

République Algérienne Démocratique et Populaire
Ministère de l'enseignement Supérieur
et de la Recherche scientifique



Université d'EL-Oued
Faculté des Sciences et de la Technologies



Mémoire de Fin d'Etude
En vue de l'obtention du diplôme de

LICENCE ACADEMIQUE

Domaine : Sciences et de Technologies

Filière: Génie Électrique

Spécialité: Réseaux Électriques

Thème

Distribution de champ électrique

Auprès d'une ligne aérienne

Encadré par :

M. GUIA Talal

Réalisé par :

- DEBBAR Ben Salem

- MESBAHI Saida

- SAIDI Ali

Année universitaire : 2013/2014

REMERCIEMENT

Nous tenons à remercier tout premierement dieu le tout puissant pour la volonté ,la santé ,qu'il nous a donné durant toutes ces longues années. Ainsi, nous tenons également à exprimer nos vifs remerciements à notre encadreur, **Mr.GUIA TALAL** , pour suivi continuel tout le long de la réalisation de ce mémoire et qui n'a pas cessé de nous donner ses conseils.

Nous tenons à remercier vivement toutes personnes qui nous ont aidés de pré ou de loin à accomplir ce travail.,

Nous remerciment à tous les enseignants de la faculté des sciences et technologie

Sommaire

Introduction générale	1
-----------------------------	---

Chapitre I: Généralité sur les lignes aériennes

I-1-Introduction.....	2
I-2-Les lignes aériennes.....	2
I-2-1-Les conducteur de phases.....	3
I-2-2-Rôle des câbles de garde.....	3
I-2-3-Espacement des lignes.....	4
I-2-4-Capacités de transmission des lignes.....	4
I-3-Les isolateurs	5
I-4-Les pylône	6
I-5-Conclusion.....	8

Chapitre II : les paramètres électriques des lignes aériennes

II-1-Introduction	9
II-2-Méthode générale de calcul.....	10
II-2-1-Schéma équivalent d'une ligne.....	11
II-2-2-Resistance longitudinale.....	12
II-2-3-Réactance longitudinale (Inductance).....	13
II-2-4-Réactance transversale capacité.....	11
II-2-5-Systèmes équilibrés et déséquilibrés	14
II-2-6-Les réseaux symétriques.....	15
II-3-Etude des caractéristiques longitudinales.....	16
II-3-1-Caractéristiques longitudinales.....	17
II-3-2-Caractéristiques transversales.....	18

II-4-Conclusion.....	19
-----------------------------	-----------

Chapitre III : calcul de champ électrique dans les lignes aériennes

III-1-Introduction	20
III-2-Equations de Maxwell en complexe pour les coefficients de potentiel	21
III-2-1-Equations de Maxwell pour coefficients capacitifs.....	21
III-3-Calcul de ténuité du champ électrique et des charges électriques des conducteurs de ligne	23
III-3-1- Procède De Calcul De L'intensité Du Champ Electrique, A L'aide Des Eléments Finis :.....	24
III-3-2-Procède de calcul des charges électriques.....	25
III-4-Calcul des capacités partielles de la ligne électrique	26
III-4-1-Calcul des coefficients (capacitifs)	27
III-4-2-Les capacités partielles de la ligne triphasée.....	28
III-5-Résultats du calcul	29
III-5-1-Calcul des coefficients capacitifs et des charges électriques portées par les conducteur.....	30
III-5-2- Calcul de l'intensité du champ électrique à 1,8 m de hauteur peut se faire en deux variantes :.....	31
III-6-Conclusion	32

Chapitre IV : Simulation

IV-1-Introduction	33
IV-2-Simulation	33
IV-3-Conclution	41
Conclusion Générale.....	42

Liste de figure

Chapitre I: Généralité sur les lignes aériennes.

Fig. I.1 : Schéma simplifié d'une ligne de transmission.....2
Fig. I.2: – Câble de garde à fibres optiques incorporées.....4
Fig. I.3: Transmission costs as a function of power and distance (source Cigar, WG 38.04, Nov 1993)4
Fig. I.4 : Quelques types d'isolateurs utilisés dans le réseau de transmission.....5
Fig. I.5: Quelques pylônes utilisés par Hydro-Québec.....7

Chapitre II: les paramètres électriques des lignes aérienne

Fig. II.1: schéma équivalent d'une ligne aérienne.....9
Fig. II.2 : Résistance linéique en fonction de la fréquence.....11

Chapitre III : calcul de champ électrique dans les lignes aériennes.

Fig. III.1: La frontière du domaine de champ électrique, AB₀, obtenue par la transformation de Kelvin.....21
Fig.III.2: Le pylône et les positions des conducteurs de la ligne électrique.....23
Fig.III.3:Le électrique de la ligne électrique à 1,8 m au-dessus du sol champ.....25

Chapitre IV : Simulation

Fig. IV.1: Distribution du potentiel autour d'une ligne électrique monophasé.....33
Fig. IV.2: Potentiel électrique au-dessus de la ligne aérienne monophasé à 2 mètre d'hauteur.....33
Fig. IV.3: Distribution du champ électrique autour d'une ligne électrique monophasé.....34
Fig. IV.4: champ électrique au-dessus de la ligne aérienne monophasé à 2 mètre d'hauteur.....34
Fig. IV.5: Distribution du potentiel autour d'une ligne électrique triphasée en nappe.....35
Fig. IV.6: Potentiel électrique au-dessus de la ligne aérienne triphasée en nappe à 2 mètre d'hauteur.....35
Fig. IV.7 : Distribution du champ électrique autour d'une ligne électrique triphasée en nappe.....36
Fig. IV.8: champ électrique au-dessus de la ligne aérienne triphasée en nappe à 2 mètre d'hauteur.....36

Liste de figure

Fig. IV.9 :Distribution du potentiel autour d'une ligne électrique triphasé en position triangle.....	37
Fig. IV.10 : Potentiel électrique au-dessus de la ligne aérienne triphasé en position triangle à 2 mètre d'hauteur.....	37
Fig. IV.11 :Distribution du champ électrique autour d'une ligne électrique triphasé en position triangle.....	38
Fig. IV.12 : champ électrique au-dessus de la ligne aérienne triphasé en position triangle à 2 mètre d'hauteur.	38
Fig. IV.13 :Distribution du potentiel autour d'une ligne électrique triphasé triangle en double circuit	39
Fig. IV.14 :Potentiel électrique au-dessus de la ligne aérienne triphasé triangle en double circuit à 2 mètre d'hauteur.....	39
Fig. IV.15 :Distribution du champ électrique autour d'une ligne électrique triphasé triangle en double circuit	40
Fig. IV.16 :champ électrique au-dessus de la ligne aérienne triphasé triangle en double circuit à 2 mètre d'hauteur.	

INTRODUCTION GENERALE

Pour transporter l'énergie électrique de centrale de production aux centres de consommateurs il faut avoir un moyen de transport c'est les lignes aériennes. Les lignes aériennes sont utilisées surtout dans les transports de THT, HT, et dans distributeur rural.

Une ligne électrique est un ensemble des conducteurs (en aluminium, cuivre, bronze, ou autres alliages), système isolants et des éléments accessoires destinés au transport de l'énergie électrique.

Notre travail consacré sur l'étude d'une ligne électrique et la distribution du champ électrique autour de cette ligne. Pour cela, notre travail est présenté en quatre parties.

Dans le premier chapitre nous présentons les parties de ligne aérienne (ligne aérienne, conducteurs, isolateurs ...).

Dans le deuxième chapitre nous déterminons les paramètres électrique de la ligne telle que (la résistance, l'inductance, la capacité et conductance) pour les différents types des lignes.

Pour la troisième partie, on a cité les différentes méthodes de calcul du champ électrique tel que (en utilisant la transformation de Kelvin et équations de Maxwell en complexe pour les coefficients de potentiel).

Enfin, on a achevé notre travail par une simulation consacrée sur la distribution du champ électrique et la répartition de potentielle au-dessous des différentes configurations des lignes aérienne de 220kV simulant l'être humain à une hauteur de 2 mètres d'après la terre.

CHAPITRE

I.

