; il est situé en dessous d'un plan et faisant face à une paroi. Le plan et la paroi sont tous deux reliés au potentiel de la terre. On adopte une configuration d'un cylindre posé sur la pointe à proximité d'une paroi dans laquelle la capacité électrique est donnée par l'expression (51) [35].

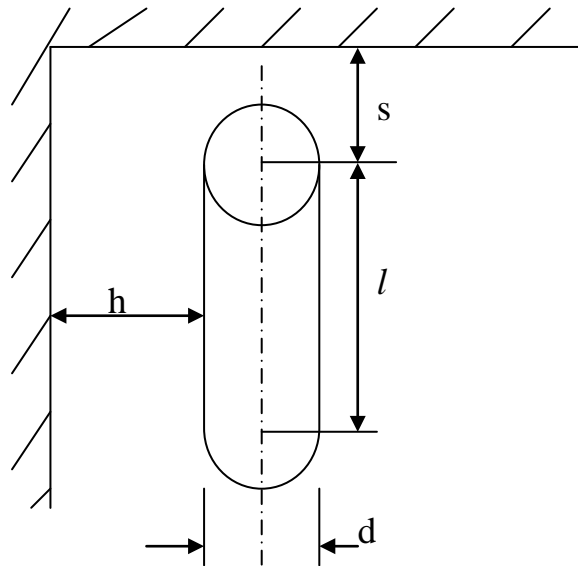


Fig.20 : Cylindre posé sur la pointe à proximité d'une paroi

$$C = \frac{2\pi\epsilon_0\epsilon_r l}{\frac{2l}{d} \sqrt{\sqrt{l^2 - (4h)^2} - 1} \sqrt{\sqrt{l^2 + (4h)^2} + 1} \sqrt{\frac{1 + \sqrt{1 + \left(\frac{4h}{3l + 4s}\right)^2}}{1 + \sqrt{1 + \left(\frac{4h}{l + 4s}\right)^2}}}} \quad (51)$$

Pour simplifier les calculs on pose :

$$C = \frac{2\pi\varepsilon_0\varepsilon_r l}{K_1 - K_2 - K_3} \quad (52)$$

$$\text{Avec : } K_1 = \ln\left(\frac{4h}{d}\right) \quad (53)$$

$$K_2 = \ln \frac{1}{2} \left(1 + \sqrt{\left(\frac{4h}{l}\right)^2 + 1} \right) \quad (54)$$

$$K_3 = \frac{1}{2} \ln \left(\frac{1 + \sqrt{1 + \left(\frac{4h/1}{1 + (4s/1)}\right)^2}}{1 + \sqrt{1 + \left(\frac{4h/1}{3 + (3s/1)}\right)^2}} \right) \quad (55)$$

Pour calculer le champ électrique, on doit passer par le calcul du potentiel électrique. Si Q désigne la charge électrique du cylindre, l'expression du potentiel électrique est :

$$U = Q/C \quad (56)$$

$$\text{d'où : } U = \frac{Q}{2\pi l \varepsilon_0 \varepsilon_r} (K_1 - K_2 - K_3) \quad (57)$$

A partir de cette expression, on calcule celle du champ électrique :

$$\vec{E} = - \text{grad } V \quad (58)$$

Pour ce cas de figure, le champ E contient deux composantes, une suivant le rayon r (E_r), et l'autre suivant l'axe du cylindre (E_z) :

$$\mathbf{E}_r = -\frac{\partial U}{\partial r} \quad \text{avec : } d/2 < r < h ,$$

$$\mathbf{E}_z = -\frac{\partial U}{\partial z} \quad \text{et } 0 < z < s$$

Ce qui nous donne :

$$E_r = \frac{Q}{2\pi l \epsilon_0 \epsilon_r} \left(\frac{\partial K_1}{\partial r} - \frac{\partial K_2}{\partial r} - \frac{\partial K_3}{\partial r} \right) \quad (59)$$

$$E_z = \frac{Q}{2\pi l \epsilon_0 \epsilon_r} \left(\frac{\partial K_1}{\partial z} - \frac{\partial K_2}{\partial z} - \frac{\partial K_3}{\partial z} \right) \quad (60)$$

Pour la simplicité des calculs, on procède par le calcul de chaque dérivée partielle de K_i :

$$\frac{\partial K_1}{\partial r} = \frac{1}{r} \quad (61)$$

$$\frac{\partial K_2}{\partial r} = \frac{2\left(\frac{4}{1}\right)^2 r}{\left(\frac{4r}{1}\right)^2 + 1 + \sqrt{\left(\frac{4r}{1}\right)^2 + 1}} \quad (62)$$

$$\frac{\partial K_3}{\partial r} = \frac{r}{2} \left[\frac{\left(\frac{\frac{4}{1}}{1 + \left(\frac{4s}{1} \right)} \right)^2}{1 + \left(\frac{\frac{4r}{1}}{1 + \left(\frac{4s}{1} \right)} \right)^2 + \sqrt{1 + \left(\frac{\frac{4r}{1}}{1 + \left(\frac{4s}{1} \right)} \right)^2}} - \frac{\left(\frac{\frac{4}{1}}{3 + \left(\frac{3s}{1} \right)} \right)^2}{1 + \left(\frac{\frac{4r}{1}}{3 + \left(\frac{3s}{1} \right)} \right)^2 + \sqrt{1 + \left(\frac{\frac{4r}{1}}{3 + \left(\frac{3s}{1} \right)} \right)^2}} \right]$$

De même pour les dérivées par rapport à z

$$\frac{\partial K_1}{\partial z} = 0$$

$$\frac{\partial K_2}{\partial z} = 0$$

$$\frac{\partial K_3}{\partial z} = \frac{1}{2} \left(\frac{4h}{l} \right)^2 \left[\frac{\frac{1}{\left(3 + \left(\frac{3z}{l}\right)^3\right)}}{1 + \left(\frac{\frac{4h/l}{3 + \left(\frac{3z}{l}\right)^3}\right)^2} + \sqrt{1 + \left(\frac{\frac{4h/l}{3 + \left(\frac{3z}{l}\right)^3}\right)^2}} - \frac{\frac{1}{\left(1 + \left(\frac{4z}{l}\right)^3\right)}}{1 + \left(\frac{\frac{4h/l}{1 + \left(\frac{4z}{l}\right)^3}\right)^2} + \sqrt{1 + \left(\frac{\frac{4h/l}{1 + \left(\frac{4z}{l}\right)^3}\right)^2}} \right]$$

On peut également remplacer la charge électrique Q par son expression :

$$Q = \frac{U}{(K_1 - K_2 - K_3)} 2\pi l \epsilon_0 \epsilon_r \quad (65)$$

dans celle du champ électrique E.

$$E_r = \frac{U}{(K_1 - K_2 - K_3)} \left(\frac{\partial K_1}{\partial r} - \frac{\partial K_2}{\partial r} - \frac{\partial K_3}{\partial r} \right) \quad (66)$$

$$E_z = \frac{U}{(K_1 - K_2 - K_3)} \left(\frac{\partial K_3}{\partial z} \right) \quad (67)$$

Nous avons abouti à une expression du champ électrique pour chaque point (r, z) en fonction de la tension appliquée et les paramètres du système qui sont , l ,s ,h et d. En prenant les valeurs typiques de la tension U (60; 150; 220 et 400 kV), de S (0.5; 1; 1.5 et 2 m) et h (0.5; 1; 1.5 et 2 m), on calcule à chaque fois le champ maximal $E_{r \max}$ et $E_{z \max}$. Les résultats obtenus sont présentés dans le tableau 5

Les figures 21a et 21b montrent les variations dans l'espace des composantes E_r et E_z , lorsque le niveau de tension appliqué est varié.

Tableau 5: Valeurs max du champ électrique en variant s, h et U

Système cylindre–plan–paroi (théorique)

Distances		Champ Electrique E _{max} (kV/m)	Niveau de tension appliquée U (kV)			
h(m)	s(m)		60	150	220	400
1	1	Er max	257	640	949	1704
		Ez max	79.8	200	292	530
	1.5	Er max	244	600	895	1630
		Ez max	74	195	272	495
	2	Er max	239	597	875	1590
		Ez max	72	180	265	480
1.5	1	Er max	150	375	550	1000
		Ez max	55	137	200	365
	1.5	Er max	140	350	520	950
		Ez max	51	158	187	340
	2	Er max	139	348	500	928
		Ez max	59.5	124	18	330
2	1	Er max	125	315	450	840
		Ez max	49.1	123	180	328
	1.5	Er max	11.8	290	440	790
		Ez max	45	114	166	300
	2	Er max	110	270	410	768
		Ez max	47	110	160	290

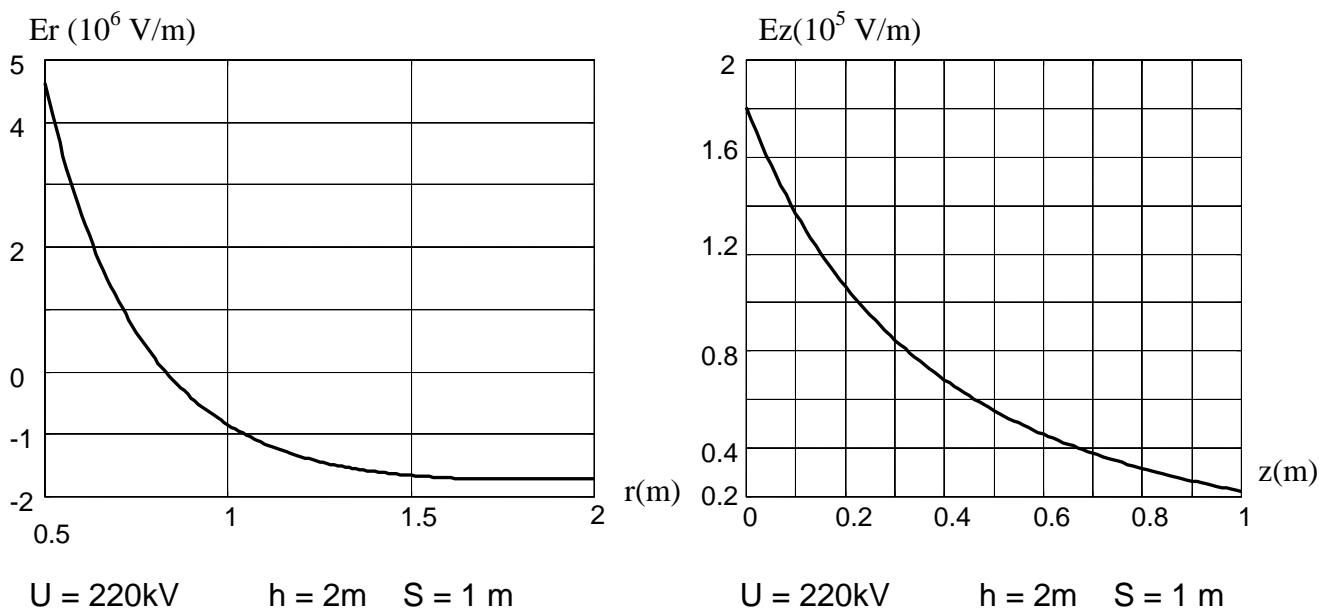
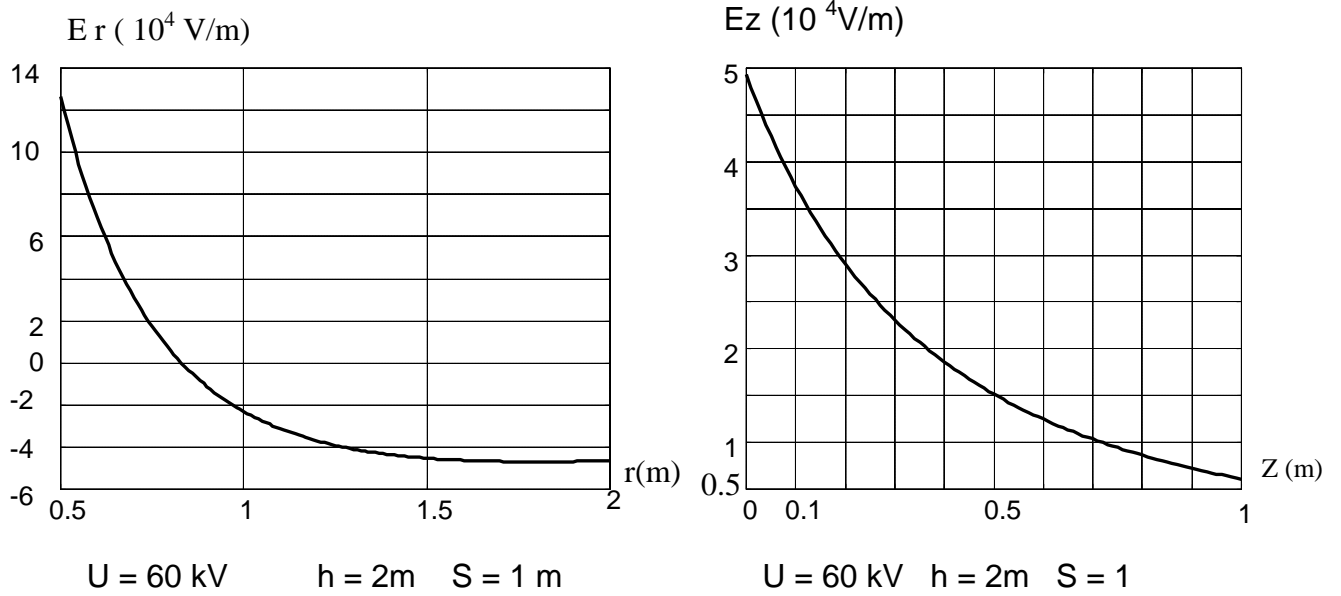
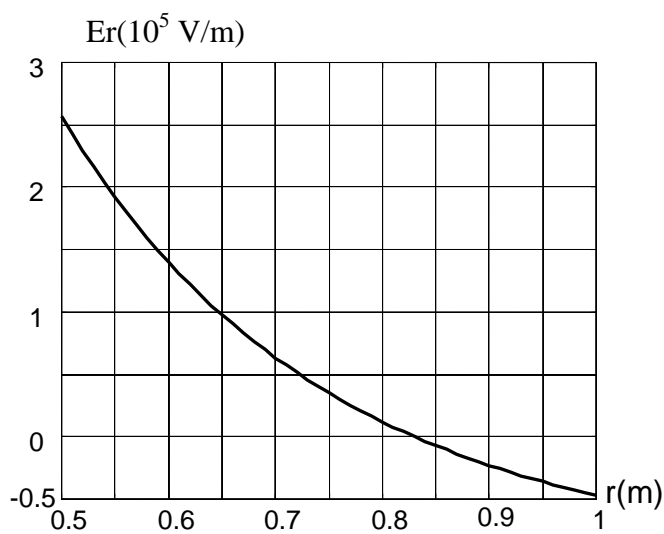
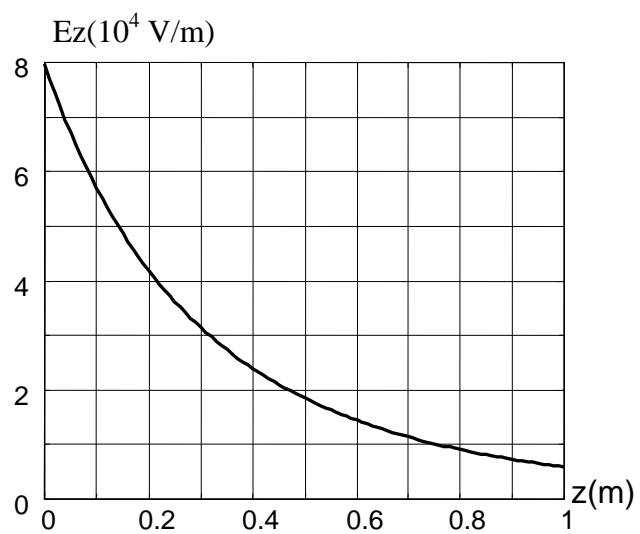


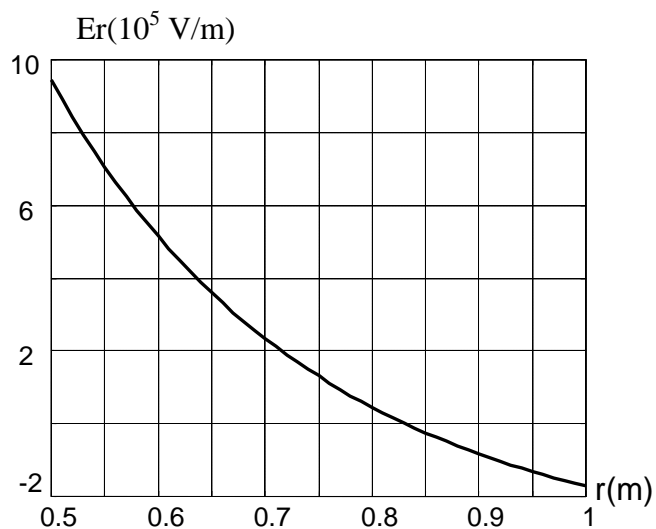
Fig. 21a : Champ électrique en fonction de la distance pour le système cylindre-plan-paroi ($h = 2$ m, $s = 1$ m)



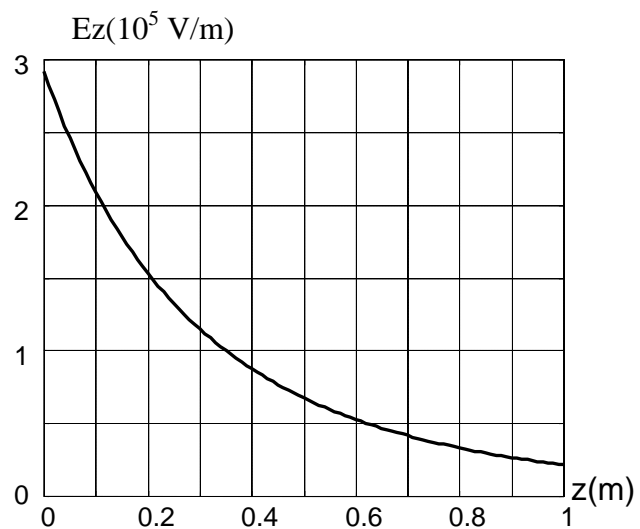
$U = 60$ kV $h = 1$ m $S = 1$ m



$U = 60$ kV $h = 1$ m $S = 1$ m



$U = 220$ kV $h = 1$ m $S = 1$ m



$U = 220$ kV $h = 1$ m $S = 1$ m

Fig. 21b : Champ électrique en fonction de la distance pour le système cylindre-plan-paroi ($h = 1$, $S = 1$)

II.3.2 : Cylindre posé sur la pointe

On a affaire au même cas que précédemment, mais l'opérateur est suffisamment éloigné de la paroi (fig.22), c'est à dire pour $h \gg L$; $h \gg S$, où l'expression de la capacité électrique est donnée par: [35]

$$C = \frac{2\pi\epsilon_0\epsilon_r l}{\ln\left[\left(\frac{2l}{d}\right)\sqrt{\frac{4s+1}{4s+3l}}\right]} \quad (68)$$

C : capacité en (F) et L, s et en (m)

Ce qui nous permet de considérer comme configuration de simulation un cylindre posé sur la pointe faisant face à un plan (Fig. 22).

On tire l'expression de la tension électrique :

$$U = \frac{Q}{C} \Rightarrow U = \frac{Q}{2\pi\epsilon_0\epsilon_r l} \ln\left[\left(\frac{2l}{d}\right)\sqrt{\frac{4s+1}{4s+3l}}\right] \quad (69)$$

De même, on calcule le champ électrique qui est composé d'une seule composante, suivant z :

$$\vec{E} = -\overrightarrow{\text{grad}} V \quad \text{d'où: } E = -\frac{\partial U}{\partial z}$$

Où : $0 < z < s$.

$$E = -\frac{Q}{2\pi\epsilon_0\epsilon_r l} \left(\frac{2}{4z+1} - \frac{2}{4z+l} \right) \quad (70)$$

On remplace l'expression de la charge électrique :

$$Q = \frac{U2\pi\epsilon_0\epsilon_r l}{\ln\left[\left(\frac{2l}{d}\right)\sqrt{\frac{4s+1}{4s+3l}}\right]} \tag{71}$$

Dans le champ électrique E, on trouve :

$$E = \frac{-U}{\ln\left[\left(\frac{2l}{d}\right)\sqrt{\frac{4s+1}{4s+3l}}\right]} \left(\frac{4l}{(4z+1)(4z+3l)} \right) \tag{72}$$

Les valeurs du champ ainsi obtenues sont représentées sur le tableau 6 pour différents niveaux de tension et différentes positions. La figure 23 représente les variations spatiales du champ électrique.

Tableau 6 : champ électrique maximal du système cylindre-plan en variant s et U.

		U (kV)			
		60	150	220	
S(m)	0.5	$E_{max}(kV/m)$	21.9	54.8	80
	1	“	21.1	53	78
	2	“	20.6	52	76

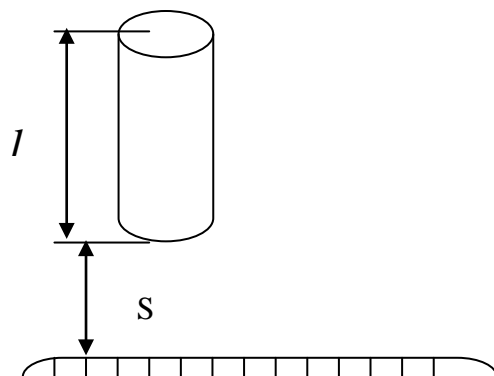


Fig 22. système : cylindre- plan

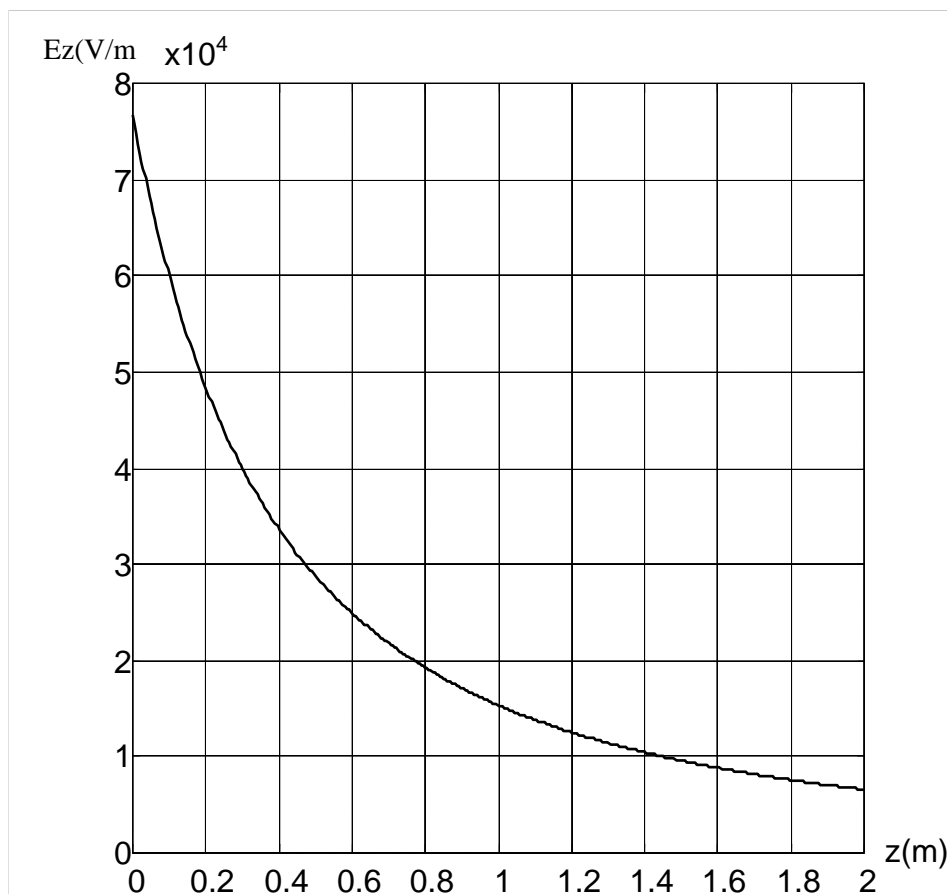


Fig.23: variation du champ électrique en fonction de la distance pour la configuration cylindre plan. $U = 220 \text{ kV}$, $S = 2\text{m}$

CONCLUSION :

Il ressort de cette partie que les paramètres influents sur l'intensité du champ électrique sont les distances inter-électrodes, le rayon de courbure de la pointe acérée de l'élément sous tension, et le niveau de tension. Sa valeur maximale est atteinte sur la périphérie de la courbure de la pointe. On relève que le champ électrique est proportionnel au niveau de tension appliquée. Dans le cas de la configuration cylindre conducteur- plan- paroi, le champ électrique est maximal sur le sommet avec une prédominance de la composante radiale sur la composante axiale. L'effet simultané du plan et de la paroi agit en sorte que le champ électrique garde une valeur relativement importante lorsqu'on s'éloigne du cylindre vers le plan et la paroi. L'existence de la paroi dans le système cylindre- plan- paroi renforce l'intensité du champ électrique comparé au système cylindre- plan.

CHAPITRE III

CALCUL NUMERIQUE DU CHAMP ELECTRIQUE

INTRODUCTION :

Les méthodes numériques, grâce au développement de l'informatique, nous permettent d'analyser avec une précision remarquable la distribution du champ électrique à deux ou à trois dimensions.

Le CSP (Charge Simulating Program) [36] est un logiciel simple fonctionnant sous MS-DOS basé sur la méthode des charges fictives simulant une distribution superficielle des charges électriques sur la surface des électrodes.

Il est utile spécialement dans le calcul direct du champ de différents systèmes électriques en fonction de leur géométrie [37]. Il permet également la visualisation et le tracé des courbes de variation du champ électrique et des lignes équipotentiels.

Dans ce travail, nous présentons une étude sur l'influence des paramètres géométriques sur la distribution du champ électriques dans les systèmes géométriques les plus proches de ceux rencontrés dans les installation aériennes à haute tension. Nous examinerons particulièrement le cas de la distribution du champ électrique autour de formes géométriques simples assimilées à une personne portant un vêtement équipotentiel en contact avec la ligne face aux structures d'un pylône.

III.1- SYSTEME POINTE-PLAN :

Ce type de configuration est présenté dans la figure 24. L'exploitation du CSP pour ce système nous a permis d'obtenir une cartographie du champ électrique ainsi que la détermination des valeurs maximales du champ électrique, en variant le rayon de courbure de la pointe, le niveau de tension et la distance inter- électrodes.

Les résultats du tableau 7 et les figures 25 et 26 montrent que le système pointe-plan représente la configuration d'électrodes permettant d'obtenir des valeurs de

champs les plus élevées sous de modestes valeurs de la tension appliquée. Les paramètres influents sur la valeur du champ électrique sont le rayon de courbure de la pointe, le niveau de tension appliqué et la distance inter- électrodes.

On constate que pour une tension de 220kV et une distance inter électrodes de 1m, le champ électrique à la surface d'une pointe de 20 mm de rayon est de 40 kV/cm ; il passe à 100 kV/cm pour une pointe de 6mm de rayon.

Par ailleurs, avec une tension de 150 kV appliquée à une pointe de 6mm de rayon, le champ électrique maximal passe de 60 à 70 kV/cm lorsque la distance inter électrodes est réduite de 2 à 1 m

En conclusion, la valeur du champ électrique varie de manière proportionnelle avec le niveau de tension appliqué et relativement peu avec la diminution de la distance inter-électrodes.

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. Cette diminution devient plus grande lorsque le rayon de la courbure décroît.
- En s'éloignant de la pointe, le champ devient sensiblement constant.
 - En tout point de l'espace, le champ est proportionnel à la tension.

III.2- SYSTEME CYLINDRE- PLAN- PAROI :

Le cylindre est assimilé à un corps de 50 cm d'épaisseur. Ce modèle est décrit dans la figure 27. Il est le plus proche des configurations que l'on retrouve dans les environs d'un pylône à haute tension. La composante radiale du champ électrique ' E_x ' n'est pas nulle dans ce cas.

Le tableau 8 donne les variations des composantes moyenne 'E', tangentielle 'E_x' et axiale 'E_y' lorsque l'on varie les grandeurs géométriques 's' et 'h' pour différents niveaux de tension. Les valeurs présentées dans ce tableau correspondent aux valeurs maximales sur la surface de l'électrode cylindriques recherchées à l'aide du logiciel numérique CSP.

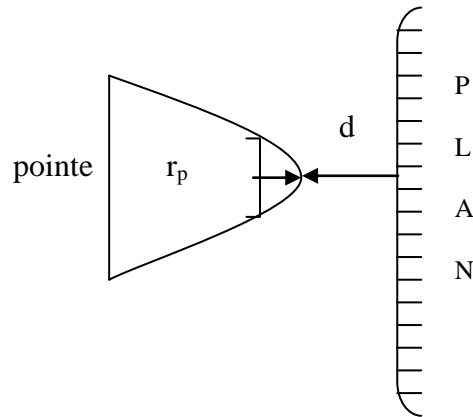


Fig.24 système
pointe- plan

Tableau 7: Champ E_{max} pour le système pointe- plan :

				U (kV)		
	d (m)	r _p (m)	E _{max} (kV/m)	60	150	220
	1	0.006	“	2760	6950	9900
		0.01	“	1650	4320	5100
		0.02	“	1130	2580	3980
	1.5	0.006	“	2610	6030	9700
		0.01	“	1430	3570	6290
		0.02	“	981	2090	3360
	2	0.006	“	2500	5980	9500
		0.01	“	1310	3400	6120
		0.02	“	948	1960	3140

Remarques : les figures suivantes donnent la cartographie du champ électrique (logiciel CSP), les courbes (en orange) représentent les lignes équipotentielles et la surface colorée montre la variation de l'intensité du champ électrique .

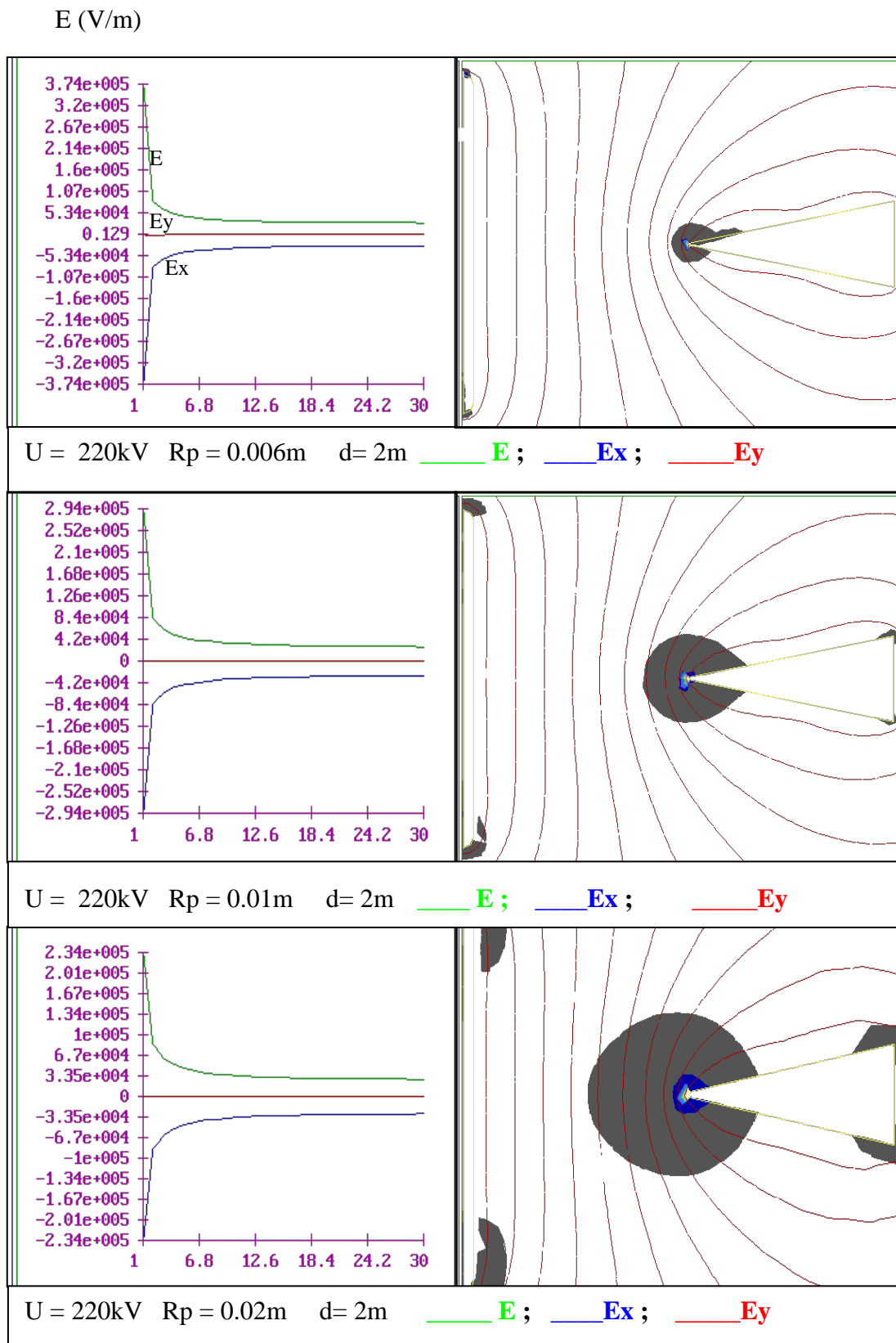


Figure 25: Champ électrique pour le système pointe-plan $U = 220\text{kV}$.

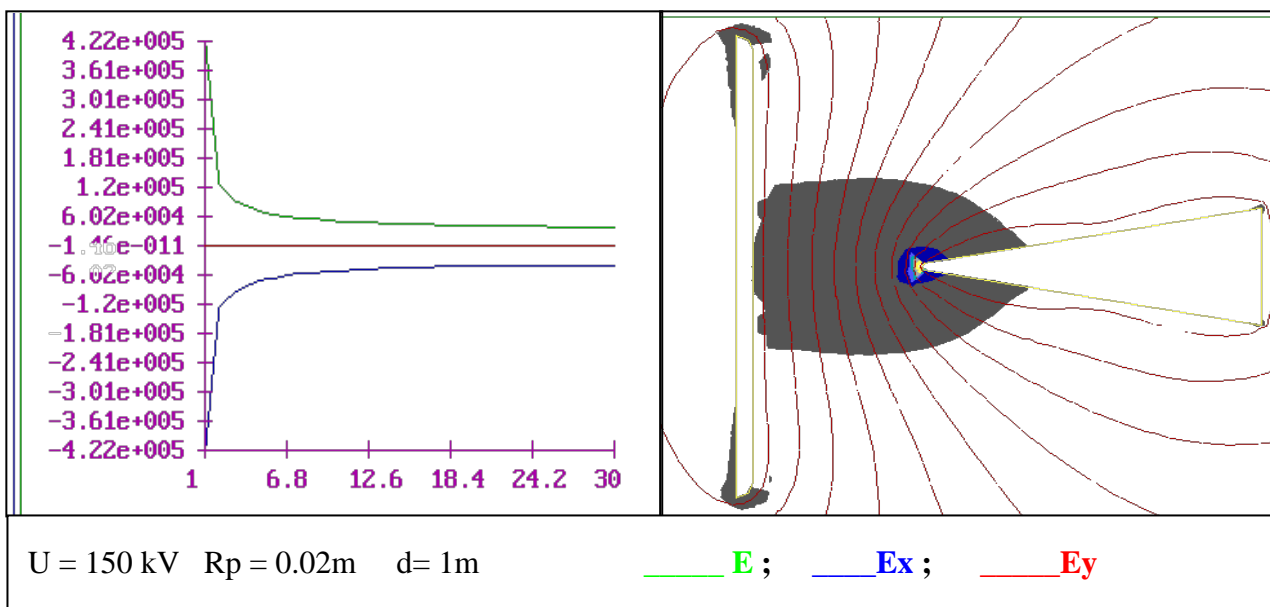
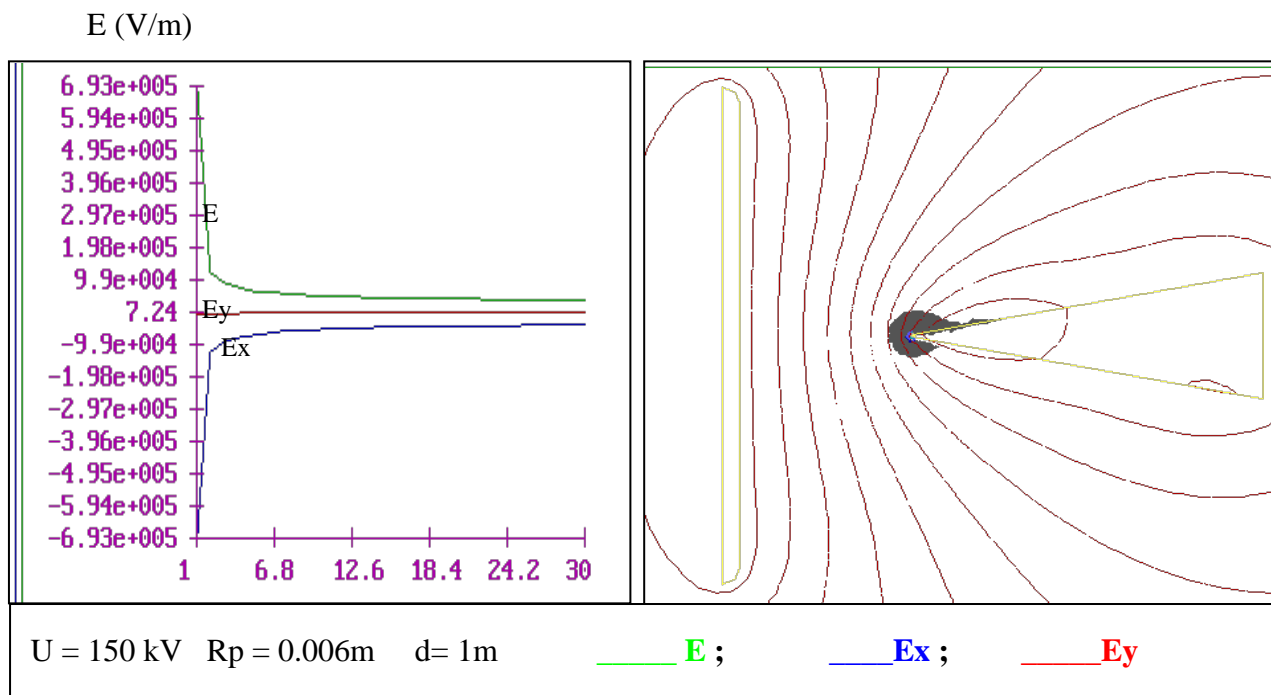


Figure26: champ électrique pour le système pointe plan U = 150 kV

Le tableau 8 montre que l'intensité du champ est proportionnelle à la tension U et inversement proportionnelle aux distances s et h .