GENERALITE SUR LES LIGNES AERIENNES

I-1-INTRODUCTION :

Les lignes aériennes constituent le moyen actuel le plus économique de transport de l'énergie électrique à grande distance. Il n'est donc pas étonnant que deux sections du présent ouvrage leur soient consacrées

Une ligne électrique est un ensemble de conducteurs (en aluminium, cuivre, bronze, ou autres alliages) d'isolants et d'éléments accessoires destinés au transport de l'énergie électrique. Les isolants possèdent une partie solide (porcelaine, verre, papier, matière plastique) combinée avec un gaz (azote, SF_6 ou mélange N_2-SF_6) ou un liquide (huile minérale).

Les lignes électriques peuvent être classées suivant trois critères :

- situation dans l'espace : lignes aériennes, lignes souterraines (câbles) .
- classe de tension : lignes à basse tension et ligne à haute tension.
- Nature de la tension : continue, alternative monophasée ou triphasée.[1]

I-2- LES LIGNES AERIENNES :

Les lignes aériennes sont constituées par des conducteurs de phase fixés par des isolateurs sur des pylônes métalliques, des poteaux en béton ou en bois (Fig.I.1).

Elles sont utilisées pour :

- les longues distances,
- les HT et THT surtout,
- en zones rurales (BT).

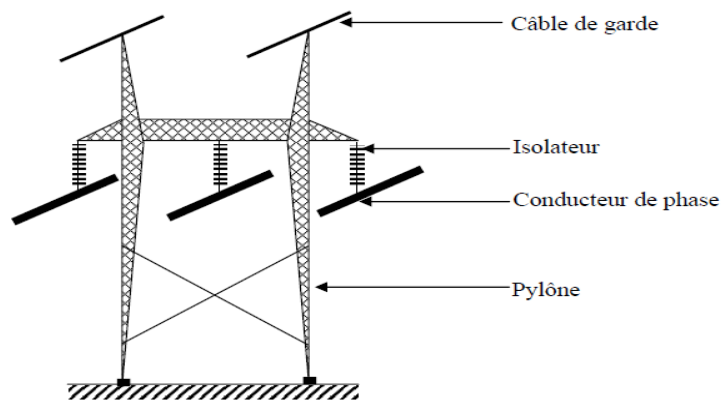


Fig.I.1 : Schéma simplifié d'une ligne de transmission.

I-2-1-Les Conducteurs De Phases :

Ils ne sont pas isolés pour faciliter le dégagement de chaleur. Les brins donnent beaucoup de Souplesse.

Les conducteurs sont constitués en aluminium, des brins toronnés et renforcés en acier.

La résistance d'un corps dépend de sa nature par sa résistivité (qui n'est autre que sa faculté à s'opposer au passage des électrons) et de ses dimensions (longueur et section). La relation donnant la résistance R d'un cylindre de section constante (mais de forme quelconque) est la suivante :

$$R = \rho l / S$$

où

R est la résistance en(Ω)

ρ est la résistivité du matériau en($\Omega \cdot m$)

l est la longueur du conducteur en (m)

s est la section transversale du conducteur en(m^2)

I-2-2-Rôle des câbles de garde :

Situés au-dessus des conducteurs, ils sont plus tendus que ceux-ci pour assurer une bonne protection contre la foudre. Cependant, malgré leur faible section, ils doivent présenter une sécurité mécanique équivalente à celle des conducteurs en cas de vent violent ou de surcharge de givre ou de neige. Il est donc impératif qu'ils soient calculés avec les mêmes hypothèses climatiques que les conducteurs et que les efforts qu'ils génèrent dans les supports soient pris en compte dans leur totalité, plus particulièrement dans l'hypothèse de givre dissymétrique Cette condition est contraignante car la faible longueur des suspensions sur les supports d'alignement ne permet qu'un faible amortissement, dans les portées adjacentes, d'une surtension mécanique provoquée par une surcharge localisée.

Électriquement, ils doivent assurer l'interconnexion des mises à terre des supports et tolérer les échauffements provoqués par les courants de court-circuit.

Pour satisfaire à ces conditions, les câbles de garde comportent toujours une section importante d'acier et, autour de l'âme d'acier, une couche ou exceptionnellement deux couches de fils d'aluméc.

Deux types de câbles de garde sont utilisés :

- des câbles almélec-acier normaux ;
- des câbles almélec-acier comportant à l'intérieur des circuits de télécommunication.

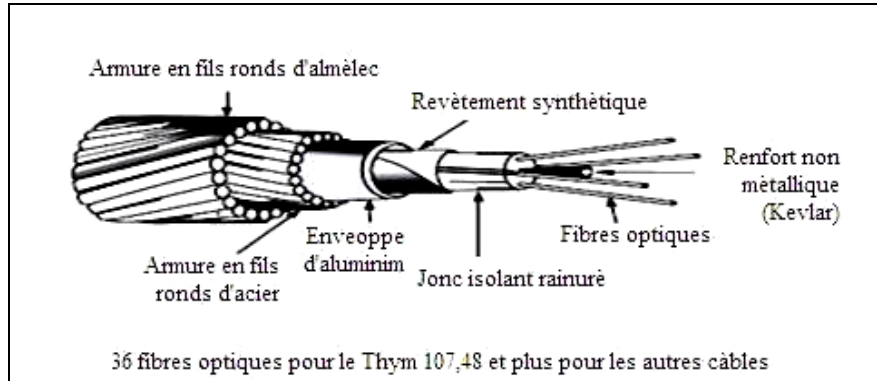


Fig.I.2: – Câble de garde à fibres optiques incorporées.

I-2-3- Espacement des lignes :

Le nombre, la dimension et l'espacement des conducteurs par phase. Un critère décisif

- effet de couronne,
- effet des impédances,
- espacement phase-phase

Le nombre, le positionnement et le type de conducteurs pour les câbles de garde.

I-2-4- Capacités de transmission des lignes :

La puissance à transporter ou capacités des lignes (tension). Cette capacité est liée à la distance :

$$\Rightarrow P = V^2 / l \text{ Coût proportionnel à la tension.}$$

\Rightarrow On choisit la tension économique optimale (pour les très grandes distances, la transmission en courant continu est meilleure.[2])

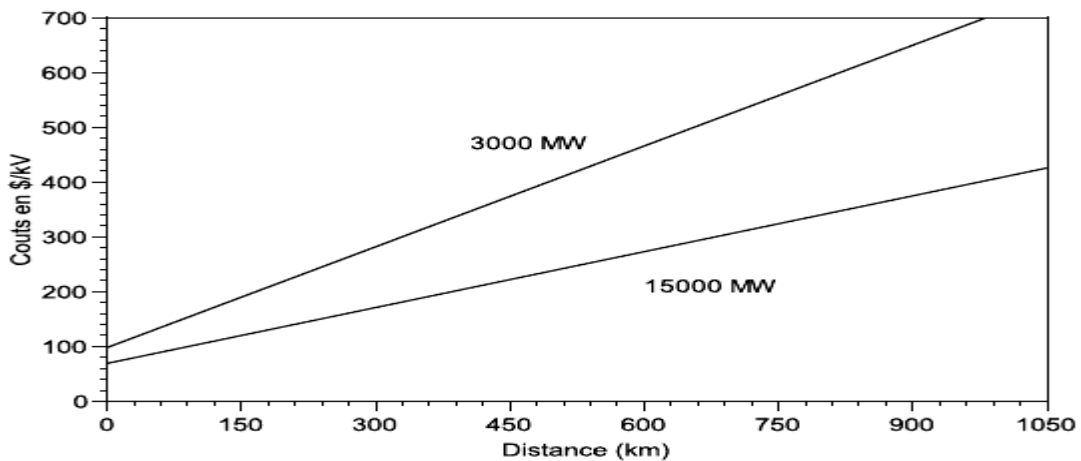


Fig. I.3: Niveau de transmission économique pour les lignes aériennes.

I-3-LES ISOLATEURS :

Les lignes aériennes et les postes des réseaux de transport d'énergie électrique sont exposés à diverses contraintes. Parmi celles-ci, la pollution des isolateurs constitue l'un des facteurs de première importance dans la qualité et la fiabilité du transport d'énergie. En effet par temps de pluie ou de brouillard, les dépôts polluants se fixant sur les surfaces isolantes réduisent considérablement la résistivité superficielle et le contournement peut alors survenir.