Dans ce tableau nous présentons les champs $E_{x \max}$ et $E_{y \max}$ qui se situent sur le sommet du cylindre pour différentes distances « s » et « h » qui le séparent du plan et de la paroi lorsque la tension U est variée.

Les figures 28a et 28b représentent les graphes et les visualisations du champ de quelques cas liés au système cylindre-plan-paroi. Ces figures montrent ainsi l'influence de la paroi sur la distribution spatiale du champ électrique et des lignes équipotentielles (images de droite) ; les graphes de gauche montrent les variations des composantes moyenne 'E', radiale ' E_x ' et axiale ' E_y ' du champ électrique le long de l'axe de l'électrode cylindrique en allant de la pointe vers le plan et vers la paroi.

Ce modèle donne une description de la distribution du champ électrique lié au cylindre et nous a permis de calculer l'intensité maximale du champ pour différentes valeurs de s et de h , lorsqu'on fait varier la tension de 60 à 400 kV.

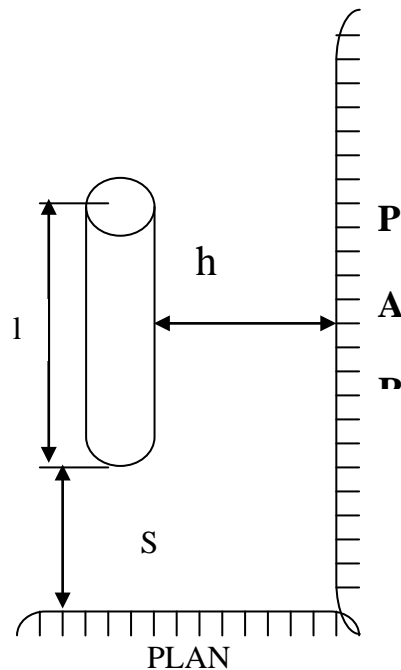


Fig.27 système :
cylindre- plan- paroi

Tableau 8 : Champ max dans le système cylindre – plan – paroi.

Système	h (m)	s (m)	E_{\max} (kV/m)	U (kV)				
				60	150	220	400	
Cylindre – plan paroi	1	1	$E_{x \max}$	245	623	918	1683	
			$E_{y \max}$	80.1	203	218	556	
		1.5	$E_{x \max}$	225	582	855	1581	
			$E_{y \max}$	77.1	200	296	510	
		2	$E_{x \max}$	219	572	849	1574	
			$E_{y \max}$	74.3	198	276	492	
		1.5	1	$E_{x \max}$	121	352	519	984
				$E_{y \max}$	57.9	145	213	389
			1.5	$E_{x \max}$	124	335	512	923
				$E_{y \max}$	525	178	210	350
			2	$E_{x \max}$	122	323	478	905
				$E_{y \max}$	50.9	144	19.9	352
	2	1	$E_{x \max}$	123.1	296	429	834	
			$E_{y \max}$	50.8	141	200	329	
		1.5	$E_{x \max}$	98	276	426	772	
			$E_{y \max}$	47.7	131	185	310	
		2	$E_{x \max}$	99.6	239	396	751	
			$E_{y \max}$	48.6	115	190	300	

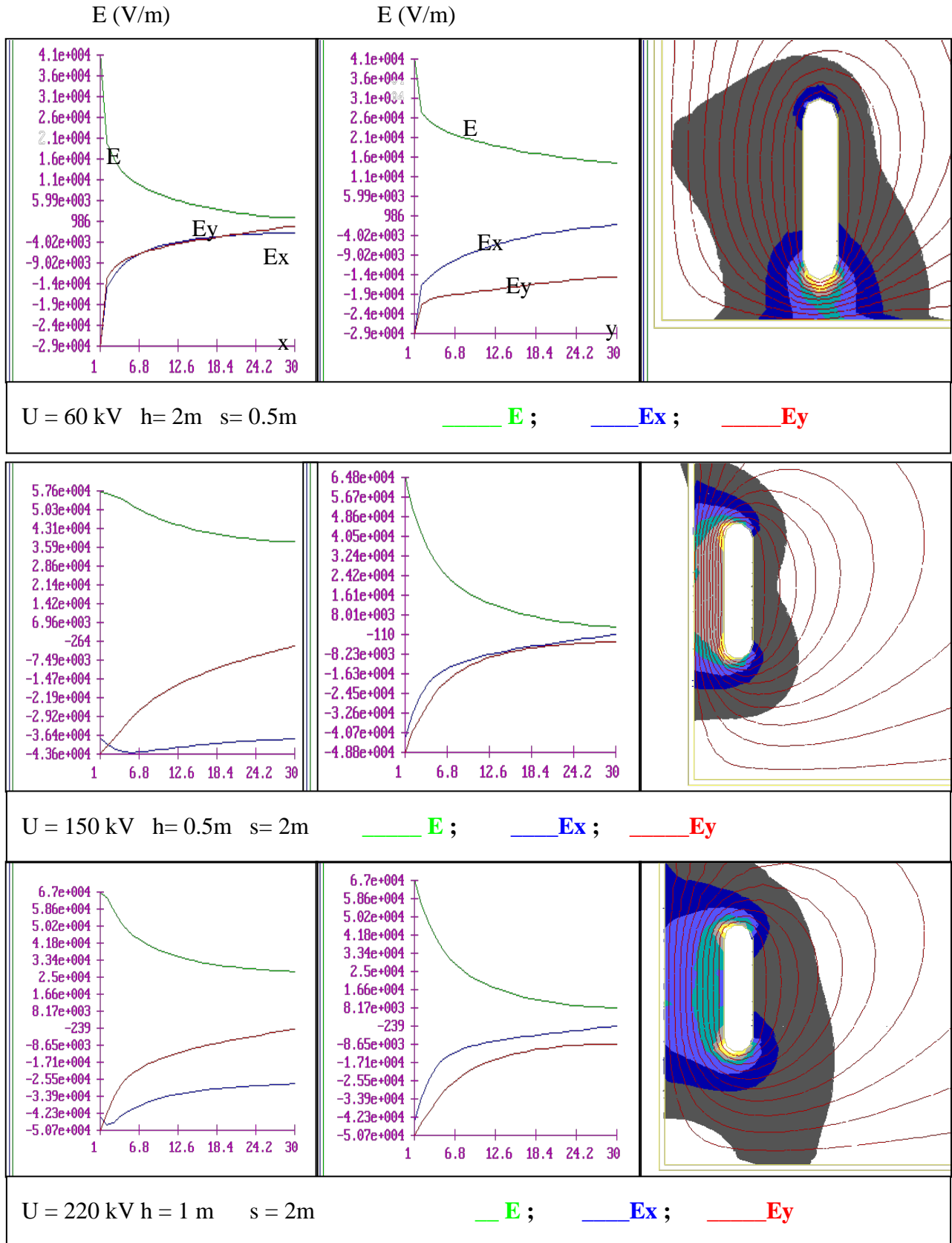


Fig.28a: Champ électrique dans le système cylindre plan paroi

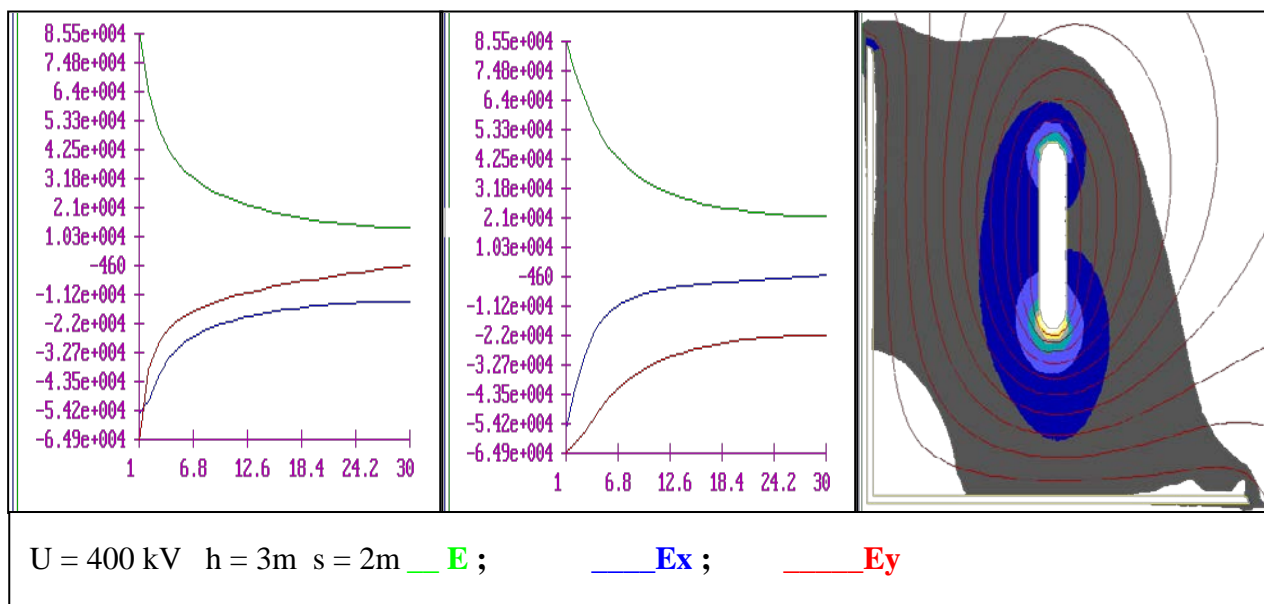
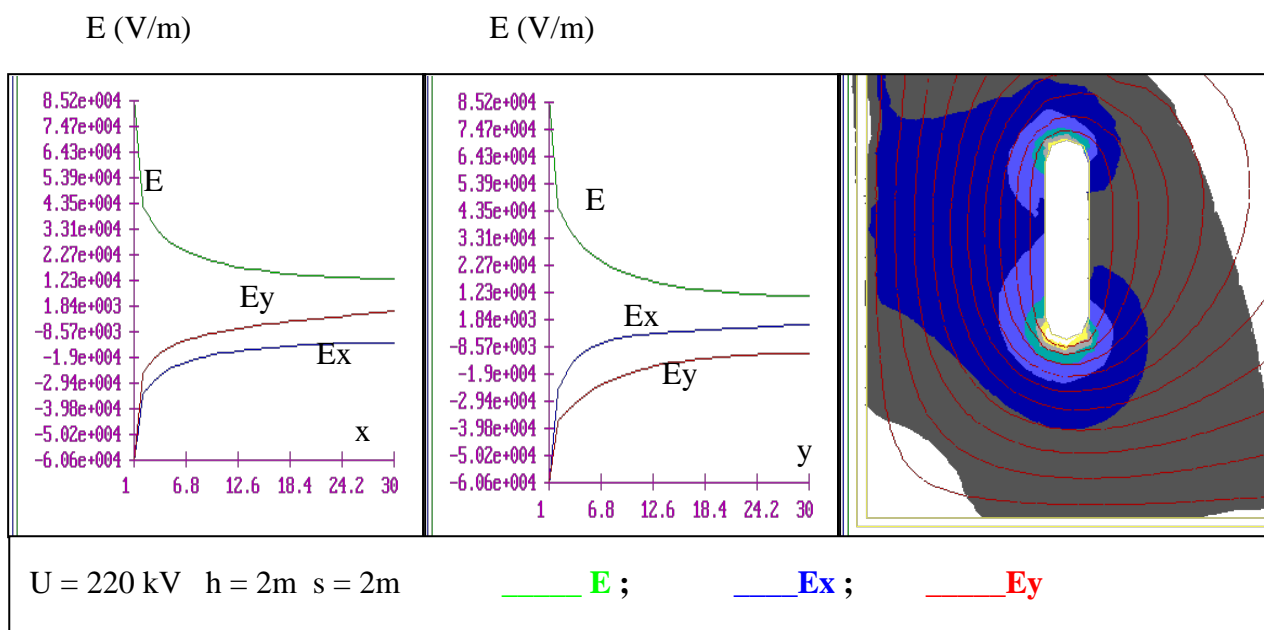


Fig.28b: Champ électrique dans le système cylindre plan paroi

III.3- SYSTEME CYLINDRE PLAN :

Dans les dispositifs à haute tension, la configuration d'électrodes rod-plan est la plus rencontrée [1,4,5]. La figure 29 montre la disposition d'une tel système d'électrodes. Les équipements et les distances de sécurité à respecter dans les ouvrages à haute tension sont dimensionnés à partir de la rigidité d'un système d'électrodes tige plan.

Pour une tige de rayon de courbure donné, le champ électrique régnant dans l'intervalle inter électrodes est fortement dépendant de la distance inter électrodes et de la tension appliquée. Le tableau 9 montre les variations du champ électrique max sur la pointe lorsque la distance 'S' et la tension 'U' sont variées.

Comme cela est également le cas pour le système pointe plan, le champ électrique est très élevé autour de la pointe ; il diminue fortement lorsqu'on s'y éloigne d'une modeste distance. Dans les figures 30a, 30b et 30c, nous présentons une cartographie du champ électrique et des lignes équipotentielles autour de l'électrode sous différents niveaux de tension pour les distances de 0.5, 1 et 2m (images de droite) ainsi que les variations du champ électrique le long de l'axe de l'électrode cylindrique entre la pointe et le plan (graphes de gauche). Dans ce cas, le champ E_x est quasiment nul et E_y est égal au champ moyen ; la valeur négative de E_y est simplement due au sens de l'axe de variation choisi qui va de la pointe vers le plan.

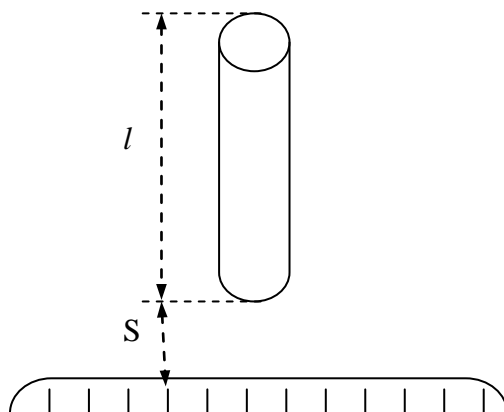
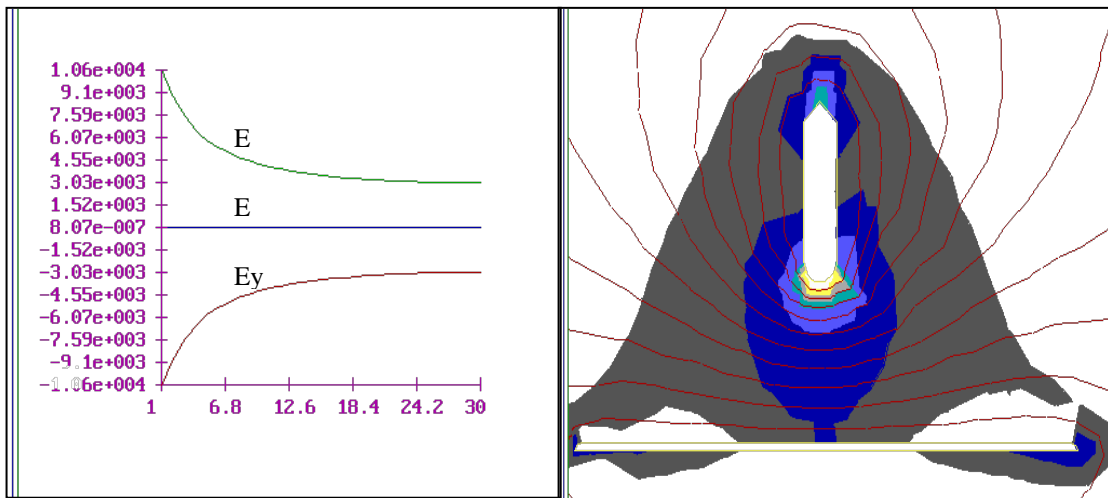


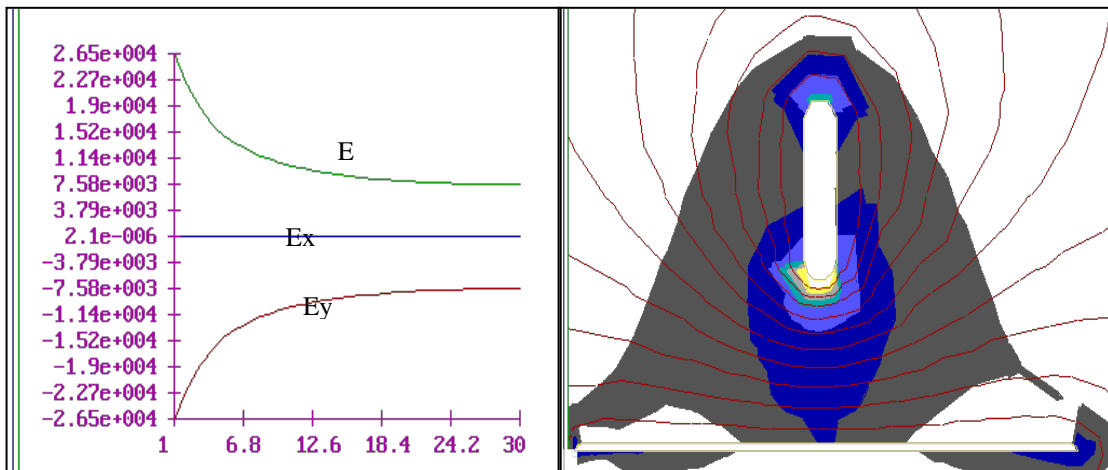
Fig. 29 système : cylindre-plan

Tableau 9 : Champ électrique max dans un système cylindre – plan.

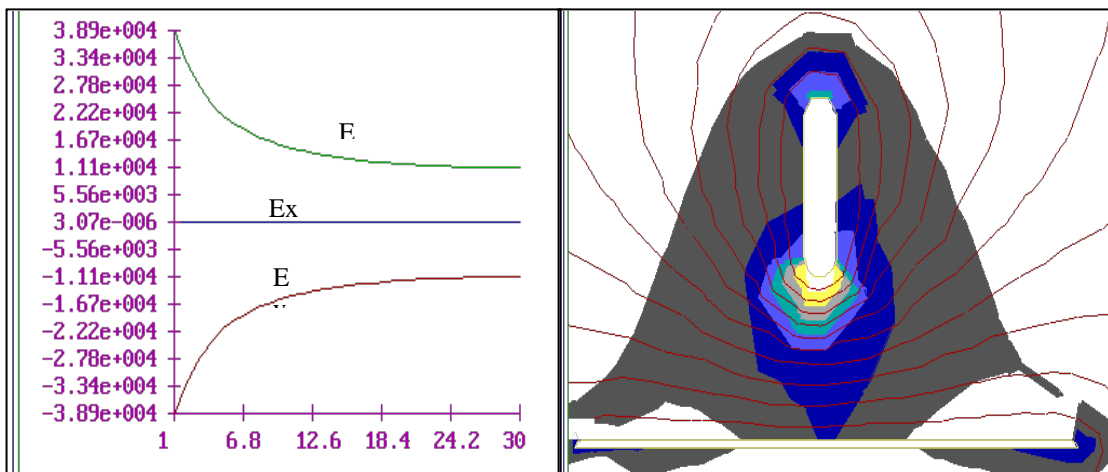
S(m)		U (kV)		
		60	150	220
1	E_{max} (kV/m)	20.1	52.2	78.6
1.5	E_{max} (kV/m)	9.91	51.7	75.3
2	E_{max} (kV/m)	9.7	49	71.1



U = 60 kV d = 2m — E ; — Ex ; — Ey



U = 150 kV d = 2m — E ; — Ex ; — Ey



U = 220 kV d = 2m — E ; — Ex ; — Ey

Fig.30a: Champ électrique dans le système cylindre plan d= 2m

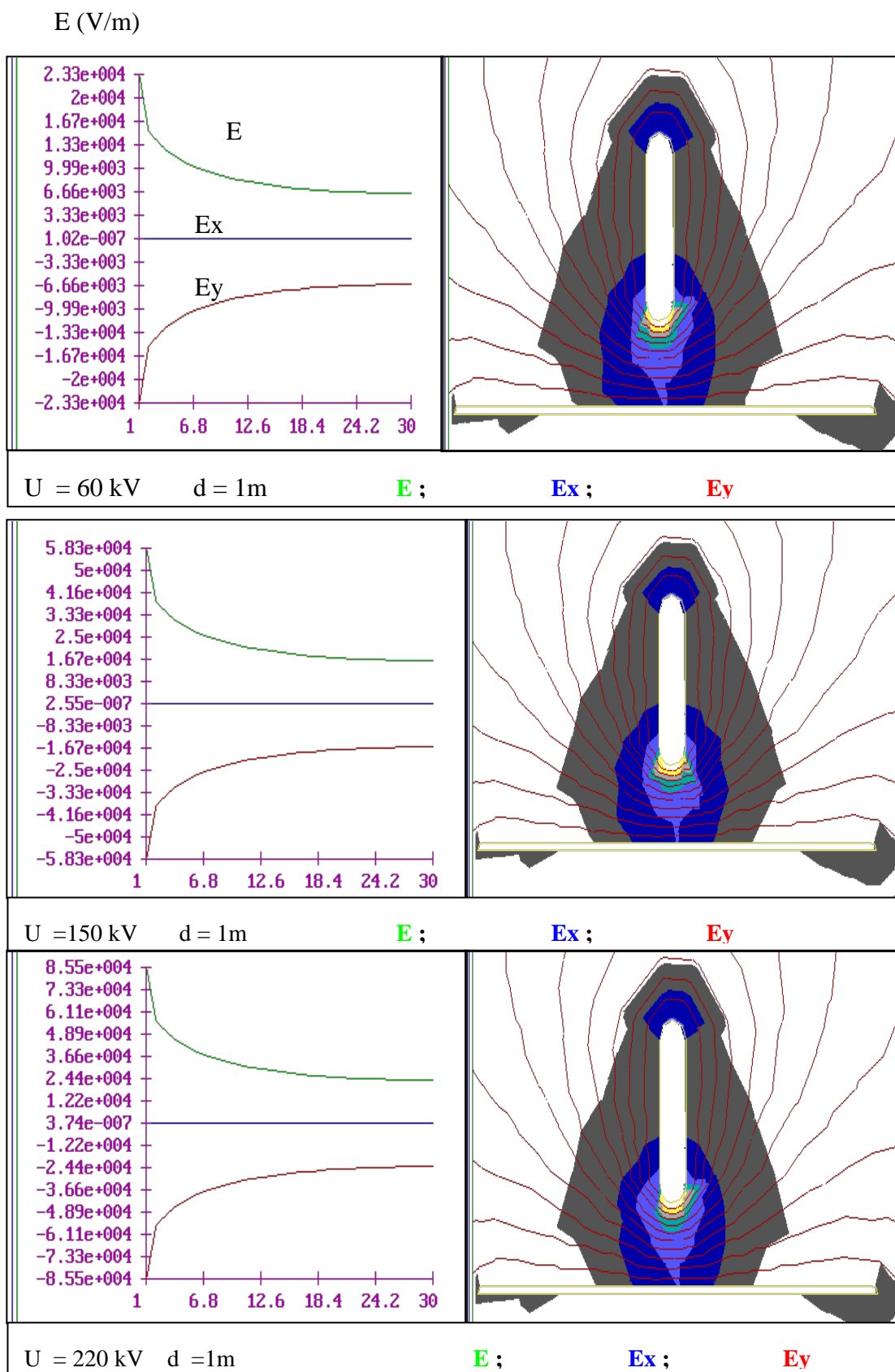
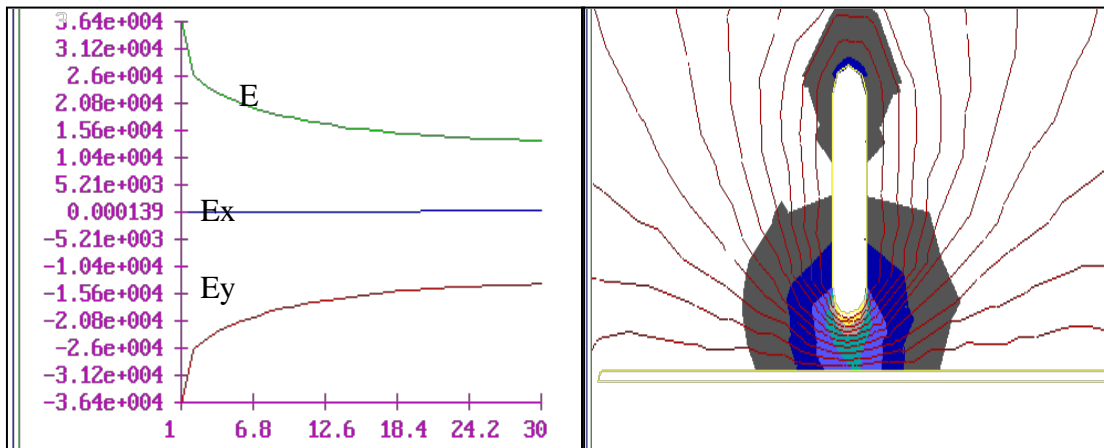
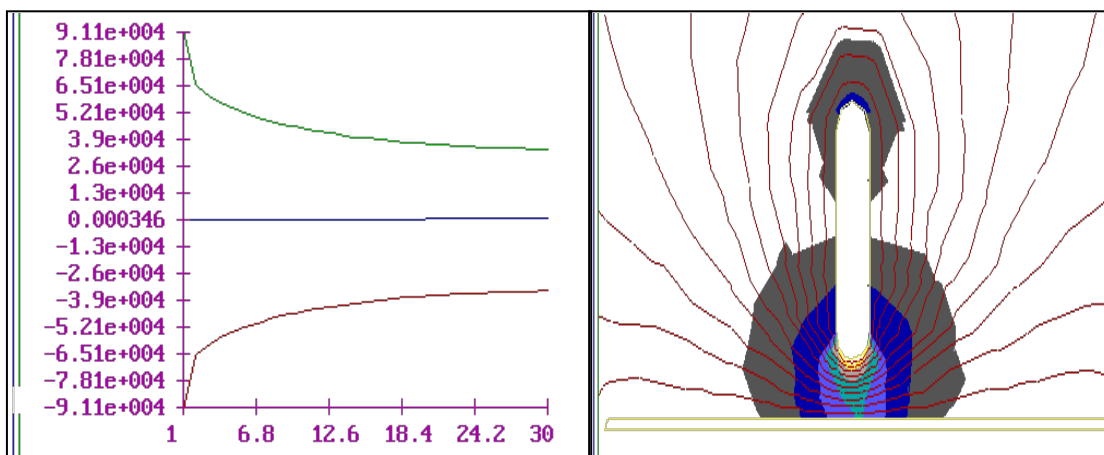


Fig.30b: Champ électrique de la configuration cylindre plan pour $d = 1\text{ m}$

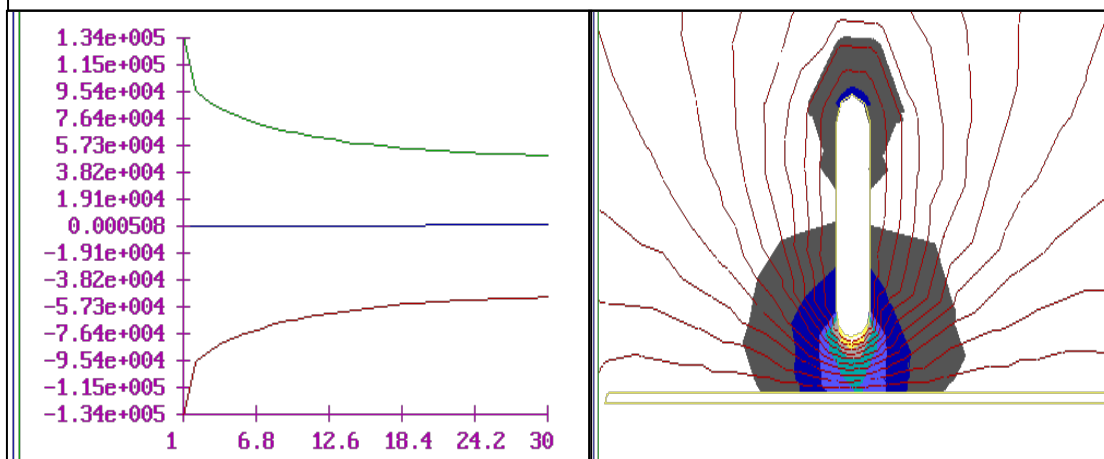
E (V/m)



U = 60 kV d = 0.5 m — E ; — E_x ; — E_y



U = 150 kV d = 0.5m — E ; — E_x ; — E_y



U = 220 kV d = 0.5m — E ; — E_x ; — E_y

Fig.30c : Champ électrique de la configuration cylindre plan pour d = 0.5m

III.4- SYSTEME DE DOUBLE CYLINDRE EN FORME DE T PLAN-PAROI :

Ce modèle est constitué de deux cylindres en forme de T, comme indiqué dans la figure 31 ci dessous. On calcule le champ électrique pour différents niveaux de tension, de la distance "S" et la distance "h" (fig.32a et 32b). Les valeurs maximales de l'intensité du champ sont notées dans le tableau 10.

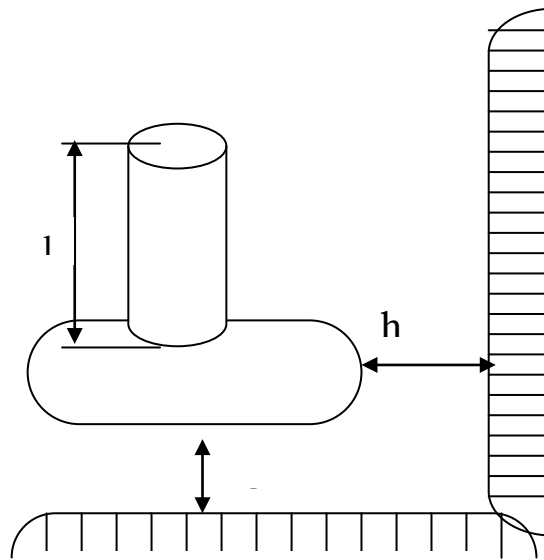


Fig.31: système double cylindre-plan- paroi

Tableau 10 : champ électrique maximal pour le système double cylindre- plan- paroi.

		U (kV)		
E _{max.} (kV/m)	Intervall	60	150	220
	h= 0.1; s =1.5	43.1	96.8	142
		45	89.2	131
	h= 0.5; s =1.5	21.2	53	77.8
		19.4	48.1	71.3
	h =1; s =1.5	15.5	39.8	58.4
		14.5	36.3	53.2
	h =1; s=1	17	42.5	66.4
		15.4	38.6	56.6

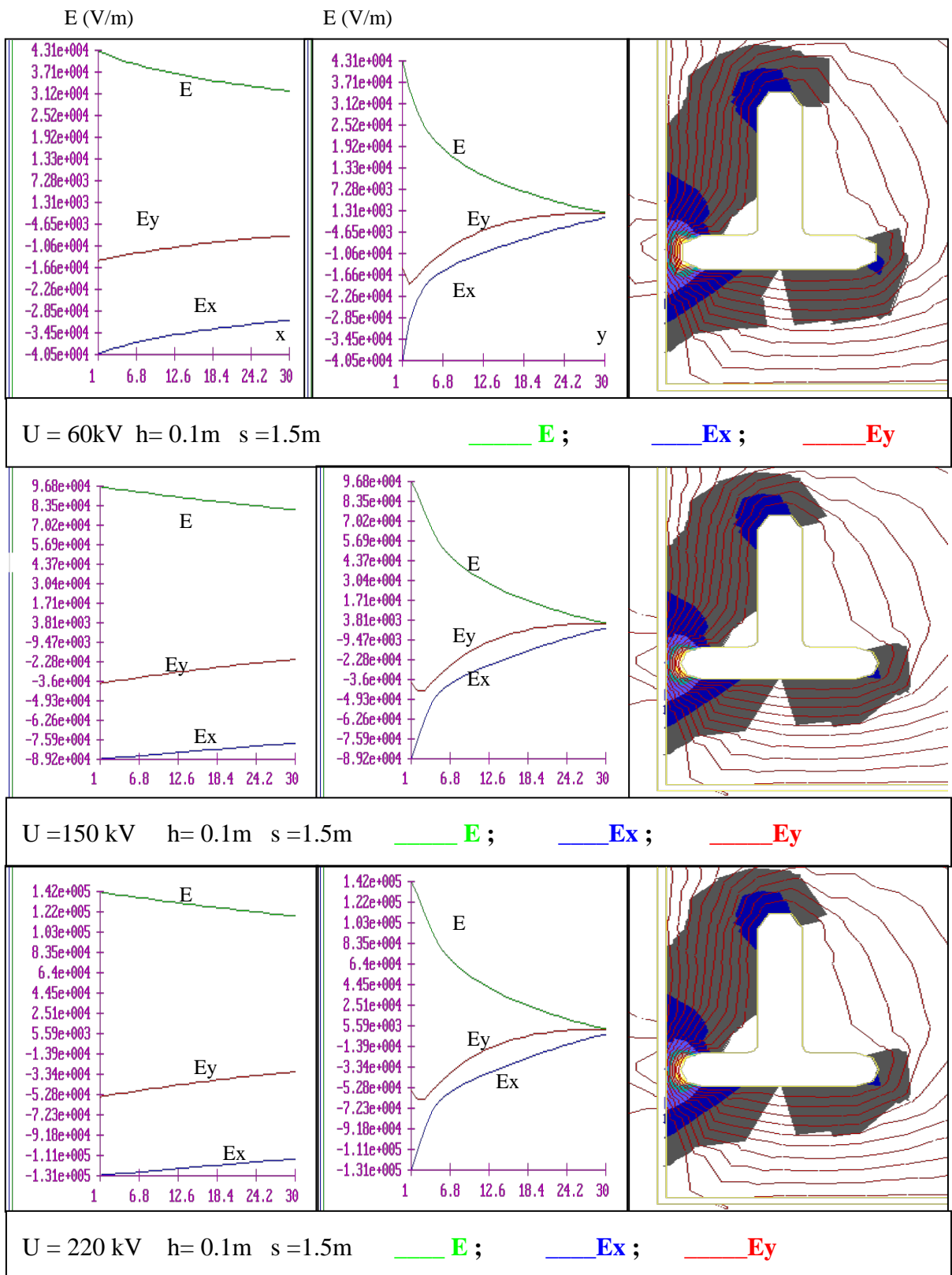


Fig. 32 a: Champ électrique dans le système double cylindre- plan- paroi pour différents niveaux de tension (60, 150 et 220 kV où h et s fixés respectivement à 0.1 m et 1.5 m.