L'humidification des couches polluantes facilite en fait, la circulation d'un courant de fuite sur les surfaces isolantes provoquant des échauffements locaux et par la suite l'assèchement de la couche de pollution. Ainsi, la réparation du potentiel est modifiée d'une façon significative et des arcs partiels peuvent apparaître.

Ces derniers peuvent évoluer jusqu'au contournement total de l'isolateur. Les conséquences du contournement vont de la détérioration de la surface de l'isolateur à la mise hors service de la ligne haute tension. Ainsi, une des caractéristiques principale d'un isolateur haute tension sera donc sa tenue au contournement en fonction de l'environnement dans lequel il est utilisé.

Un isolateur est un composant électrotechnique destiné à fixer, maintenir ou soutenir les conducteurs électriques nus. On trouve des isolateurs en particulier sur les lignes à haute tension, mais aussi sur les lignes télégraphiques ou dans les postes électriques. Ils assurent l'isolation entre les conducteurs et les pylônes.[2][3]

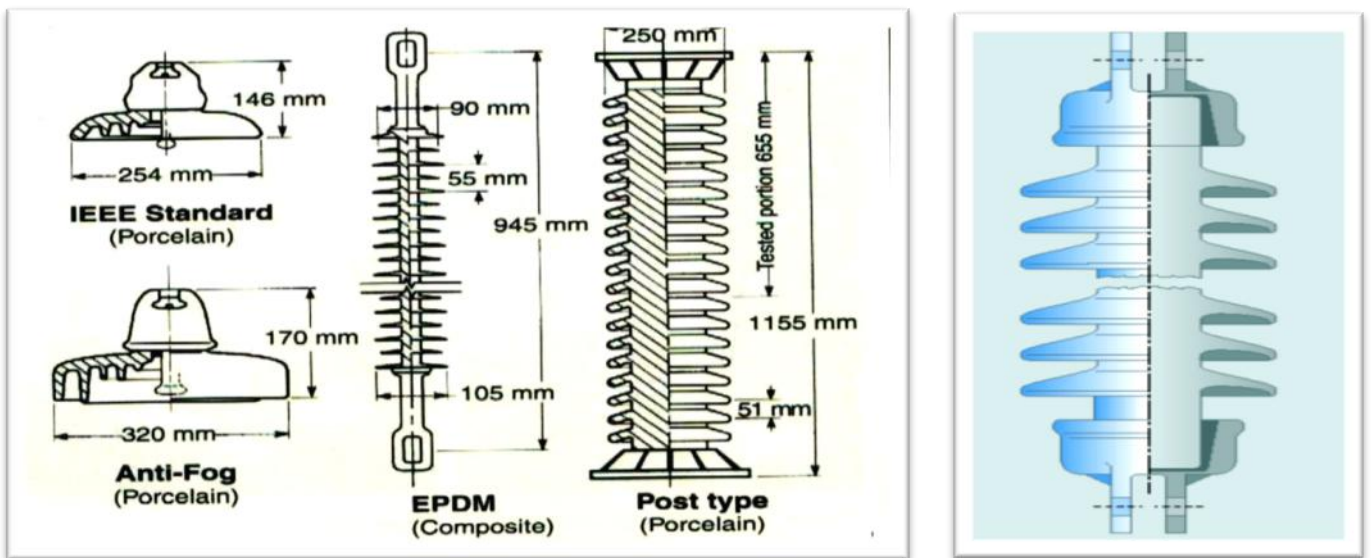


Fig.I.4 : Quelques types d'isolateurs utilisés dans le réseau de transmission.

I-4- LES PYLONES :

C'est un pylône métallique constitué par un assemblage de membrures et cornières formant un treillis et destiné à la plupart des lignes de transport de l'électricité, sous forme de courant alternatif ou de courant continu.

Il comporte un fût quadrangulaire et des consoles ou des traverses. Les fondations sont généralement à pieds séparés.

Il faut distinguer les pylônes de forme phallique, typiques du Canada, et ceux de forme trapézoïdales appelés pylônes tétrapodes.

Dans certains cas de lignes très longues ou de lignes d'interconnexion, un niveau de fiabilité plus élevé est prévu et qui correspond à des charges climatiques dont l'intervalle de récurrence est de l'ordre de 150 à 500 ans.

Les charges climatiques correspondant à chaque niveau de fiabilité sont données dans le tableau suivant :

Niveau de fiabilité	Normal	Élevé
Epaisseur de verglas	35-45	45-55
Vitesse de vent (Km /h)	90-110	110-120

Tableau 1 : charges climatiques correspondant à chaque niveau de fiabilité

Vent horaire de référence à 10 m de hauteur en terrain plat. Pour la transformation des vitesses de vent en pression.

Normalement, faire transiter de grandes quantités d'électricité sur de très longues distances et ce, de manière fiable, coûte très cher et entraîne inévitablement des pertes d'énergie, sans compter les risques de perturbations et de bris d'équipement.

Plus la distance est grande, plus il est difficile de maintenir la tension constante lorsque la demande varie.

Cet éloignement a amené à mettre au point divers technique visant à utiliser un minimum d'équipement tout en maximisant la continuité de service.

Les lignes à 735 kilovolts figurent parmi ces innovations; en 1965, Hydro-Québec fut la première société au monde à mettre en service une ligne à ce niveau élevé de tension. [3]

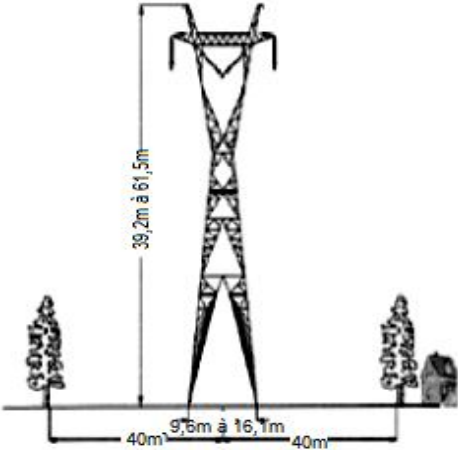
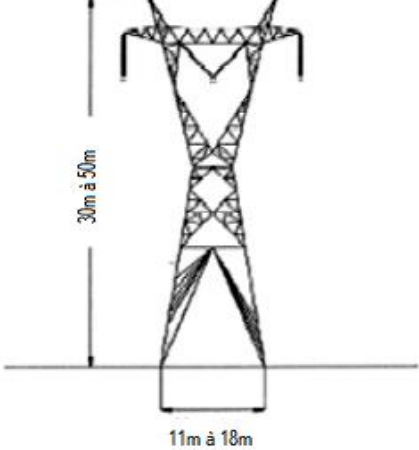
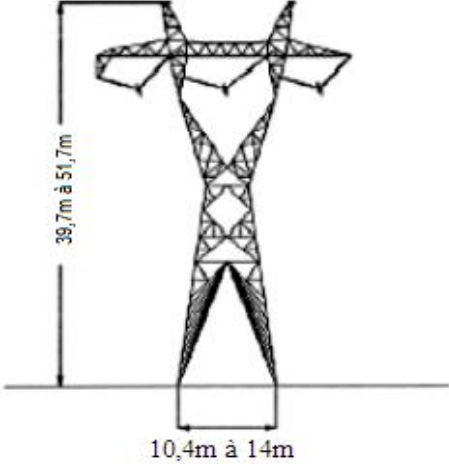
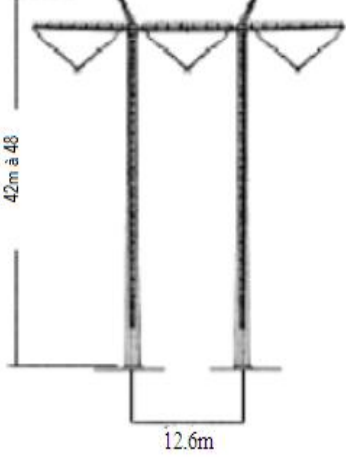
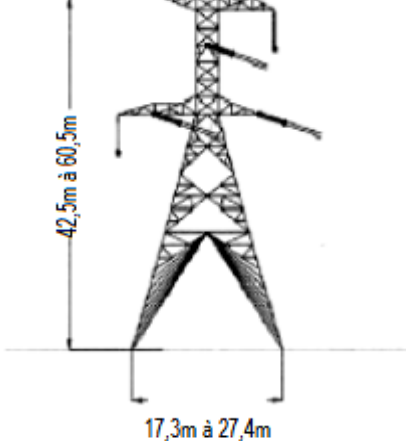
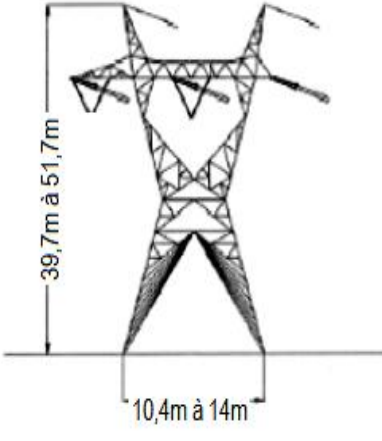
	
<p>Pylône d'alignement et d'angle en suspension (angles de 0° à 5°)</p>	<p>Pylône anti-chute en cascade</p>
	
<p>Pylônes d'angles en suspension (angles de 5° à 28°)</p>	<p>Portique tubulaire D'alignement</p>
	
<p>Pylônes d'angles en encrage (Angles de 28° à 80°)</p>	<p>Pylônes d'arrêt (angles de 0° à 90°)</p>

Fig.I.5: Quelques pylônes utilisés par Hydro-Québec.