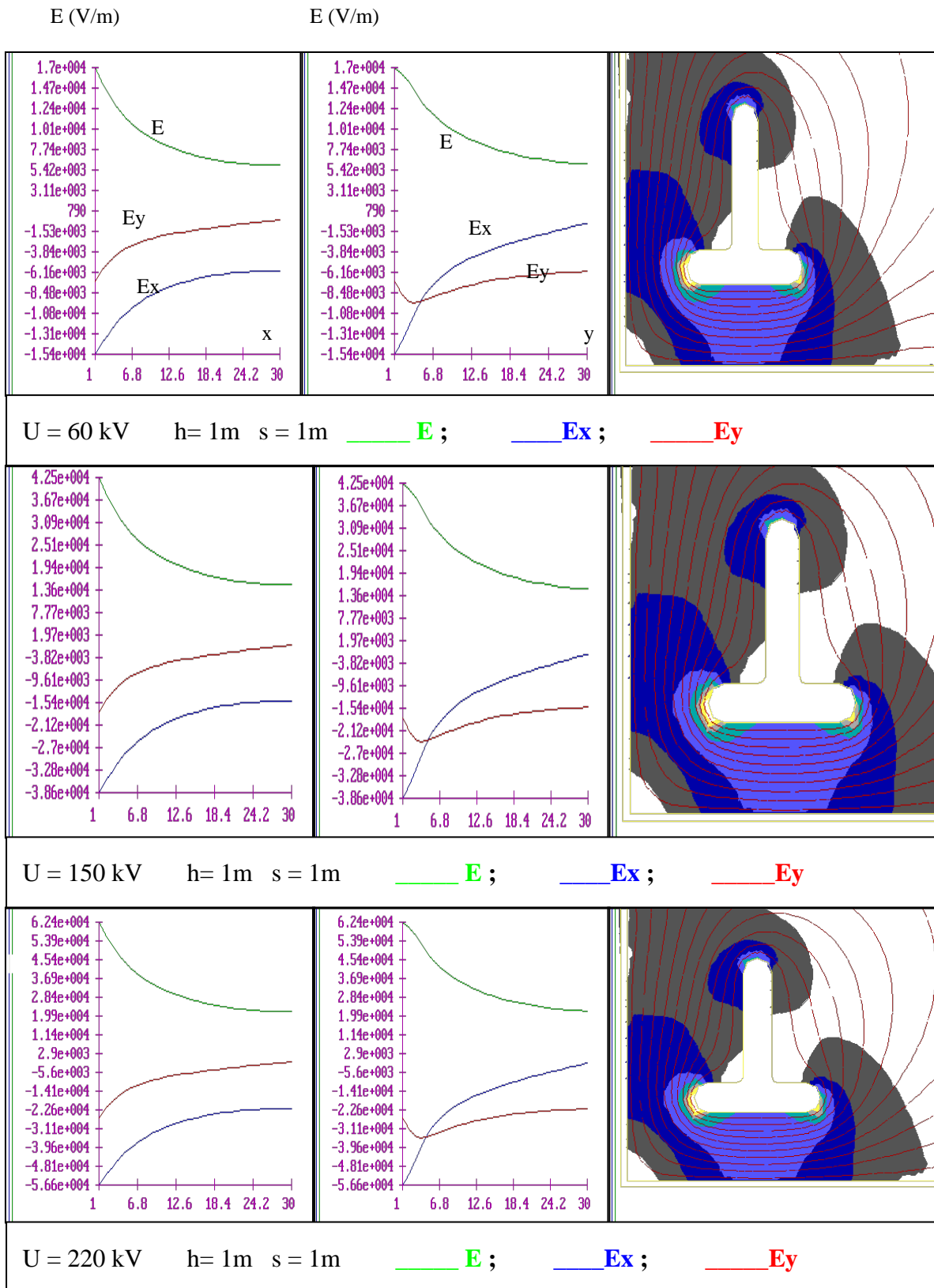


Fig. 32 b: Champ électrique dans le système double cylindre- plan- paroi pour différent niveau de tension (60, 150 et 220 kV) où h et s sont fixés à 1 m chacun.

CONCLUSION :

Les résultats obtenus par la méthode numérique sont en bon accord avec ceux obtenus par le calcul analytique. Les influences du rayon de courbure des parties acérées du système d'électrodes, de la distance inter- électrodes et du niveau de tension appliqué sont identiques.

D'autre part, les ordres de grandeur obtenus par les deux méthodes sont assez proches, d'où il ressort que les fortes intensités se situent autour des pointes.

Dans le système cylindre- plan- paroi, l'effet de la variation de la distance radiale «h» est plus importante que celui de la distance axiale « s »

Aux faibles distances « s » le champ électrique est plus intense dans le système cylindre-plan que dans le système cylindre-plan-paroi. Par contre, aux fortes distances les valeurs du champ relevées dans le système cylindre-plan-paroi sont plus importantes que celles du système cylindre plan.

Le système du double cylindre plan-paroi montre que plus le nombre de terminaisons acérées augmente, plus les zones à champ fort susceptibles d'initier des amorçages sont importantes.

CHAPITRE IV

ETUDE ET CALCUL DES DISTANCES

MINIMALES D'APPROCHE

INTRODUCTION:

Le dimensionnement des distances minimales d'approche est l'élément essentiel dans toute opération de travail sous tension, la sécurité du personnel en charge y dépend.

Ce travail comporte une étude sur la détermination des distances minimales d'approche à respecter à tout instant lors de l'exécution de travaux sous tension dans les systèmes à haute tension. Ces distances seront comparées à celles adoptées par les équipes de travail de SONELGAZ. Enfin, des illustrations de ces calculs seront présentées sur des cas pratiques relatifs aux lignes aériennes. Une méthodologie d'estimation de la possibilité ou non d'effectuer des travaux sous tension sera présentée, pour la cas particulier du réseau algérien, en fonction du nombre d'éléments défectueux dans une chaîne d'isolateurs.

IV- DISTANCE MINIMALE D'APPROCHE :

IV.1- Définitions générales

IV.1.1-Tension nominale du réseau :

Les tensions nominales de réseau sont données dans la CEI 60 071-1 [10]. Ces tensions sont associées à des domaines normalisés. La tension réelle du réseau peut ne pas être conforme à ces derniers.

IV.1.2- les surtensions :

Dans la détermination de la distance minimale d'approche, cinq types distincts de contrainte électrique doivent être considérés. Chaque type de contrainte a ses propres effets et tous peuvent ne pas être présents en même temps. Les cinq types sont les suivants :

IV.1.2.1-Tension la plus élevée du réseau : U_s

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 normales [10].

En réalité, le calcul de la surtension est basé sur la tension la plus élevée du réseau U_s 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.

IV.1.2.2 – Surtension temporaire :

Une surtension temporaire peut être causée par des défauts du réseau: résonance, déconnexion soudaine de charge et d'autres conditions d'exploitation. Son usage le plus significatif et le plus commun dans la détermination de la distance minimale d'approche concerne la surtension résultant des défauts à la terre et qui survient sur les phases non en défaut et peut atteindre 1,7 par unité à l'endroit du défaut sur certains réseaux [4].

IV.1.2.3- Surtensions transitoires :

Ce sont des surtensions de courte durée ne dépassant pas quelques millisecondes, oscillatoires ou non, généralement fortement amorties [4].

Une surtension transitoire a une forme dont on peut tenir compte dans le calcul de la distance minimale d'approche, que dans la mesure où elle est en relation avec un certain nombre de facteurs:

- La mise sous tension ;
- L'apparition d'un défaut ;
- L'élimination d'un défaut ;
- La mise hors tension et la re-connexion d'une partie du réseau de transmission ou de son matériel.

La forme et l'amplitude des surtensions transitoires qui peuvent apparaître sur le lieu de travail varient considérablement, mais généralement ces surtensions sont très amorties et de faibles durées.

IV.1.2.4- Surtensions de manœuvre :

Les surtensions de manœuvre maximales qui peuvent atteindre le lieu de travail sont habituellement dues aux manœuvres sur la ligne ou le matériel sur lequel le travail est en cours. Quand cela est possible, les dispositifs de ré-enclenchement sont mis hors service pendant le travail de façon à ce que la ligne ne soit pas réalimentée si elle est déclenchée pendant le travail. (le ré-enclenchement génère une surtension plus importante qu'à l'ouverture)

L'amplitude de la surtension de manœuvre 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 manœuvre pour chaque niveau de tension d'un réseau d'alimentation peut être déterminée par des études avec un analyseur de transitoire de réseau (TNA) ou avec ordinateur.

De telles études devraient fournir une valeur de la surtension statistique à 2 % (U_2) à partir de laquelle la distance minimale d'approche peut être déterminée.

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).

IV.1.2.4.1-Cas des surtensions phase – terre :

Pour la surtension statistique à 2%, u_{e2} par unité (pu)

$$\text{Ecart type} \quad \sigma_e = 0.25 (u_{e2} - 1) \quad (73)$$

$$\text{Valeur tronquée} \quad u_{et} = 1.25 u_{e2} - 0.25 \quad (74)$$

$$\text{D'où :} \quad u_{e2} = (u_{et} + 0.25) / 1.25 \quad (75)$$

IV.1.2.4.2-Cas des surtensions phase – phase :

Pour la surtension statistique phase - phase à 2 % u_{p2} :

$$\text{Ecart type} \quad \sigma_p = 0.25 (u_{p2} - 1.73) \quad (76)$$

$$\text{Valeur tronquée} \quad u_{pt} = 1.25 u_{p2} - 0.43 \quad (77)$$

$$\text{D' où} \quad U_{p2} = (u_{pt} + 0.43) / 1.25 \quad (78)$$

IV.1.2.5 - Surtensions de foudre :

Il est 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 atténuée au cours de sa propagation vers la zone de travail.

Pour un travail en sécurité, la surtension doit être inférieure à la valeur de la tension de tenue sur l'aire de travail U_{90} . C'est le cas lorsque la zone de travail est à plus de 10 km du coup de foudre, même avec une ligne ayant une extrémité ouverte. Puisque la foudre peut généralement être détectée visuellement ou de façon audible à cette distance, il est recommandé que le travail sous tension ne soit pas réalisé si les éclairs sont vus ou si le tonnerre est entendu.

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.

Si des éclateurs sont utilisés dans la zone de travail, la valeur U_{90} sera grandement limitée par ces éclateurs et un amorçage de l'intervalle peut survenir même si le coup de foudre est beaucoup plus loin que 10 km.

Bien que l'éclateur apporte de cette manière une protection complémentaire contre les contournements dus à la foudre sur la zone de travail, il peut aussi causer des mises hors service prolongées indésirables, conséquence de la suppression des ré-enclencheurs.

IV.1.3 - Tension induite :

Une installation qui est déconnectée de sa source normale d'alimentation (à la terre ou non) est soumise à de l'induction provenant des autres installations alimentées. Lorsqu'un travail doit être réalisé sur de telles installations, il convient de maintenir une distance minimale d'approche suffisante pour le niveau de tension induite. Pour ces installations, la tension maximale induite par couplage capacitif est généralement inférieure à 30 % de la tension phase-terre des installations alimentées voisines. Si la tension induite de l'installation sur laquelle on travaille n'est pas connue, il convient d'utiliser la valeur de 30 %.

Pour des installations présentant des conditions de couplage importantes tel le cas d'une ligne aérienne par rapport à une ligne souterraine, la tension réelle dans la zone de travail doit être déterminée avant que la partie soumise à l'induction ne soit approchée. Il est recommandé de tenir compte de la possibilité de défaut survenant sur l'installation sous tension. Dans ce cas, la tension transitoire induite par couplage sera aussi importante.

IV.1.4- Décharge disruptive :

Le terme "décharge disruptive" ou quelquefois "claquage", s'applique aux phénomènes associés à la défaillance de l'isolation sous une contrainte électrique, pendant lesquels la décharge court-circuite complètement l'isolation, réduisant la tension appliquée entre les électrodes à une valeur pratiquement nulle.

Le terme "contournement" est utilisé quand une décharge disruptive se produit à la surface d'un diélectrique dans un milieu gazeux ou liquide.

Le terme "perforation" est utilisé quand une décharge disruptive se produit à travers un diélectrique solide [7,8].

IV.1.5- Probabilité de tension de décharge disruptive :

La valeur de la tension provoquant une décharge disruptive [7,8].

IV.1.5.1- Probabilité de décharge disruptive p :

Probabilité p que l'application d'une tension, d'amplitude présumée et de forme donnée, conduit à une décharge disruptive [7,8].

IV.1.5.2- Probabilité de tenue q :

Probabilité q que l'application d'une tension d'amplitude présumée et de forme donnée, n'entraîne pas de décharge disruptive.[7,8]

Si p est la probabilité de décharge disruptive, la probabilité de tenue q est (1-p).

IV.1.6-Tension à p % de décharge disruptive U_p :

Valeur de la tension présumée qui a une probabilité de P % de produire une décharge disruptive [7,8].

IV.1.6.1-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 [4, 14] .

IV.1.6.2- Tension de tenue statistique U_{90} :

Surtension pour laquelle l'isolation présente une probabilité de tenue de 90 % [4].

IV.1.7-Tension statistique U_2 :

Surtension ayant une probabilité de 2 % d'être dépassée [4, 14]

V.1.8- Dispersion conventionnelle de la tension de décharge disruptive :

La dispersion conventionnelle δ_e de la tension de décharge disruptive est la différence entre les tensions de décharge disruptive 50% et 16 %. Elle est souvent exprimée en valeur par unité ou en pour cent, rapportée à la tension de décharge disruptive 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 [7,8].

IV.1.9- Valeur par unité (pu)

Expression de la valeur par unité de l'amplitude d'une surtension ou d'une tension, rapportée à $U_s\sqrt{2} / \sqrt{3}$ [7,8].

IV.1.10- Distance minimale d'approche (D_A)

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[4].

Cette distance de travail minimale varie en fonction des composantes électriques et ergonomiques choisies.

IV.1.10.1- Distance électrique: D_U

Distance dans l'air qui protège d'un claquage pendant le travail sous tension. En termes génériques, la composante électrique de la distance minimale de travail entre deux électrodes qui représentent les parties actives et /ou à la terre, est celle requise pour empêcher un amorçage sous la contrainte électrique la plus sévère qui puisse survenir dans des conditions choisies [4].

IV.1.10.2- Distance ergonomiques: D_E

Distance qui prend en compte les mouvements involontaires et les erreurs de jugement des distances pendant l'exécution du travail. Cette distance prend en compte aussi bien les actions de personnes que les outils utilisés et manipulés [4].

IV.1.12- Domaine d'application :

Cette étude spécifie une méthode de calcul de la distance minimale d'approche, en travaux sous tension entre 1kV et 800 kV, requise pour protéger les opérateurs des surtensions du réseau [4].

On traite des surtensions de réseau et des distances dans l'air pour le travail entre les parties et / ou les opérateurs à potentiels différents.

IV.2- CALCUL DES DISTANCES ELECTRIQUES :

IV.2.1– Facteurs intervenant dans les calculs :

IV.2.1.1-Action sur les surtensions du réseau :

L'amplitude maximale des surtensions arrivant dans la zone de travail peut être réduite par la pratique courante de neutralisation des ré-enclencheurs ou par l'usage d'éclateurs ou de parafoudres. Les éclateurs sont utilisés sur les réseaux de préférence près de la zone de travail ou aux extrémités des équipements.

IV.2.1.2- Surtension statistique :

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 :

$$U_{e2} = \frac{\sqrt{2}}{\sqrt{3}} \cdot U_s \cdot u_{e2} \quad (79)$$

Où :

U_s : la tension la plus élevée du réseau ;

u_{e2} : La surtension statistique phase – terre exprimée par unité :

De la même manière :

$$U_{p2} = \frac{\sqrt{2}}{\sqrt{3}} \cdot U_s \cdot u_{p2} \quad (80)$$

u_{p2} : la surtension statistique phase – phase exprimée par unité.

On peut utiliser les valeurs de la tension statistique U_2 exprimées par unité données ci- après pour différents niveaux de tension U_s [1,4].

IV.2.1.2.1-Surtension statistique entre phase –terre :

$U_s = 72.5 \div 245$ kV :

$$u_{e2} = 2.3 \text{ pu} \quad (\text{sans réenclencheurs}) ;$$

$$u_{e2} = 3.0 \text{ pu} \quad (\text{avec réenclencheurs des 3 phases}).$$

$U_s = 300 \div 550$ kV :

- Sans résistance de décharge :

$$u_{e2} = 2.2 \text{ pu} \quad (\text{sans réenclencheurs})$$

$$u_{e2} = 2.6 \text{ pu} \quad (\text{avec réenclencheurs des 3 phases})$$

- Avec la résistance de décharge :

$$u_{e2} = 1.8 \text{ pu} \quad (\text{sans réenclencheurs}).$$

$$u_{e2} = 2.1 \text{ pu} \quad (\text{avec réenclencheurs des 3 phases})$$

$$\underline{U_s = 800 \text{ kV} :}$$

- Sans résistance de décharge :

$$u_{e2} = 1.8 \text{ pu} \quad (\text{sans ré-enclencheurs})$$

$$u_{e2} = 2.0 \text{ pu} \quad (\text{avec ré-enclencheurs des 3 -phases})$$

IV.2.1.2.2-Surtension statistique entre phase - phase :

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 :

$$u_{p2} = 1.33 u_{e2} + 0.4 \quad (81)$$

Les surtensions transitoires à prendre en compte sont celles causées par des défauts dans le réseau ou par des manœuvres, qu'elles se produisent sur les lignes sur lesquelles on travaille, sur les lignes voisines ou sur le matériel associé.

IV.2.1.3-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 :

$$U_{90} = K. U_2 \quad (82)$$

En considérant séparément les tensions phase-terre et phase-phase et en combinant l'équation (80) avec les équations (79) et (80) on obtient :

$$U_{e90} = K \frac{\sqrt{2}}{\sqrt{3}} \cdot U_s \cdot u_{e2} \quad (83)$$

$$U_{P90} = K \frac{\sqrt{2}}{\sqrt{3}} \cdot U_s \cdot u_{P2} \quad (84)$$

K : est un facteur statistique de sécurité (une valeur de 1.1 est recommandée par la norme CEI).

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

IV.2.1.4- 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 :

$$K_t = k_s \cdot k_g \cdot k_a \cdot k_F \cdot k_i$$

IV.2.1.4.1- Facteur de dispersion conventionnelle k_s :

Le facteur d'intervalle prend en considération la nature statistique de la tension de claquage.

$$k_s = 1 - 0.0128 \delta_e \quad (85)$$

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.

IV.2.1.4.2- 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.

IV.2.1.4.3- 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 :

$$k_a = e^{-\left(\frac{H}{8264}\right)} \quad (86)$$

H : hauteur au dessus du niveau de la mer.

IV.2.1.4.4-Facteur d'objet à potentiel flottant k_F :

Les objets à potentiel flottant peuvent décroître ou accroître la tenue électrique de l'intervalle à cause de la déformation du champ.

Un objet conducteur placé entre deux conducteurs à potentiel différent, et non connecté à aucun d'eux, est électriquement flottant et prend un potentiel intermédiaire.

a- Eléments non conducteurs : avec les surfaces propres et sèches.

- $k_F = 0.97$ pour le cas des surtensions de manœuvre

- $k_F = 0.9$ pour le cas des surtensions temporaires.

b- Eléments conducteurs :

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

$$k_F = 1$$

- Au potentiel flottant :

- de faibles dimensions ($S < 0.2$ m) $k_F = 1$

- de grandes dimensions ($S > 0.2$ m) $k_F = 1 - (A/d)$

Avec :

S (m) : longueur de l'objet flottant

$A = 0.24$ pour une configuration phase terre ;

$A = 0.50$ pour une configuration phase - phase.

d (m): distance inter - électrodes

IV.2.1.5-Isolateurs :

Les effets de la détérioration de l'isolation 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 bonne 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.

$$k_i = 1 - 0.8k_d \left(\frac{N_d}{N_0} \right) \quad (76)$$

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.

$k_d = 1$ pour des isolateurs en verre trempé.

k_d est compris entre 0 et 1 pour les isolateurs en porcelaine, avec 0.75 comme valeur moyenne.

IV.2.1.6- Longueur d'objets flottants F :

La longueur d'objets flottants est la somme de toutes les dimensions, dans la direction de l'axe de l'intervalle, des objets flottants dans cet intervalle d'air. Toutefois, la présence d'un ou de plusieurs objets flottants réduit la longueur électrique nette de l'intervalle d'air.

IV.2.1.7- Tenue diélectrique de l'air :

L'onde de tension de choc de manœuvre normalisée utilisée dans les essais à une durée jusqu'à la crête de $250 \mu s$ et une durée de queue de $2500 \mu s$.

Les surtensions de manœuvre se produisant dans les réseaux en exploitation ont une durée jusqu'à la crête comprise entre $50 \mu s$ et $2000 \mu s$. 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. L'amplitude de cette tension est minimale pour une valeur de la durée jusqu'à la crête dite critique.

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 des caractéristiques géométriques de l'intervalle, principalement l'écartement et la configuration des électrodes.

Parmi les différents intervalles de même écartement d , l'intervalle tige-plan (rode plan) en polarité positive présente en tension de choc de manœuvre, la tenue la plus faible. D'où la détermination de l'intervalle d par la relation (30) assure la tenue aux autres surtensions.

Pour des intervalle tige-plan d'écartement jusqu'à 25 m, la tenue diélectrique U_{50RP} est donc donnée par la relation (30) :

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

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 :

$$U_{90} = K_t U_{50RP} \quad (88)$$

$$U_{90} = K_t 1080 \ln (0.46 d + 1) \quad (89)$$

La relation entre la tension de tenue statistique U_{90} et la tension de 50% de décharge disruptive U_{50} est :

$$U_{90} = k_s U_{50} \quad (90)$$

Donc :

$$U_{90} = U_{50} - (0.0128 \delta e U_{50}) \quad (91)$$

IV.2.2 – Calcul de la distance électrique D_U :

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 (89) :

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

En transformant cette équation, on obtient :

$$d = 2.17 \left(e^{\left(\frac{U_{90}}{1080 K_t} \right)} - 1 \right) \quad (92)$$

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

$$D_U = 2.17 \left(e^{\left(\frac{U_{90}}{1080 K_t} \right)} - 1 \right) + F \quad (93)$$

IV.3 – Application :

IV.3.1- Calcul de la distance minimale d'approche :

On calcule la distance minimale d'approche qui protège d'un amorçage pendant un travail sous tension, et cela pour différents niveaux de tension, pour une configuration phase- terre.

Pour ces calculs, nous considérons les données suivantes :

- Altitude, $H = 200$ m
- Une surtension de manœuvre $u_{e2} = 2.2$ pu

IV.3.1.1-ligne de tension nominale $U = 220$ kV :

$$U_s = 220 \text{ kV} \quad \text{d'où} \quad U_s \frac{\sqrt{2}}{\sqrt{3}} = 179.63 \text{ kV}$$

$$U_{e2} = 2.2 \times 179.63 \quad U_{e2} = 395.19 \text{ kV}$$

Pour la tension de tenue :

$$U_{e90} = K U_{e2}$$

On prend un facteur de sécurité $K = 1.1$

Donc :

$$U_{e90} = 434.70 \text{ kV}$$

Pour la distance électrique, on applique la relation (82):

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

où $K_t = k_s k_g k_F k_a k_i$

et $k_s = 1 - 0.0128 \delta_e$

On prend : $\delta_e = 5 \%$

Donc: $k_s = 0.936$

Pour la valeur de k_g , on prend la valeur conservatrice 1.2.

Pas d'objets flottants, donc $k_F = 1$ et $F = 0$.

Pour $H = 200$ m le facteur atmosphérique $k_a = 0.976$.

Pas de chaîne d'isolateurs : $k_i = 1$

Donc : $K_t = 1.96$

Ce qui nous donne la distance électrique : $D_U = 0.96$ m correspondant à la tension $U = 220$ kV.

IV.3.1.2- Distances minimales d'approche pour différents niveaux de tension nominale:

On refait le même travail pour les niveaux de tension : 60; 90; 150; 220 ; 400 et 735kV.

On prend une distance ergonomique $D_E = 0.5$ m.

Tableau 11: Distances minimales d'approche pour différents niveaux de tension.[CEI]

Tension nominale U (kV)	Distance électrique D_U (m)	Distance ergonomique D_E (m)	Dist.minimale d'approche D_A (m)
60	0.23	0.5	0.73
90	0.35	0.5	0.85
150	0.62	0.5	1.12
220	0.96	0.5	1.46
400	2.06	0.5	2.56
735	5.23	0.5	5.73

IV.4 - Distances minimales d'approche appliquées par SONELGAZ :

C'est la somme de deux distances :

$$D_A = D_U + D_E$$

D_U : distance de tension (électrique) ;

D_E : distance ergonomique.

IV.4.1- Distance de tension :

Cette distance est donnée par: [14]

$$D_U = 0.005 U_N \quad (94)$$

D_U : la distance électrique en mètres ;

U_N : la valeur nominale de la tension en kV.

IV.4.2- Distance ergonomique :

Cette distance est prise égale à :

- 0.30 m en basse tension ;

- 0.50 m en haute tension.

Les valeurs de la tension les plus courantes sont indiquées dans le tableau suivant.

Tableau 12: Distances minimales d'approche appliquées par SONELGAZ pour différents niveaux de tension selon la relation empirique de Christian Atlani [14] .

Tension Nominale U_N (kV)	Distance électrique D_U (m)	Dist. ergonomique D_E (m)	Dist. Mini.d'approche D_A (m)
60	0.30	0.5	0.80
90	0.45	0.5	0.95
150	0.75	0.5	1.25
220	1.1	0.5	1.60

Nous constatons, en prenant les résultats des tableaux 11 et 12, que les valeurs appliquées par les équipes de SONELGAZ sont supérieures à celles préconisées par les normes CEI [39]. Ceci dans le souci principal d'assurer davantage la sécurité de son personnel.

IV.5-Exemple d'application typique de calcul de la distance minimale d'approche :

Un exemple d'application typique de ce procédé sera donné en relation avec la configuration dans la figure 33 où :

-L'intervalle (1) est constitué de la chaîne d'isolateurs et ses éléments détériorés devant être remplacés.

-L'intervalle (2) représente l'intervalle d'air entre le conducteur et le point B du pylône où se trouve un outil conducteur manœuvré à l'aide d'une perche ou une corde par un opérateur situé sur le point B. Trois corps conducteurs sont présents dans cet intervalle, un au potentiel de la ligne (F_1), l'autre à un potentiel flottant (F_2) et le troisième (F_3) au potentiel de la terre.

Pour cet exemple on considère les données suivantes :

- Altitude $H = 200$ m ;
- Chaîne d'isolateurs : 18 éléments (verre), pas = 145 mm ;
- Distances : $d_1 = 18 \times 0.145 = 2,61$ m ; $d_2 = 3.3$ m ;

Dimensions des corps conducteurs dans l'intervalle : $F_1 = 1$ m, $F_2 = 0.3$ m, $F_3 = 0.5$ m .

On prend une surtension de manœuvre $u_2 = 2.2$ pu, ce qui nous donne : $U_2 = 395$ kV

Pour $K=1.1$, la tension de tenue électrique U_{90} est : $U_{90} = 435.6$ kV

On a : $U_{50} = U_{90} / K_s$

Et avec : $K_s = 0.935$, on aura : $U_{50} = 466$ kV

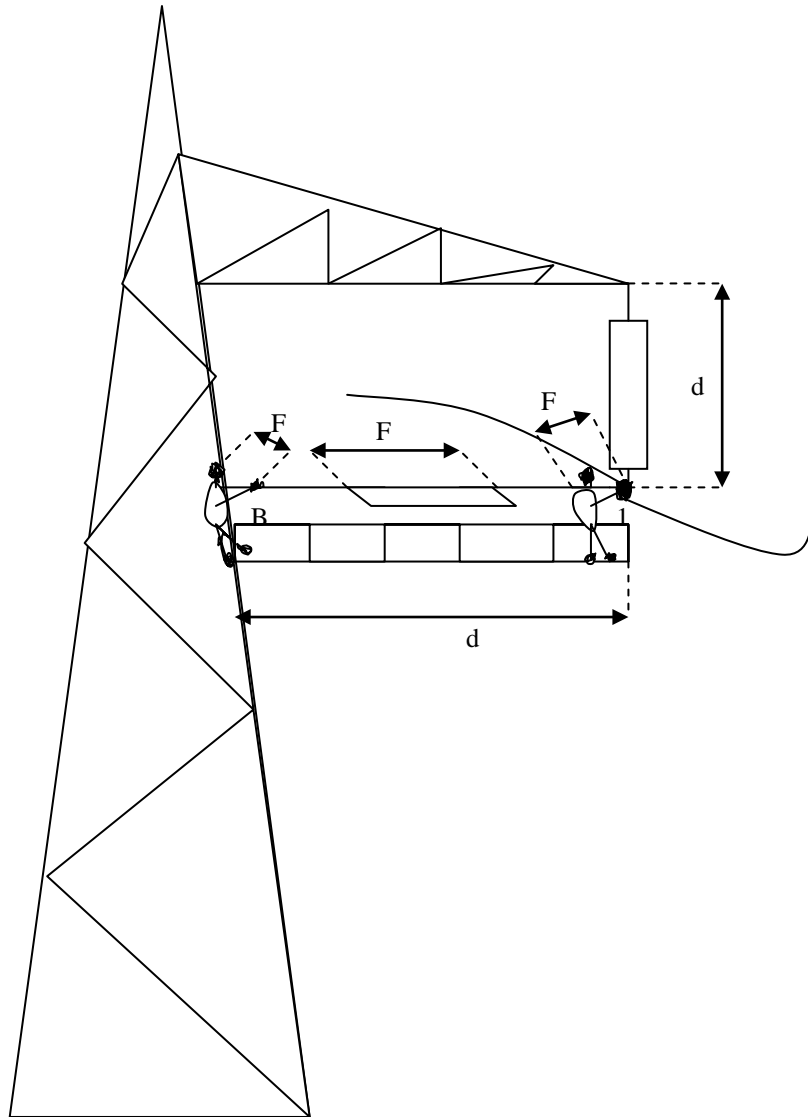


Fig.33: Vue d'une intervention pour changer une chaîne d'isolateurs (cas typique du réseau Algérien).

Pour l'intervalle (1), vérifions la faisabilité de l'opération de remplacement d'isolateurs dans l'hypothèse:

$$k_g=1.2 ; k_F=0.97 ; k_a = 0.976 ; k_S = 0.935.$$

$$\text{A partir des équations : } U_{50} = K_t U_{50RP} \text{ et } U_{50RP} = 1080 \ln (0.46 d + 1)$$

$$\text{On trouve : } U_{50RP} = 851.83 \text{ kV}$$

$$\text{Et la valeur du facteur } K_t : K_t = 0.55$$

Et aussi la valeur du facteur d'isolation k_i : $k_i = 0.52$

Sachant que : $k_i = 1 - 0.8 k_d (N_d / N_0)$

Avec $k_d = 1$ on trouve : $N_d = 8$ éléments

Donc, le travail sous tension est sûr jusqu'à 8 éléments défectueux dans la chaîne. Le nombre d'isolateurs défectueux doit être déterminé avant tout travail sous tension. Si ce nombre dépasse la limite prévue, le travail sous tension peut être dangereux, et des mesures doivent être prises pour limiter les éventuelles surtensions.

Pour l'intervalle (2), vérification de la sécurité de la distance de travail.

On prend : $k_g = 1.2$; $k_i = 1$; $k_F = 0.95$; $k_a = 0.976$; $k_s = 0.935$.

Comme $U_{90} = 435,6$ kV et à partir de l'équation (78).

On trouve $K_t = 1,063$ et $F = F_1 + F_2 + F_3 = 1.8$ m

Et la distance électrique D_U : $D_U = 1 + 1.8 = 2.8$ m

L'intervalle (2) étant de $d_2 = 3.3$ m, le travail sous tension considéré sera réalisé dans de bonnes conditions de sécurité.

CONCLUSION :

Afin d'éviter tout incident, même lorsque l'opérateur est amené à faire un mouvement non prévu dans le programme d'action du travail sous tension, une distance ergonomique de 0,5 m est rajoutée à la distance électrique. En plus de cela, la SONELGAZ utilise une formule empirique donnant aux distances appliquées par son personnel une rallonge supplémentaire de l'ordre de 10% par rapport à celles admises par la Commission Electrotechnique Internationale (CEI).

CHAPITRE V
INTERPRETATIONS ET DISCUSSIONS

INTRODUCTION :

Dans ce chapitre nous allons valider les résultats du modèle numérique par une confrontation avec le calcul analytique, ce qui va nous permettre d'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 équipotentiels avec une précision acceptable. Nous tenterons également de rechercher les corrélations pouvant exister non seulement entre les distances minimales d'approche et le niveau de tension appliqué mais aussi entre les distances minimales d'approche et l'intensité du champ électrique sur les électrodes d'une part et le rayon de courbure de ces électrodes d'autre part.

V.1- Comparaison entre résultats analytiques et numériques :

La validation des résultats numériques passe par une confrontation avec des calculs analytiques ou/et avec des mesures expérimentales. Pour ce qui concerne le présent travail, nous nous limiterons à la première confrontation. La figure 34 présente les variations en fonction de la tension des valeurs max du champ électrique moyen obtenues par la simulation CSP et par calcul analytique pour différentes valeurs de 'h' et 's' d'un système cylindre-plan paroi. Les écarts les plus élevés ne dépassant pas les 8%, sont obtenus aux faibles distances h et s, c'est à dire aux concentrations du champ le plus fortes. Nous retrouvons, dans les deux cas (analytique et numérique), la linéarité qui relie E_{\max} et la tension U. La valeur moyenne E_{\max} du champ pour ce type de configuration est égale à la somme vectorielle de la composante axiale $E_{y \max}$ et de la composante radiale $E_{x \max}$. Il y a cependant lieu de mentionner que la composante $E_{x \max}$ est supérieure à $E_{y \max}$ sur la périphérie de la pointe (rod) du cylindre alors que dans le reste de l'intervalle inter électrodes, c'est l'inverse qui est observé pour une variation des distance s et h entre 1 m et 2 m. Ce résultat peut être expliqué par la présence du point singulier assurant la jonction entre la courbure de la pointe (rod) et la droite représentant le corps du cylindre, où un renforcement particulier du champ électrique a lieu dans les deux directions radiale et axiale.

La concordance entre les résultats analytiques et numériques pour ce qui concerne les valeurs moyennes du champ max est quelque peu contrariée par la relative disparité qui est relevée sur les valeurs de E_x et E_y où les valeurs de E_x max analytiques sont supérieures à celles obtenues par le modèle numérique alors que les valeurs de E_y max analytiques sont inférieures aux numériques. Ces différences peuvent être en partie expliquées par le fait que dans le modèle analytique l'expression de la capacité du système cylindre plan paroi [35] est obtenue à la suite d'un certain nombre d'hypothèses simplificatrices pouvant ainsi engendrer une certaine marge d'erreurs. D'autre part, le modèle numérique étant basé sur le principe de simulation d'une distribution de charges ponctuelles notamment sur la surface des électrodes, nous avons constaté que la grandeur du champ électrique obtenue est affectée par le nombre de points de charge simulés, ce qui engendre également une marge d'erreur due à la résolution du domaine étudié d'autant plus que ce dernier présente des dimensions relativement importantes (4m x 4m).