I-5-CONCLUSION :

Dans ce chapitre, nous avons vu les différentes composantes d'une ligne aérienne (les isolateurs, les pylônes....etc.), et dans le chapitre suivant, on doit traiter le différent paramètre électrique d'une ligne aérienne.

CHAPITRE

II :

LES PARAMETRES ELECTRIQUES DES LIGNES AERIENNE

II-1-INTRODUCTION

Les lignes aériennes constituent des circuits de transmission des réseaux triphasés reliant des générateurs aux charges.

Chacune possède ses propres caractéristiques résistive, inductive et capacitive.

Ce chapitre vise à déterminer les valeurs de ces paramètres. Il fait la distinction entre les caractéristiques longitudinales (résistances des conducteurs et les inductances entre les conducteurs) et les caractéristiques transversales (capacité des conducteurs).[3]

II-2- METHODE GENERALE DE CALCUL :

II-2-1- Schéma équivalent d'une ligne :

Une ligne aérienne (de longueur inférieure à 100 km) peut se mettre sous la forme du schéma équivalent suivant :

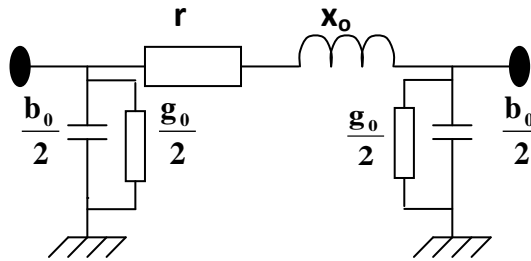


Fig. II.1: schéma équivalent d'une ligne aérienne.

Le schéma est composé par :

L'impédance effective longitudinale (composée de la résistance linéique R' et de la réactance linéique $X' = j\omega L'$) :

$$\mathbf{Z'}_{\text{longitudinale}} = R' + jX' \quad [\Omega/\text{m}] \quad (1)$$

L'impédance effective transversale composée de la séance linéique :

$$\mathbf{Y'} = j\omega C' \quad [\text{S}/\text{m}] \quad (2)$$

II-2-2- Résistance longitudinale :

$$\mathbf{J} = \sigma \cdot \mathbf{E} \quad (3)$$

Où :

\mathbf{J} est la densité de courant [A/m^2]

σ est la conductivité électrique [$\Omega^{-1}\text{m}^{-1}$]

\mathbf{E} est le champ électrique (dans le conducteur) [V/m].

Appliquée à un conducteur de longueur ' l ' [m], de section ' S ' [m^2] et de conductivité ' σ ' [$\Omega^{-1}\text{m}^{-1}$], parcouru par un courant continu d'intensité ' I ' [A], nous trouvons :

$$\mathbf{I} = \sigma \cdot S \cdot V/L \quad (4)$$

La résistance d'un conducteur se définit de la manière suivante :

$$R = \rho \cdot L / S \quad (5)$$

Où : « $\rho = 1/\sigma$ » est la résistivité du conducteur [Ωm].

Par extension, la loi d'Ohm est également utilisée en régime quasi-stationnaire.

Cependant, ce régime introduit des modifications dans la répartition du courant dans les conducteurs.

Les courants alternatifs qui circulent dans les conducteurs créent un champ d'induction magnétique (alternatif également) qui existe non seulement entre les conducteurs, mais aussi à l'intérieur de ceux-ci.

Un contour fermé à l'intérieur d'un tel conducteur embrasse un flux d'induction variable et se trouve être le siège d'une tension induite qui provoque, à son tour, l'apparition de courants dans le métal. Ces courants, appelés courants de Foucault, modifient la répartition de la vectrice densité de courant, 'J', admise uniforme en première approximation. Plus la fréquence n'est élevée et l'épaisseur des conducteurs forte, plus l'effet des courants de Foucault est importante.

La répartition du courant à l'intérieur d'un conducteur (plein ou faisceau) est différente en courant alternatif de ce qu'elle est en courant continu. Pour un conducteur plein, le courant se concentre sur la surface externe (effet pelliculaire¹). L'utilisation d'un faisceau de conducteurs au lieu d'un conducteur unique améliore cette situation (meilleure exploitation du matériau conducteur) ; ce n'est toutefois pas la raison pour laquelle on utilise des faisceaux de conducteurs en HT.

Lors d'un défaut à la terre, la partie des courants de retour qui circulent par la terre circulent essentiellement en surface (effet pelliculaire¹) et suivent le tracé de la ligne (effet de proximité²).[4]

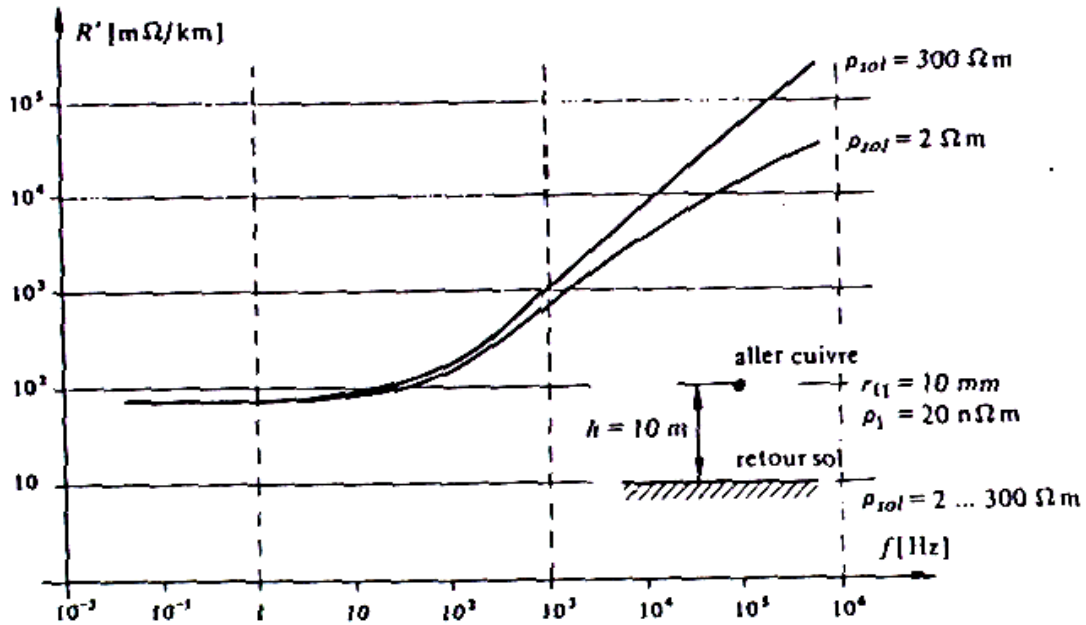


Fig.II.2 : Résistance linéique en fonction de la fréquence.

Pour un courant de fréquence 50 Hz, la profondeur de pénétration pour un conducteur de cuivre vaut 10 mm et pour un sol de résistivité 100 $\Omega \cdot \text{m}$, elle vaut 100 m.

Nous pouvons donc assimiler le sol à un conducteur de 100 m de rayon. La résistance du sol est donc de environ 70 $\text{m}\Omega/\text{km}$.