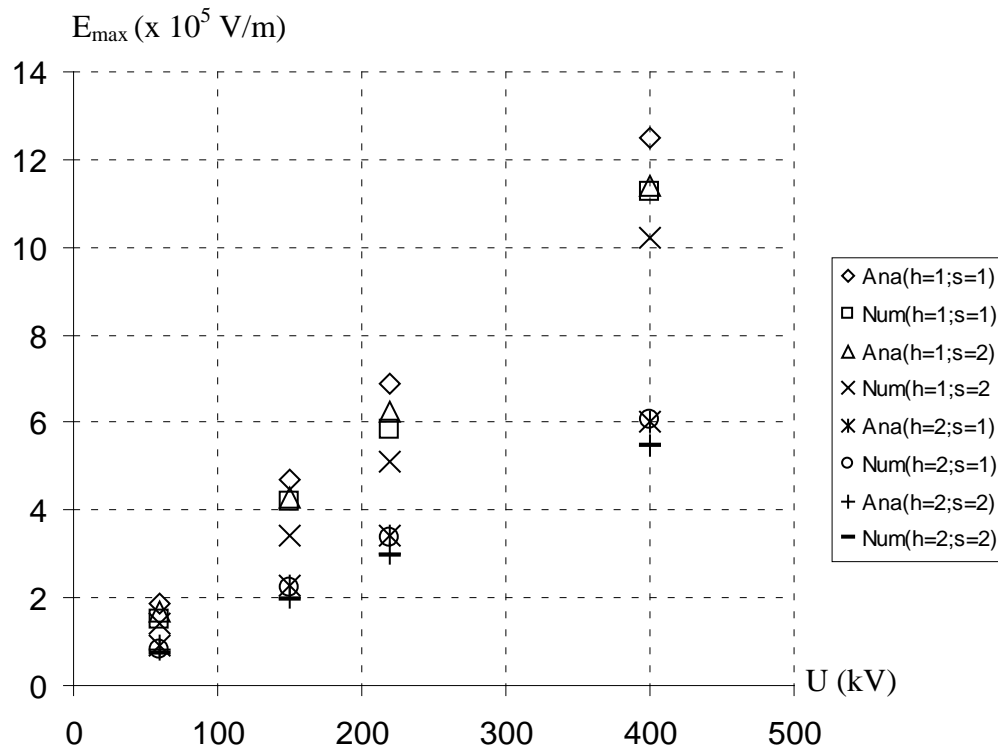


Fig.34 : Variations des valeurs max du champ électrique obtenues à partir de calculs analytique et numérique en fonction du niveau de tension appliquée Dans un système rod plan paroi pour différentes valeurs de h et s .

V . 2 : Distribution du champ dans un système corps-plan-paroi :

La figure 35 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 36 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 2m entre la main et le plan, la concentration maximale du champ se trouve au niveau de la main soumise à une tension de 220kV, 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 37 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 38, 39 et 40, pour différents rayons de courbure. Le champ max, à la surface de l'outil, passe de 0.2MV/m à 0.45MV/m 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.

La recherche des valeurs maximales de E_x et de E_y autour de l'extrémité (rod) 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 35. Le tableau 13 montre un état des variations des valeurs max des composantes E_x et E_y 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 augmente. Le tableau 14 donne un état récapitulatif des variations des composantes max du champ électrique E_x et E_y pour différents niveaux de tension lorsque L , x et r_p sont variés.

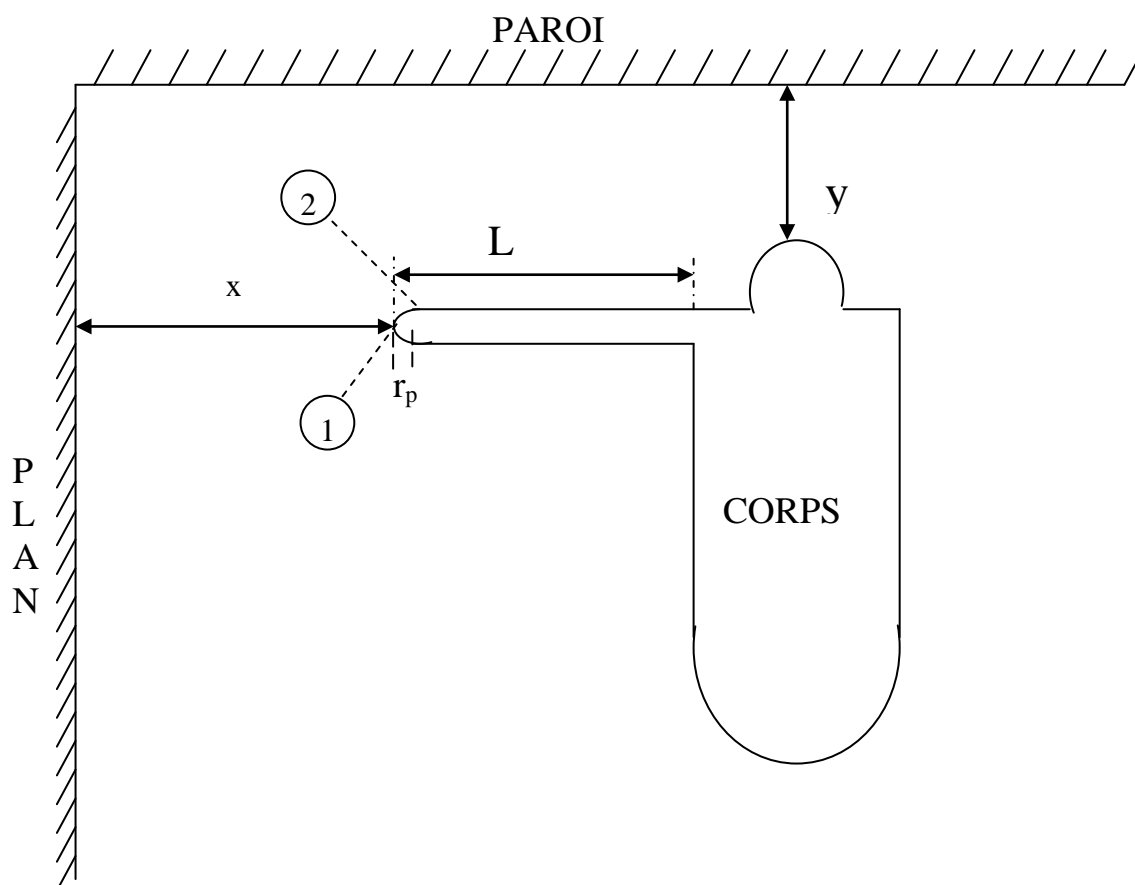


Figure 35 : Disposition du système corps – Plan – Paroi

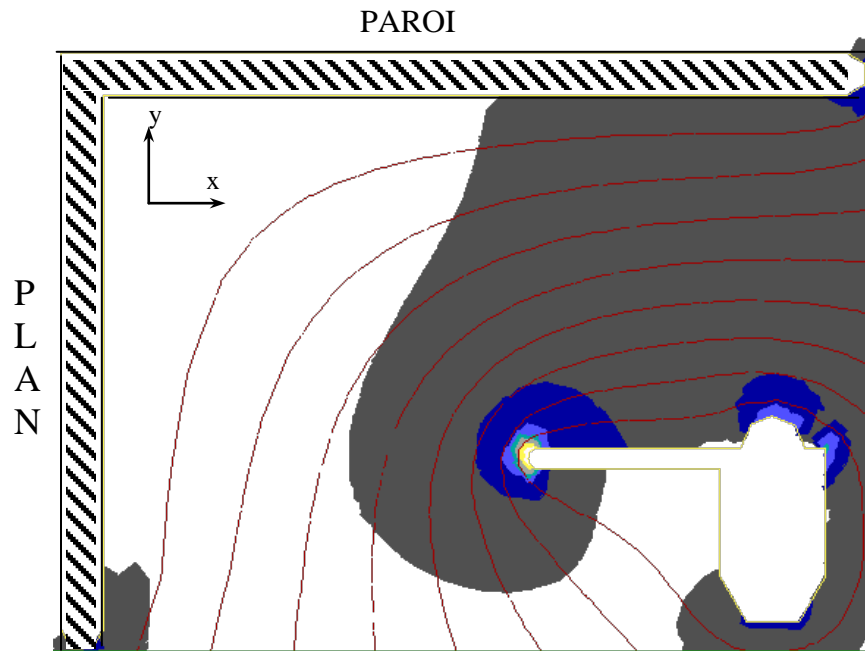


Fig. 36 : Cartographie du champ électrique et des équipotentielles dans le système corps plan paroi :
 $U=220\text{KV}$; $x=2\text{m}$; $y=1,5\text{m}$; $L=0,8\text{m}$; $r_p=2\text{cm}$

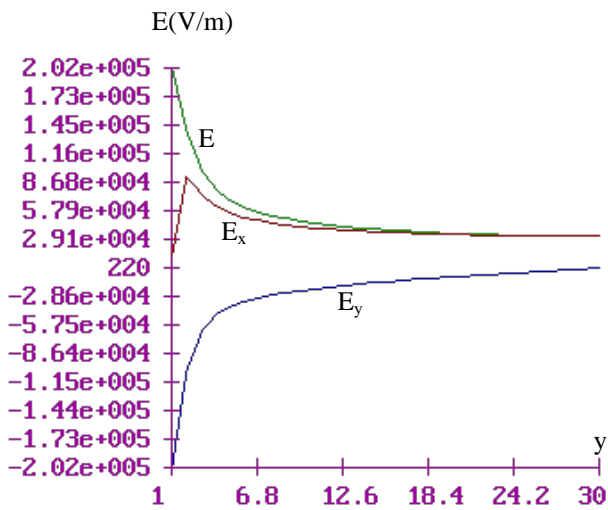


Fig. 37: E suivant y : $U=220\text{KV}$; $x=2\text{m}$;
 $y=1,5\text{m}$; $L=0,8\text{m}$; $r_p=2\text{cm}$

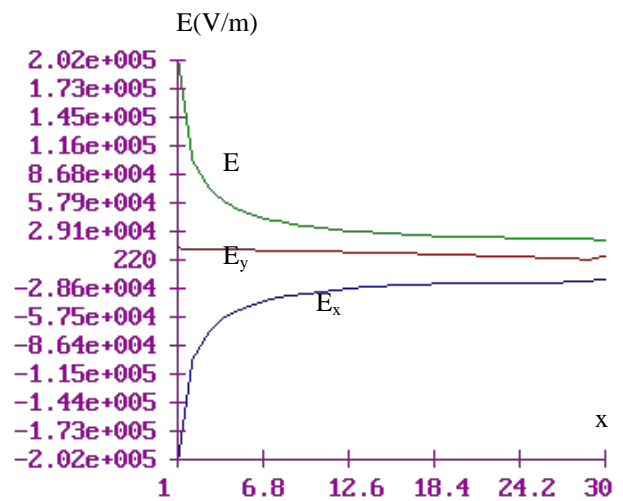


Fig. 38 : E suivant x : $U=220\text{KV}$; $x=2\text{m}$;
 $y=1,5\text{m}$; $L=0,8$; $r_p=2\text{cm}$

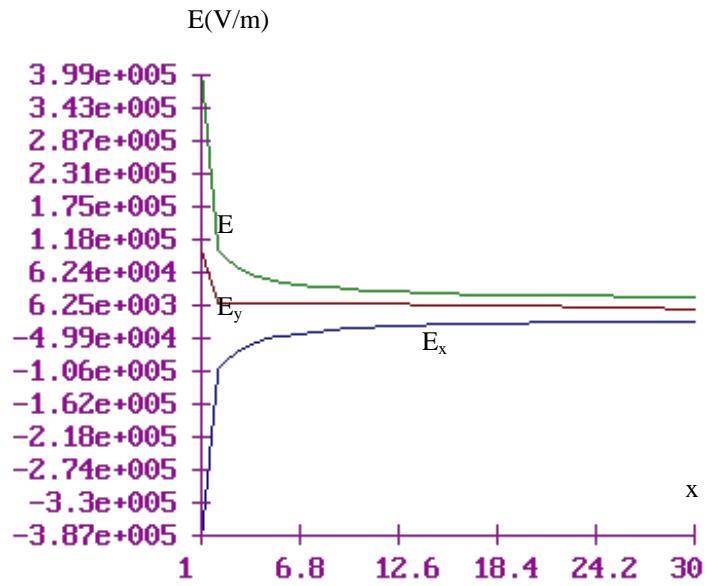


Fig. 39 : E suivant x : U=220KV x=2m ; y=1.5m ; L=0,8m ;

$r_p=1\text{ cm}$

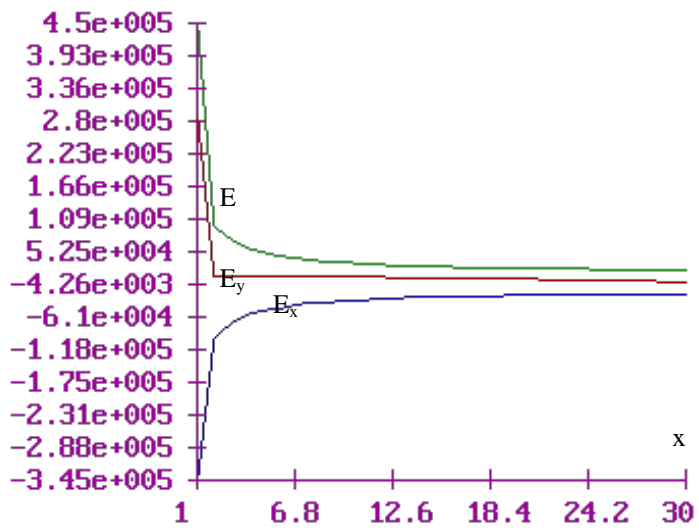


Fig. 40 : E suivant x : U=220KV x=2m ; y=1.5m ; L=0,8m ;

$r_p=0.5\text{ cm}$

Tableau 13 : Variations des composantes du champ électrique
pour différentes valeurs de r_p et x .

			L= 0.8 Y= 1.5 m								
X (m)	r_p (m)	Ex Ey KV/m	U (kV)								
			3	10	20	30	60	120	150	220	400
2	0.02	Ex	8	31	66	93	184	361	462	684	1208
		Ey	16	62	131	192	403	814	1005	1480	2686
	0.01	Ex	18	49	101	155	299	596	751	1087	1993
		Ey	26	84	169	257	516	1020	1277	1888	3421
	0.005	Ex	20	61	120	189	358	700	889	1288	2377
		Ey	38	140	293	398	807	1611	2009	2968	5375
1	0.02	Ex	9	31	67	93	185	362	463	698	1211
		Ey	16	63	139	196	419	820	1010	1480	2698
	0.01	Ex	18	50	108	164	303	601	761	1115	2017
		Ey	27	85	174	261	520	1021	1289	1902	3503
	0.005	Ex	21	62	120	190	370	710	891	1301	2417
		Ey	38	144	300	402	814	1620	2011	3000	5473
0.5	0.02	Ex	9	32	69	100	191	372	479	702	1302
		Ey	17	64	145	201	421	425	1029	2514	2715
	0.01	Ex	18	51	112	169	311	606	1775	1129	2127
		Ey	28	86	180	268	522	1038	1291	1983	3634
	0.005	Ex	21	62	129	201	372	720	910	2893	2507
		Ey	39	145	308	409	821	1622	2025	3008	5553

Tableau 14 : Variations des composantes du champ électrique pour différentes valeurs de r_p , L et x.

			Y= 1.5 m								
X, L (m)	r_p (m)	Ex Ey KV/m	U (kV)								
			3	10	20	30	60	120	150	220	400
X=1.5 Y=1.3	0.02	Ex	9	32	68	100	190	371	460	700	1300
		Ey	24	85	169	258	532	1027	1309	2817	3754
	0.01	Ex	18	50	111	169	309	602	771	1125	2119
		Ey	25	106	215	319	630	1211	1514	2160	4282
	0.005	Ex	21	61	120	100	370	718	903	1987	2482
		Ey	46	168	334	490	982	1903	2186	3835	6475
X=1 Y=1.8	0.02	Ex	10	36	71	98	197	413	524	707	1309
		Ey	39	82	193	272	571	1330	1651	2083	3010
	0.01	Ex	20	58	121	169	316	652	809	1083	1995
		Ey	50	119	280	382	865	1606	2072	2830	2956
	0.005	Ex	23	68	154	195	375	768	974	1306	2256
		Ey	60	193	396	637	1114	2249	2990	3728	6814
X=0.5 Y=2.3	0.02	Ex	11	40	82	122	252	530	660	927	1646
		Ey	60	275	541	809	1580	3095	3897	5489	9511
	0.01	Ex	20	59	112	172	362	734	917	1304	2237
		Ey	81	298	598	885	1728	3395	4165	5951	10988
	0.005	Ex	23	71	142	223	455	923	1158	1631	3051
		Ey	100	344	681	999	1978	3959	7991	7156	12936

V-3. Variations des lignes équipotentiellles:

Le logiciel utilisé nous permet de tracer dans le domaine étudié les variations des lignes équipotentiellles avec une simplicité similaire à celle du tracé des lignes de champ électrique. La figure 41 représente les différentes dimensions du système inter électrodes et la distribution des lignes équipotentiellles. L'amplitude de la distribution des potentiels selon l'axe des abscisses "x" entre les points A et B est représentée à la figure 42 où l'on observe que les potentiels sont assez élevés jusqu'au moins la moitié de l'espace inter électrodes. Le manque de résolution dans la définition de l'intervalle inter électrodes serait un des éléments d'obtention de potentiels négatifs à l'approche de l'électrode plane.

La distribution des équipotentiellles entre les points A et C selon l'axe des y (fig.43) est similaire à celle obtenue selon l'axe des x. Cependant, les valeurs relatives du potentiel à l'intérieur de l'espace inter électrodes 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. 44), seule la distribution des potentiels à l'intérieur de l'espace inter électrodes est affectée.