La résistivité d'un matériau croît avec la température selon la loi suivante :

$$\rho_0 = \rho_0 (1 + \alpha \cdot \Delta T) \quad (6)$$

Où :

ρ_0 est la résistivité du conducteur à 20 °C [$\Omega \cdot \text{m}$] (AMS : $\rho_0 = 0,325 \cdot 10^{-7} \Omega \cdot \text{m}$)

α est le coefficient de température [$^{\circ}\text{C}^{-1}$] (AMS : $\alpha = 0,004 \text{ } ^{\circ}\text{C}^{-1}$)

ΔT est l'écart de température par rapport à 20°C [$^{\circ}\text{C}$].

II-2-3- Réactance longitudinale (Inductance) :

Une inductance (supposée linéaire) est toujours le quotient entre le flux embrassé par la boucle conductrice et le courant qui la parcourt. Elle est déterminée par la relation suivante :

$$L = \varphi / i \quad [\text{H}] \quad (7)$$

Où :

φ est le flux induit par le courant [Wb] ;

i est le courant circulant dans le conducteur [A].

Nous avons deux types d'inductances :

- L'inductance propre (ou self-inductance) d'un conducteur électrique parcouru par un courant est définie, à un instant donné, comme étant le rapport entre les valeurs du flux induit par le courant et ce courant lui-même.
- L'inductance mutuelle se manifeste par l'interaction entre les conducteurs de phases, entre les conducteurs des différents ternes et entre tous les conducteurs parcourus par un courant tel que le fil de garde et le retour par la terre.

Réactance d'une ligne polyphasée est déterminée par l'effet mutuel équivalent de toutes les phases. [5][6]

Pour un système triphasé équilibré, l'inductance spécifique est calculée comme suit :

$$L_0 = [l_0 + 4,6 \cdot \text{Log} \left(\frac{D_{\text{moy}}}{R_{\text{eq}}} \right)] \cdot 10^{-4} \quad \text{H/Km} \quad (8)$$

Où

l_0 : inductance de la partie intérieure du conducteur , ($l_0=0,144$).

Log : logarithme décimal

D_{moy} : Distance moyenne géométrique entre les conducteurs .

R_{eq} : Rayon extérieur équivalent du conducteur de la ligne. (R_{cond})

La réactance linéique est calculée comme suit :

$$X_0 = \omega \cdot L_0 = 2 \cdot \pi \cdot f \cdot L_0 \quad (9)$$

$$X_0 = 0,144 \cdot \text{Log} \left(\frac{D_{\text{moy}}}{R_{\text{eq}}} \right) + 0,016 \quad \Omega/\text{Km}.$$

Parmi les dispositions des phases, celle qui permet d'avoir les mêmes conditions magnétiques est celle en triangle équilatéral, car la disposition en nappe présente le problème de déséquilibre des réactances (des phases). Pour cela on procède à la transposition de phase.

Lorsqu'il est question de phases en faisceaux la formule de X_o devient :

$$X_o = 0,144 \cdot \text{Log}\left(\frac{D_{\text{moy}}}{R_{\text{eq}}}\right) + \frac{0,016}{n} \quad \Omega/\text{Km.} \quad (10)$$

Où n est le nombre de conducteur par phase.

Les paramètres techniques de la ligne tels que D_{moy} et R_{eq} se trouvent sous le signe de \log_{10} , c'est pourquoi leur influence est assez faible.

On donne à titre d'exemple quelques valeurs de X_o :

6 à 10 KV	$X_o = 0,36 \Omega/\text{Km}$
35 KV	$X_o = 0,4 \Omega/\text{Km}$
110 KV	$X_o = 0,408 \Omega/\text{Km}$
220 KV	$X_o = 0,422 \Omega/\text{Km}$

Pour les lignes en câbles, le calcul de X_o est délicat, ainsi elle est déterminée expérimentalement à l'usine de fabrication où l'on donne les valeurs dans des catalogues.[5][6]

La réactance de la ligne est donc égale à :

$$X = X_o \cdot l \quad [\Omega] \quad (11)$$

II-2-4- Réactance transversale (Capacité) :

Nous pouvons assimiler les lignes aériennes à un condensateur qui est constitué de deux conducteurs (les conducteurs de phase et la terre). A cause de la présence des charges, sur ces deux conducteurs, le potentiel a des valeurs différentes sur ces deux-ci. Si nous prenons comme valeur du potentiel de la terre la valeur zéro (la référence), la valeur de la tension du conducteur de phase représente la différence de potentiel.

La relation linéaire qui lie la charge électrique ($q+$, $q-$) sur les deux conducteurs et la différence de potentiel entre ceux-ci est donnée par :

$$C = q / u \quad [F] \quad (12)$$

II-3- SYSTEMES EQUILIBRES ET DESEQUILIBRES :

Les réseaux sont dit "parfaitement équilibrés" si les amplitudes des courants de phase et les amplitudes des tensions phase-terre sont égales :

$$(I_1 = I_2 = I_3 = I \text{ et } U_1 = U_2 = U_3 = U).$$

Pour un système triphasé équilibré parfaitement, ceci se traduit par les système d'équations :

$$\begin{aligned} i_1 &= I \cdot \sin \omega t \\ i_2 &= I \cdot \sin (\omega t - 2\pi/3) = a^2 \cdot i_1 \\ i_3 &= I \cdot \sin (\omega t + 2\pi/3) = a \cdot i_1 \end{aligned} \quad (13)$$

Où : $I = \sqrt{2} \cdot I_{\text{eff}}$

Et $\sum_{k=1}^3 i_k = 0$

Ce qui signifie que la somme des courants de phase est nulle. [6]

$$\begin{aligned} U_{1n} &= U \cdot \sin \omega t \\ U_{2n} &= U \cdot \sin (\omega t - 2\pi/3) = a \cdot U_{1n} \\ U_{3n} &= U \cdot \sin (\omega t + 2\pi/3) = a^2 \cdot U_{1n} \end{aligned} \quad (14)$$

Où $U = \sqrt{2} \cdot U_{\text{eff}}$

et donc $\sum_{k=1}^3 U_{kn} = 0$

Ce qui signifie que la somme des tensions phase/neutre est nulle.

II-4- LES RESEAUX SYMETRIQUES :

Tous les réseaux électriques peuvent être représentés à l'aide d'une matrice d'impédance 'Z' telle que :

$$[U] = [Z] [I] \quad [V] \quad (15)$$

Où :

'U' est le vecteur tension phase/neutre et 'I' le vecteur courant de phase.

Tous les réseaux équilibrés peuvent être découplés et finalement être étudiés sur base d'un seul circuit monophasé équivalent dont les impédances dites « effectives » incluent les couplages entre phases. La résolution de ce seul circuit donne alors immédiatement la solution globale du circuit triphasé complet, il suffit de considérer un déphasage de 120° entre les différentes phases.

Tous les réseaux déséquilibrés peuvent également être découplés, mais ceci nécessite l'analyse de trois circuits séparés (régimes direct, inverse et homopolaire) dont les impédances sont différentes. L'intérêt de ce découplage est qu'il permet de supprimer les impédances mutuelles qui maintiennent un couplage fort entre phases.[6][7]

La notion mathématique de matrice trouve ici une application concrète d'un intérêt primordial et dont l'interprétation physique est évidente tant en régime équilibré (un seul système : direct) que déséquilibré (trois systèmes : direct, inverse et homopolaire).

Finalement, le système équilibré décrit par 1.15 peut se réduire à trois relations identiques (déphasées de 120°) si la matrice d'impédance 'Z' est de symétrie circulaire, soit :

$$\begin{pmatrix} U_1 \\ U_2 \\ U_3 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} Z_A & Z_B & Z_C \\ Z_B & Z_A & Z_C \\ Z_C & Z_B & Z_A \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} i_1 \\ i_2 \\ i_3 \end{pmatrix} \quad (16)$$

L'analyse du système total se réduit alors à l'étude d'une phase unique (gain de temps).

Si la matrice d'impédance est de symétrie complète ($Z_B = Z_C$), le système se réduit à trois relations identiques et nous pouvons, de nouveau, n'analyser qu'une phase.[8]

II-5-ETUDE DES CARACTERISTIQUES LONGITUDINALES :

II-5-1- Caractéristiques longitudinales :

Pour rendre compte des effets produits par la résistance des métaux qui constituent les conducteurs d'une ligne électrique et par la résistivité du sol considéré comme énième conducteur on introduit les notions de résistances rapportées à l'unité de longueur ou résistance linéique.

Pour rendre compte des effets des flux d'induction magnétique circulant autour et entre les conducteurs on introduit la notion d'induction linéique propre et mutuelle.

II-5-2- Caractéristiques transversales :

Les caractéristiques transversales rendent compte des effets des charges superficielles des conducteurs de phase et du sol. Les charges superficielles (le vecteur \vec{E} perpendiculaire à la surface des conducteurs) qui engendre (c.à.d. \vec{E}) des courants capacitifs et éventuellement des courants de fuite à cause de la matière isolante entre conducteurs, qui n'est pas parfaite ou si le seuil d'effet couronne est dépassé.

Les phénomènes capacitifs liant les charges superficielles au champ \vec{E} transversal, (donc aux tensions) sont représentés par des capacités linéiques C.

Les phénomènes de cette conduction transversale entre conducteurs dépendent des systèmes d'isolation utilisés pour maintenir les conducteurs isolés. C'est pour cela qu'on introduit les conductances G en parallèle avec les capacités C . [8]

II-6-CONCLUSION :

Dans ce chapitre, on a définie les différentes paramètres électriques d' une ligne aérienne (la Résistance R , l' inductance L et la capacité C), pour différente types biphasé , triphasé , double circuit.

D'après c'est définitions on peut conclure et désigne que le champ électriques et magnétique rayonné par les lignes électriques ont des relations directe avec ces paramètres électriques et positionnement des ces conducteur et vis avis a l' hauteur des lignes para port a la terre.

CHAPITRE

III :

CALCUL DE CHAMP ELECTRIQUE DANS LES LIGNES AERIENNES

III-1- INTRODUCTION :

Les champs électriques et magnétiques engendrés par les lignes de transport à haute tension interagissent avec l'environnement.

Les perturbations électromagnétiques associées sont limitées par les normes générales sur la compatibilité électromagnétique et par les directives 89/336, 92/31 et 93/68/CEE du Conseil de la Communauté Européenne.

Ces perturbations sont analysées et les résultats des recherches sont communiqués dans plusieurs travaux de spécialité.

Ce travail s'encadre dans ces préoccupations, ayant comme but de calculer le champ électrique d'une ligne aérienne à haute tension, circuit simple, à l'aide de méthodes numériques.

On détermine ainsi d'une part les valeurs du champ électrique à 1,8 m au-dessus du sol et d'autre part les capacités partielles de la ligne. Les valeurs du champ sont comparées avec les valeurs maximales (5 kV/m applicables au public et 10 kV/m pour les professionnels), recommandées par la directive 519/1997 du Conseil de l'Union Européenne, [9].

La formulation d'un problème de régime électrostatique exige que l'analyse du champ électrique soit réalisée séparément de l'analyse du champ magnétique quasi-statique [9], [10], [11].

L'exposé suivant présente quelques relations de calcul utiles pour l'analyse du champ électrique et pour la détermination de certains paramètres de la ligne électrique [9].

Une ligne électrique de transport avec fil de garde représente un system de conducteurs soumis à un system triphasé symétrique de tensions électriques sinusoïdales.

Elle se comporte comme une source de champs électriques et magnétiques sinusoïdales de fréquence basse (50 Hz).

Le système triphasé de tensions électriques sinusoïdales de séquence positive est donné par :

$$\underline{U} = \begin{bmatrix} 1 \\ a^2 \\ a \end{bmatrix} \cdot U = \begin{bmatrix} 1 + j0 \\ -\frac{1}{2} + j\frac{\sqrt{3}}{2} \\ -\frac{1}{2} - j\frac{\sqrt{3}}{2} \end{bmatrix} \cdot U \quad (17)$$

Où U représente la valeur efficace de la tension électrique de phase (phase par rapport à la terre).

III-2-ÉQUATIONS DE MAXWELL EN COMPLEXE POUR LES COEFFICIENTS DE POTENTIEL :

Pour une ligne électrique triphasée avec fil de garde, ces équations sont:

$$\begin{bmatrix} \underline{V}_1 \\ \underline{V}_2 \\ \underline{V}_3 \\ 0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} P_{11} & P_{12} & P_{13} & P_{14} \\ P_{21} & P_{22} & P_{23} & P_{24} \\ P_{31} & P_{32} & P_{33} & P_{34} \\ P_{41} & P_{42} & P_{43} & P_{44} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \underline{q}_1 \\ \underline{q}_2 \\ \underline{q}_3 \\ \underline{q}_4 \end{bmatrix} \quad (18)$$

Ou bien

$$[\underline{V}] = [p] [q] \quad (19)$$

Les coefficients de potentiel, [p], sont de paramètres réels de la ligne qui vérifient aussi les équations (18) ou (19) écrites pour les parties réelles et pour les parties imaginaires des potentiels et des charges électriques :

$$[\underline{VR}] = [p][q R] \quad (20)$$

$$[\underline{VI}] = [p][q I] \quad (21)$$

Équations de Maxwell pour coefficients capacitifs, [c], posées sous forme matricielle, sont:

$$\begin{bmatrix} \underline{q}_1 \\ \underline{q}_2 \\ \underline{q}_3 \\ \underline{q}_4 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} C_{11} & C_{12} & C_{13} & C_{14} \\ C_{21} & C_{22} & C_{23} & C_{24} \\ C_{31} & C_{32} & C_{33} & C_{34} \\ C_{41} & C_{42} & C_{43} & C_{44} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \underline{V}_1 \\ \underline{V}_2 \\ \underline{V}_3 \\ 0 \end{bmatrix} \quad (22)$$

Ou bien

$$[q] = [c][V] = [p]^{-1} [V]. \quad (23)$$

III-2-2- Équations de Maxwell pour coefficients capacitifs :

Celles-ci s'obtiennent à partir des équations pour coefficients capacitifs (22). Pour les établir, on considère le potentiel de référence nul ($V_0=0$ (V)) au niveau de la terre, on néglige la charge du câble de garde et par un groupement adéquate de termes on obtient:

$$\begin{bmatrix} \underline{q}_1 \\ \underline{q}_2 \\ \underline{q}_3 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} C_{10} & C_{12} & C_{13} \\ C_{21} & C_{20} & C_{23} \\ C_{31} & C_{23} & C_{30} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \underline{U}_{10} & \underline{U}_{12} & \underline{U}_{13} \\ \underline{U}_{21} & \underline{U}_{22} & \underline{U}_{23} \\ \underline{U}_{31} & \underline{U}_{32} & \underline{U}_{33} \end{bmatrix} \quad (24)$$

Ou, après l'identification des coefficients, il vient

$$C_{i0} = \sum_{j=1}^3 C_{ij}, i = 1,2,3; C_{ij} = -c_{ij} = C_{ji}, i \neq j; \underline{U}_{i0} = \underline{V}_i - \underline{V}_0; \underline{U}_{ij} = \underline{V}_i - \underline{V}_j \quad (25)$$

III-3-CALCUL DE L'INTENSITE DU CHAMP ELECTRIQUE ET DES CHARGES ELECTRIQUES DES CONDUCTEURS DE LA LIGNE :

III-3-1- Procède De Calcul De L'intensité Du Champ Electrique, A L'aide Des Eléments Finis :

Le domaine du champ électrique de la ligne aérienne est superposé sur la région voisine et s'étend vers l'infini. L'analyse du champ sera réalisée dans un plan vertical perpendiculaire par rapport à la ligne électrique, car le problème présente une symétrie plan-parallèle.

En considérant le potentiel égale à zéro au niveau de la terre ($V_P=V_0=0V$), le domaine du champ s'étend dans le demi-espace infini au-dessus du sol.

Il faut établir un frontière finie du champ d'intérêt au voisinage de la ligne, ceci étant possible par de différents procédés montrés dans la littérature technique (le ballonnement de frontière, frontière circulaire avec conditions asymptotiques, frontière circulaire avec conditions périodiques (de continuité) par la transformation de Kelvin [12], [13], [14], [15], [16]). L'exposé suivant présent le procédé de la transformation de Kelvin appliqué sur le demi espace situé au-dessus du sol. La frontière finie du domaine est demi-circulaire, de rayon r_0 , ayant de conditions de type périodique (de continuité du potentiel).