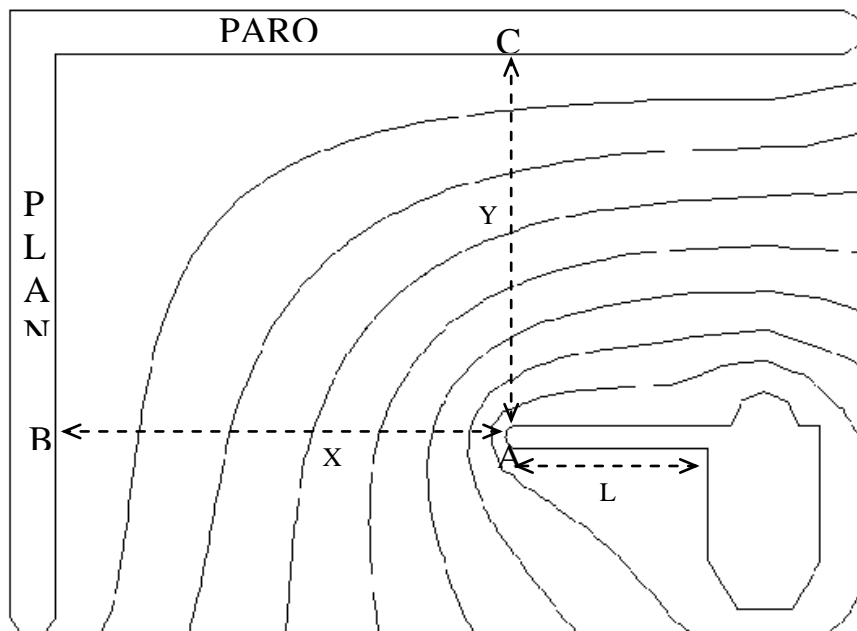


Fig. 41: Lignes équipotentiellles dans un système corps plan paroi, $U=220\text{kV}$; $x=2\text{m}$; $y=1.5\text{m}$, $L=0.8\text{m}$; $r_p=2\text{cm}$

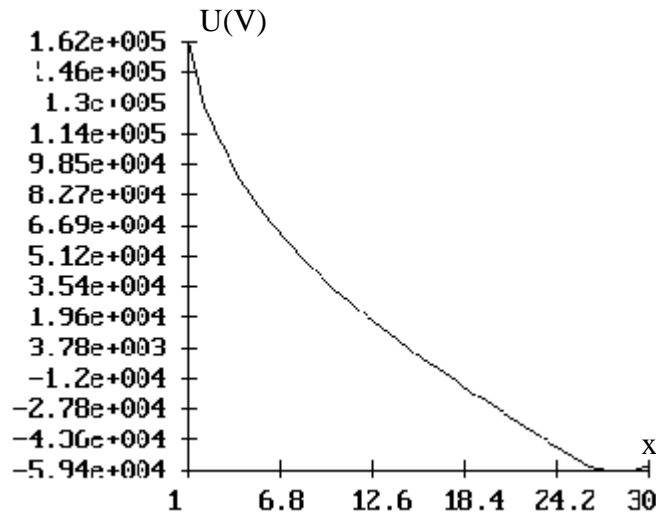


Fig.42 :Variations du potentiel entre main (rod) et plan selon x U=220kv, x=2m ; y=1.5m L=0.8m ; rp = 2cm

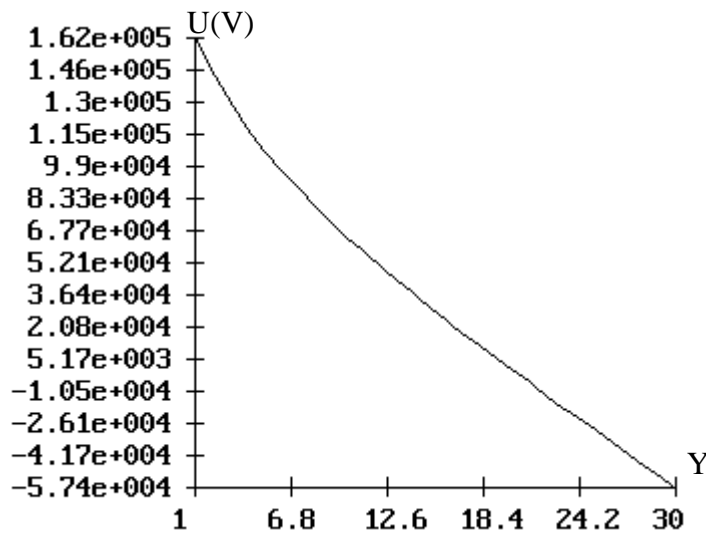


Fig.43 :Variations du potentiel entre main rod et plan selon y U=220kv, x=2m ; y=1.5m L=0.8m ; rp = 2cm

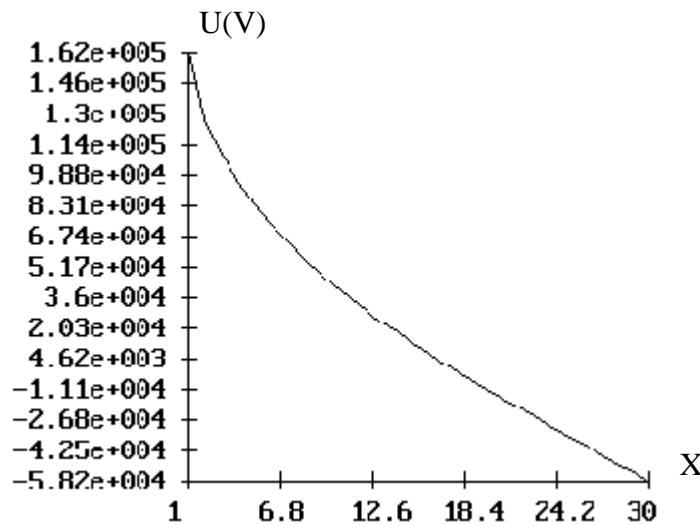


Fig. 44: Variations du potentiel entre main rod et plan selon x $U=220\text{kv}$, $x=2\text{m}$; $y=1.5\text{m}$
 $L=0.8\text{m}$; $r_p = 0.5\text{cm}$

V-4. Relation entre champ électrique et distance minimale d'approche:

La distance minimale d'approche dépend essentiellement du niveau de tension qui règne dans l'environnement où un travail sous tension devrait être exécuté. Cette dépendance est rapportée dans la figure 45 . 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 appliqué, pour un système d'électrodes rod plan. Les deux variables (Champ électrique et distance minimale d'approche) évoluent de la même manière lorsque la tension est variée.

Une relation de linéarité lie les variations du champ max par rapport à la distance minimale d'approche. Ces variations sont exprimées dans la figure 46.

V-5. Influence du rayon de courbure sur la distance minimale d'approche :

Les méthodes de détermination des distances minimales d'approche communément utilisées [4,5,14] considèrent des outils ou des corps sous tension de forme arrondie de rayon égal à 6,25mm [5].

Comme le champ électrique est dépendant du rayon de courbure des outils utilisés, nous avons déterminé pour chaque niveau de tension, une relation de dépendance qui devrait relier la distance minimale d'approche au rayon de courbure. La figure 47 montre de telles variations.

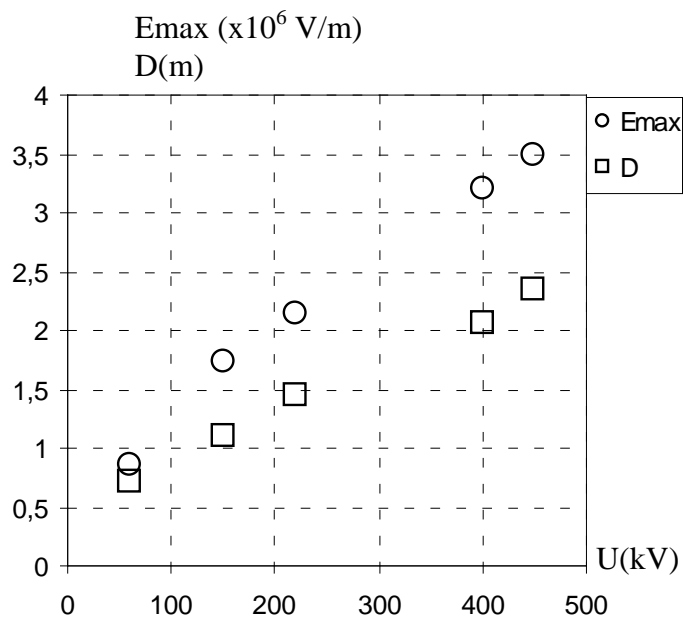


Fig. 45: Variations du champ max et de la distance minimale d'approche en fonction de la tension pour une pointe de rayon normalisé de 6.25 mm

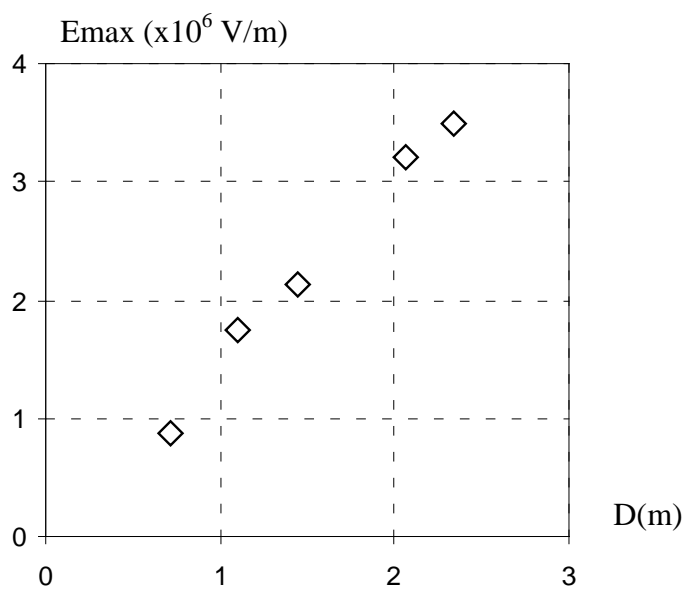


Fig. 46: Variations du champ max en fonction de la distance minimale d'approche pour une pointe de rayon normalisé de 6.25 mm

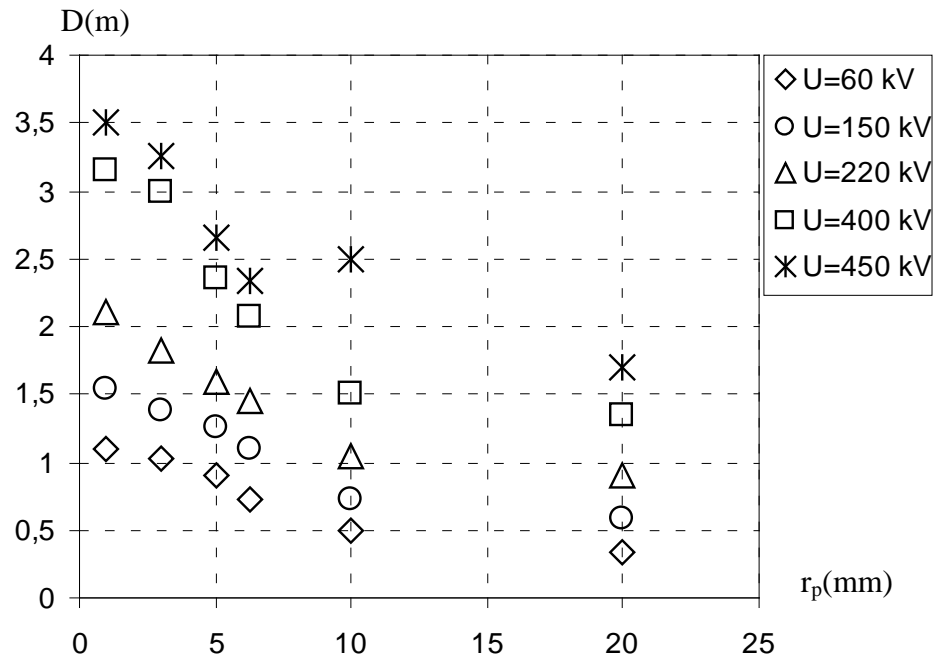


Fig. 47: Variations de la distance minimale d'approche D en fonction du rayon de courbure de la pointe r_p dans le système rod plan pour différents niveaux de tension.

CONCLUSION:

Les résultats obtenus par la méthode numérique sont en bon accord avec ceux obtenus par le calcul analytique. Les influences du rayon de courbure des parties acérées du système d'électrodes, de la distance inter-électrodes et du niveau de tension appliqué sont identiques. D'autre part, les ordres de grandeur obtenus pour les deux méthodes sont assez proches, d'où il ressort essentiellement que les fortes intensités se situent autour des parties acérées.

Contrairement aux systèmes d'électrodes axisymétriques 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.

CONCLUSION GENERALE

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. Ceci nous a conduit 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 appliquée 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. A cet effet et dans le but d'assurer le maximum de sécurité à son personnel, la SONELGAZ adopte des distances d'approche supérieures de l'ordre de 10% à celles admises par la Commission Electrotechnique internationale.

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.

Le travail sous tension est rendu possible grâce à la connaissance des lois de variation du champ électrique, de ses effets et à l'exploitation des résultats des études et d'analyses liées à la tenue des isolements. L'utilisation du principe de la cage de Faraday dans la fabrication des combinaisons conductrices permet au monteur d'effectuer un travail au potentiel. Aussi, la détermination des distances minimales d'approche, basée sur la connaissance des surtensions statistiques d'amorçage relatives à un réseau et un site donnés, permet d'exécuter des travaux sous tension en toute sécurité.

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.

Références Bibliographiques:

- [1] L. THIONE, “An Overview of live Working and Maintenance Techniques” CIGRE 2000-P1-01
- [2] L. THIONE, “An Overview of live line diagnostic techniques” CIGRE 2000 -P1-02
- [3] C. DETOURREIL et M. ISHWARI- “Assessment of the state of insulators on live transmission lines” CIGRE 2000-P1-04 .
- [4] Norme C.E.I 61-472 Travaux sous tension- Distance Minimales d'Approche- Méthodes de calcul.
- [5] IEEE standard techniques for high voltage Testing , Power Systems Instrumentation and Measurements Committee of the IEEE Power Engineering Society . IEEE Std 4-1995
- [6] Norme C.E.I 60-1 Deuxième Edition 1989-11: Techniques des essais à haute tension; Première partie: définitions et prescriptions générales relatives aux essais.
- [7] Norme C.E.I 60-2 Deuxième Edition 1994-11: Techniques des essais à haute tension; deuxième partie: Systèmes de mesure.
- [8] Norme C.E.I 60-2 Amendement 1- 1994-11: Techniques des essais à haute tension; partie 2: Système de mesure.
- [9] Norme C.E.I 60-743: Terminologie pour les outils et l'équipements utilisés dans les travaux sous tension, 1983 et 1995
- [10] Norme C.E.I 71-1 Coordination des isolements – Partie 1: Définitions, principes et règles. Novembre 1995.
- [11] Norme C.E.I 71-2 Coordination des isolements – Partie 2: Guides d'application.
- [12] Norme C.E.I 833 Mesure des champs électriques à fréquence industrielle. Première Edition 1987; Genève Suisse.
- [13] G. GELA “Live Working and maintenance Techniques”. CIGRE 2000-P1-03.
- [14] Christian Atlani “Travaux sous tension” Techniques de l'ingénieur D4 140-1 à 9, –et P.FEINTUCH “ Interêt des travaux sous tension” D4 632-1 à 6.
- [15] M. BRAHAMI, F. SOUKER, H.SAYAH, « Lignes de transport d'énergie et perturbations électromagnétiques ».4^{ème} Conférence Nationale de la Haute tension , Ghardaia, 16-17 Janvier 2002 pp.149-152.
- [16] A. BENDAOU, 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 16-17 Novembre 1999 .pp. 79-84.

- [17] C. GARY -Techniques de l'ingénieur, D4 II "Réseaux et Appareillages", D 670 - 1 à 18.
- [18] P. JOHANNET et B. DALLE, Techniques de l'ingénieur, D4 II "Réseaux et Appareillages", D 673 -1 à 20.
- [19] A.S ABDELLAH, « Electric Fields from transmission lines nearby populated areas in egypt. Theory versus experiment », High Voltage Engineering Symposium, August 1999 - Conference Publication N° 467, IEE,1999.pp. 2.119.P6 à 2.122..P6.
- [20] T. KEIKKO, J. ISOKORPI et L. KORPINEN, « Practical problems in calculating electric fields of transmission lines » High Voltage Engineering Symposium, August 1999 - Conference Publication N° 467 IEE,1999 –pp. 2.103.P6 à 2.106.P6
- [21] 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 . pp.2.51.S4 à 2.55.S4
- [22] M. KANYA KUNARI, O. RAJESH KUMAR, P.V NAMBU DIRI, K.N. SRINIVASAN "Computation of electrical environmental effects of transmission lines", High Voltage Engineering Symposium, August 1999- Conference Publication N° 467 IEE,1999. Pp.2.160.P62.163.P6.
- [23] 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 : 15 et 16 Décembre 2002.
- [24] P.K. WATSON et al., IEEE Transactions on electrical insulation, Vol. 26 N°4, August 1991.
- [25] A. DENAT et al., Journées d'études du CNRS Grenoble 1986.
- [26] Y. V. TORSHIN, "Leader discharges in mineral oil" IEEE Transactions on dielectrics and Electrical Insulation, Vol. 2 N° 1, February 1995.
- [27] O. LESAIN T et al., IEEE Transactions on electrical insulation Vol.26 N° 4, August 1991.
- [28] G. RAJU et al., IEEE Trans. on Dielectrics and Electrical Insulation, Vol. 2 N°5, 1995.
- [29] M. HAIDARA, These de Doctorat, Grenoble 1988.
- [30] F. EICHORN, IEEE, Transactions on Electrical Insulation, Vol. 12 1977, pp. 2-18.
- [31] S. RENGARAJAN and S. SATYANARAYANA, "9^{ème} ISH, Subject 1, 28 August-1st September, GRAZ, 1995.

- [32] 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.
- [33] P SIBILLOT, R. COELHO, Journal of Physics, Vol.35, 1974, pp. 141-148.
- [34] 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 16-17 Novembre 1999. pp.45-48.
- [35] M. AGUET et M. IANOZ. "Traité de l'énergie électrique -Haute Tension, Volume XXII 1987 DUNOD France" .
- [36] P. L. LEVIN, A.J. HANSEN, H. GAN and PETROGELO, IEEE Trans. on Elect. Ins., Vol. 26 1991, pp. 1094-1103.
- [37] 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 1, 2 et 3 Décembre 2003, Soumis
- [38] 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 : 15 et 16 Décembre 2002 .
- [39] S. BELKHIR, H. MOULAI, M.L. BENYAHIA, A. MAMERI et Y. KADOUM, "Sécurité des travaux sous tension sur les lignes a haute tension", *1st International Conference on Energy Efficiency ICEE' 2003 Algiers, May 25-26. 2003, accepted.*