La transformation de Kelvin est définie par l'expression :

$$R = r_0^2 / r \quad (26)$$

et elle transforme un domaine du champ infini (avec $r_0 \leq r < \infty$) dans une région finie demi-circulaire de même rayon, r_0

Le procédé de délimitation de la frontière du domaine du champ exige les actions suivantes:

(1) Le domaine de champ dans le demi-espace infini (fig.III.1) est divisé en deux régions (sous régions) :

- une première région intérieure demi-circulaire, D_i , de rayon r_0 , ayant la frontière θ_0 qui ferme Les sources de champ et délimite la région d'intérêt en voisinage de la ligne.

- deuxième région sans sources, D_e , à l'extérieur de l'autre, (avec $r_0 \leq r < \infty$, $0 \leq \theta \leq \pi$) dans cette région le potentiel vérifie l'équation de Laplace.

(2) La région extérieure infini, D_e est transformée par la transformation de Kelvin, dans une région finie demi-circulaire, D' ayant le rayon r_0 égale au rayon de la première région.

Dans le domaine infini, De le potentiel $V(r, \theta)$, ($r_0 \leq r < \infty$), ($0 \leq \theta \leq \pi$), vérifie l'équation de Laplace écrite en coordonnées polaires

$$\frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(r \frac{\partial V}{\partial r} \right) + \frac{1}{r^2} \frac{\partial^2 V}{\partial \theta^2} = 0 \quad (27)$$

Lorsqu'on applique la transformation de Kelvin il en résulte le changement de la variable conformément à l'expression (26).

Par conséquent, dans le domaine De le nouveau potentiel $V(R, \theta)$, ($0 < R \leq r_0$), ($0 \leq \theta \leq \pi$), après certaines opérations simples, vérifie l'équation de Laplace:

$$\frac{1}{R} \frac{\partial}{\partial R} \left(R \frac{\partial V}{\partial R} \right) + \frac{1}{R^2} \frac{\partial^2 V}{\partial \theta^2} = 0 \quad (28)$$

A' la raison que les équations (27) et (28) ont des formes identiques, le potentiel électrique est une fonction continue sur les deux frontières demi-circulaires des domaines, Di et De'

Il vient que sur les deux frontières demi-circulaires s'impose une condition périodique :

$$V(r = r_0, \theta) = V(R = r_0, \theta) \quad (29)$$

Qui demande la continuité du potentiel sur les frontières de deux domaines. Dans la deuxième région demi circulaire, De', pour assurer l'unicité de la solution s'impose la valeur nulle du potentiel en le point central, $V(R = 0) = 0$ qui correspond au potentiel nul à l'infini, ($V_{\infty} = 0$), en le domaine initial infini.

Mais, les deux diamètres des régions demi-circulaires se superposent au-dessus du sol, par conséquent, le potentiel est forcé de prendre l'avaleur zéro. Le procédé numérique a un avantage essentiel concernant la précision du calcul, mais il nécessite plus de mémoire et temps de calcul pour l'analyse du champ en le deuxième domaine extérieur, De' où le champ ne présente pas d'intérêt.

L'analyse avec éléments finis du champ électrique de la ligne se fait avec le logiciel FEMM [15] qui contient la variante de la transformation de Kelvin pour conditions sur frontière.

La résolution d'un problème de champ électrostatique est réalisée d'abord pour les parties réelles, puis pour les parties imaginaires des tensions électriques complexes.

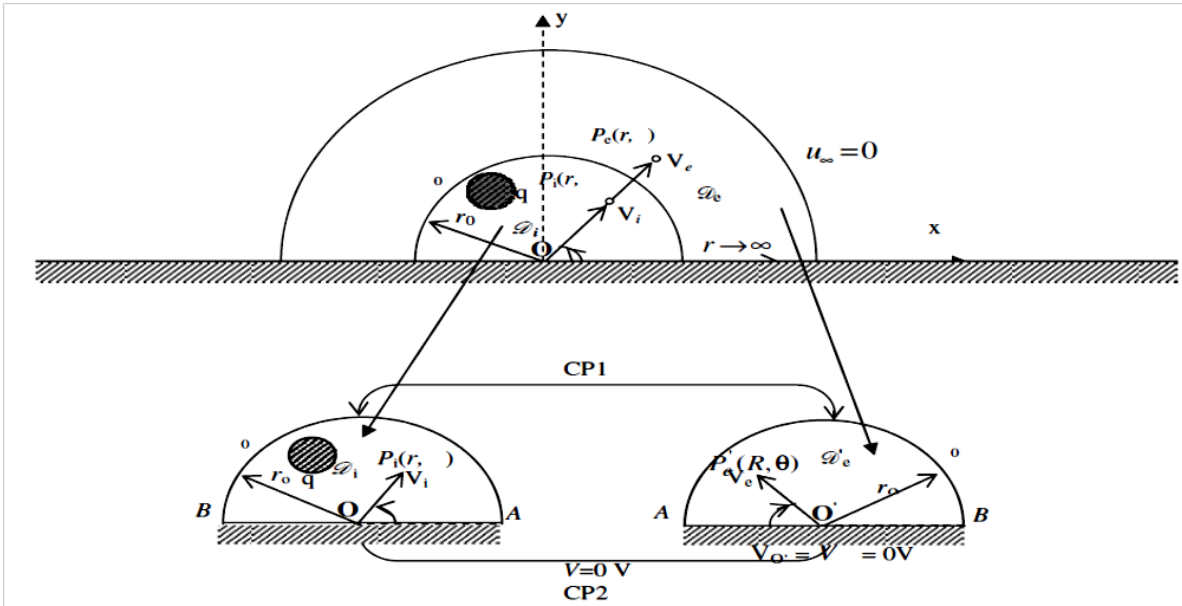


Fig. III.1: La frontière du domaine de champ électrique, AB_0, obtenue par la transformation de Kelvin

L'intensité complexe du champ électrique, dans le point P en voisinage de la ligne, est obtenue par la superposition des deux composantes : réelle et imaginaire.

Pour la composante réelle, le vecteur d'intensité du champ électrique s'écrit :

$$\vec{E}_R(P) = E_{x,R}(P) \cdot \vec{i} + E_{y,R}(P) \cdot \vec{j} \quad (30)$$

et le champ résultant est calculé à l'aide de l'expression :

$$E_R(P) = \sqrt{E_{x,R}(P)^2 + E_{y,R}(P)^2} \quad (31)$$

D'expressions analogues s'écrivent pour la composante imaginaire de l'intensité du champ électrique.

III-3-2- Procédé de calcul des charges électriques.

Les charges électriques portées par le câble de garde et par chacun de conducteurs actifs, se déterminent par la prospection de la solution numérique du problème de champ électrostatique résolu à l'étape précédente.

En fonction de l'induction électrique sur les surfaces des conducteurs, les charges se calculent numériquement pour les deux composantes, réelle et imaginaire, avec l'expression intégrale générale :

$$q_k = \int_{s_k} D_{n,k} ; k = 1,2,3, \quad (32)$$

Où Don, k est la composante normale, réelle ou imaginaire, de l'induction électrique sur la surface du conducteur k.

La charge résultante du conducteur k se calcule avec l'expression :

$$q_k = \sqrt{q_{R,k}^2 + q_{L,k}^2}; k = 1,2,3, \quad (33)$$

La connaissance des charges électriques est nécessaire pour le calcul, avec les expressions recommandées par CIGRÉ, de l'intensité du champ électrique, des capacités partielles et du niveau des perturbations électromagnétiques [9].

III-4- CALCUL DES CAPACITÉS PARTIELLES DE LA LIGNE ÉLECTRIQUE :

III-4-1- Calcul des coefficients d'influences (capacitifs) :

Ces coefficients interviennent dans les équations de Maxwell (22) et se déterminent numériquement, en cet ouvrage, par la solution du problème du champ électrostatique de la ligne électrique triphasée.

Le procédé de calcul. On considère la ligne triphasée ayant une tension électrique non nulle arbitraire sur un conducteur de phase seulement, les autres tensions des conducteurs de phase étant égales à zéro.

Le procédé s'applique successivement, pour tous les conducteurs.

L'expression de calcul, pour les quatre variantes du problème du champ électrique analysées successivement, sont :

$$\begin{aligned} C_{1j} &= \left. \frac{q_j}{V_1} \right|_{V_2 = V_3 = V_4 = 0}; C_{2j} = \left. \frac{q_j}{V_2} \right|_{V_1 = V_3 = V_4 = 0}; \\ C_{3j} &= \left. \frac{q_j}{V_3} \right|_{V_1 = V_2 = V_4 = 0}; C_{4j} = \left. \frac{q_j}{V_4} \right|_{V_1 = V_2 = V_3 = 0} \end{aligned} \quad (34)$$

III-4-2- Les capacités partielles de la ligne triphasée :

Interviennent dans les schémas électriques équivalents de la ligne et se calculent à l'aide des expressions (25) à partir des coefficients d'influences déterminés au-dessus.

III-5- RESULTATS DU CALCUL :

On considère une ligne électrique aérienne triphasée à haute tension ayant l'arrangement et les coordonnées géométriques, rapportées au pylône de suspension, montrée dans la fig.III.2 (l'exemple est présenté dans [9]).

Phase de la ligne (L1, L2, L3,) est constituée d'un faisceau de deux conducteurs séparés par 45 cm.

Le rayon d'un conducteur est de 1,58 cm et le rayon du câble de garde (L4) est de 1,12 cm ce dernier ayant un conducteur seulement.

On peut supposer que les conducteurs soient parallèles au sol et passent par le centre de gravité de la parabole formée entre deux pylônes de suspension.

Les distances de calcul entre les conducteurs de phase, le câble de garde et sol sont indiquées dans la fig.III.2.

La tension de ligne (phase-phase) est de 380 kV et la tension de phase (phase-terre) est de 220 kV.

Le système de tensions de phase est considéré symétrique et de succession directe (positive).

On analyse le champ électrique de la ligne, en considérant qu'il est invariant pour n'importe quelle section transversale (arbitrairement choisie) de la ligne, l'utilisation le logiciel de calcul numérique avec éléments finis, FEMM, conformément au procédé présenté en ce partie.

D'abord le calcul d'intensité du champ électrique à 1,8 m de hauteur et les coefficients capacitifs de la ligne.

Les valeurs obtenues sont comparées avec les valeurs calculées.

III-5-1- Calcul des coefficients capacitifs et des charges électriques portées par les conducteurs :

En appliquant le procédé avec éléments finis présenté au-dessus ont été déterminées les valeurs des coefficients capacitifs, montrées en table 1 et les valeurs des charges électriques des conducteurs de la ligne, montrées en table 2. Pour comparaison, en tables sont présentées aussi les valeurs obtenues avec la méthode [9].

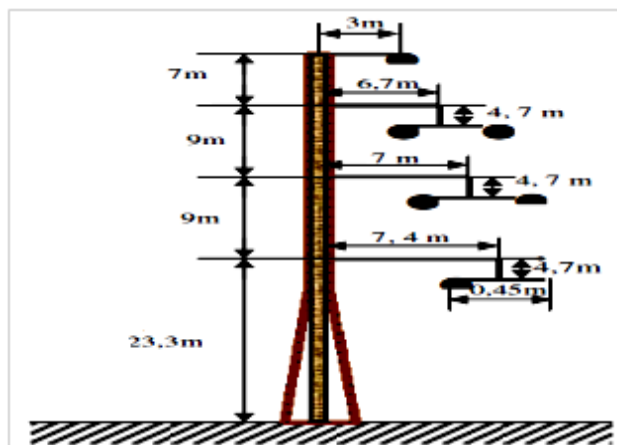


Fig.III.2: Le pylône et les positions des conducteurs de la ligne électrique

III-5-2- Calcul de l'intensité du champ électrique à 1,8 m de hauteur peut se faire en deux variantes :

Première variante:

Les composantes du vecteur E sur les deux axes, x et y, sont fonctions sinusoidale orthogonales, et leurs valeurs en complexe sont données par les expressions:

$$\underline{E}_x = E_{x,R} + jE_{x,I} ; \underline{E}_y = E_{y,R} + jE_{y,I} \quad (35)$$

Où les indices R et I signifient les parties réelles, respectivement imaginaires.

Par la composition des deux grandeurs sinusoidales, la résultante du vecteur intensité du champ électrique décrit une ellipse à une période d'évolution en temps, dans le système rectangulaire d'axes Ex et Ey.

La valeur résultante maximale du champ électrique peut être calculée avec l'expression [10]:

$$E_{rez} = \frac{1}{2} \sqrt{(E_{x,R} - E_{y,R})^2 + (E_{x,R} + E_{y,R})^2} + \frac{1}{2} \sqrt{(E_{x,R} + E_{y,R})^2 + (E_{x,R} - E_{y,R})^2} \quad (36)$$

La Méthode CIGRE' [1]	$[c] = \begin{bmatrix} 9,5025 & -2,41095 & -0,99696 & -0,41757 \\ -2,41095 & 9,97353 & -2,2964 & -0,7361 \\ -0,41757 & -2,2964 & 9,7882 & -1,59469 \\ -0,41757 & -0,73618 & -1,59469 & 6,49166 \end{bmatrix} \cdot 10^{-12} [C/V]$
La Méthode des éléments finis	$[c] = \begin{bmatrix} 8,71302 & -2,15120 & -0,92005 & -0,11235 \\ -2,14504 & 8,81296 & -1,93301 & -0,51422 \\ -0,92013 & -1,93592 & 9,30415 & -0,31296 \\ -0,12699 & -0,51369 & -0,31123 & 6,12010 \end{bmatrix} \cdot 10^{-12} [C/V]$

Tableau 1 : les valeurs des coefficients capacitives de la ligne électrique aérienne

La Méthode CIGRE' [1]	$[q] = \begin{bmatrix} 2,458448 - j0,268731 \\ -1,371201 + j2,331382 \\ -1,040633 - j2,296298 \\ -0,223224 - j0,060564 \end{bmatrix} \cdot 10^{-6} [\frac{C}{m}]$	$\begin{bmatrix} q_1 \\ q_2 \\ q_3 \\ q_4 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 44477,59 \\ 68643,84 \\ 45340,84 \\ 4159,74 \end{bmatrix} \cdot 2\pi\epsilon_0 = \begin{bmatrix} 2,473092 \\ 2,704736 \\ 2,521092 \\ 0,231294 \end{bmatrix} \cdot 10^{-6} [\frac{C}{m}]$
--------------------------------	---	--

La Méthode des éléments finis	$\begin{bmatrix} q \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 2,25007 - j0,234066 \\ -1,22784 + j2,04690 \\ -1,00959 - j2,14203 \\ -0,152391 - j0,038471 \end{bmatrix} \cdot 10^{-6} \left[\frac{C}{m} \right]$	$\begin{bmatrix} q_1 \\ q_2 \\ q_3 \\ q_4 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 40754,59 \\ 44309,204 \\ 42590,287 \\ 2826,798 \end{bmatrix} \cdot 2\pi\epsilon_0$ $= \begin{bmatrix} 2,26605 \\ 2,46373 \\ 2,36802 \\ 0,15717 \end{bmatrix} \cdot 10^{-6} \left[\frac{C}{m} \right]$
---	---	--

Tableau 2 : les valeurs complexes et les amplitudes de charges électriques sur le conducteur de la ligne

Deuxième variante:

La valeur résultante de l'intensité du champ électrique peut être calculée à l'aide de l'expression recommandée par CGRE [9].

L'expression d'intensité du champ, dans les points situés au niveau de la terre ($-60m \leq x \leq 60m$, $y=0$ m):

$$E_{rez}(x) = \frac{1}{2\pi\epsilon_0} \cdot \left[\frac{q_1 \cdot 41,3}{[(x - 6,7)^2 + 41,3^2]^{\frac{3}{2}}} + \frac{q_2 \cdot 32,3}{[(x - 7)^2 + 32,3^2]^{\frac{3}{2}}} + \frac{q_1 \cdot 23,3}{[(x - 7,4)^2 + 23,3^2]^{\frac{3}{2}}} + \frac{q_1 \cdot 53,5}{[(x - 3)^2 + 53,5^2]^{\frac{3}{2}}} \right] \quad (37)$$

Peut être généralisée pour chaque point du champ électrique de la ligne.

Dans la figure 3 est représentée l'intensité du champ électrique à 1,8 m de hauteur, en voisinage du pylône de suspension.

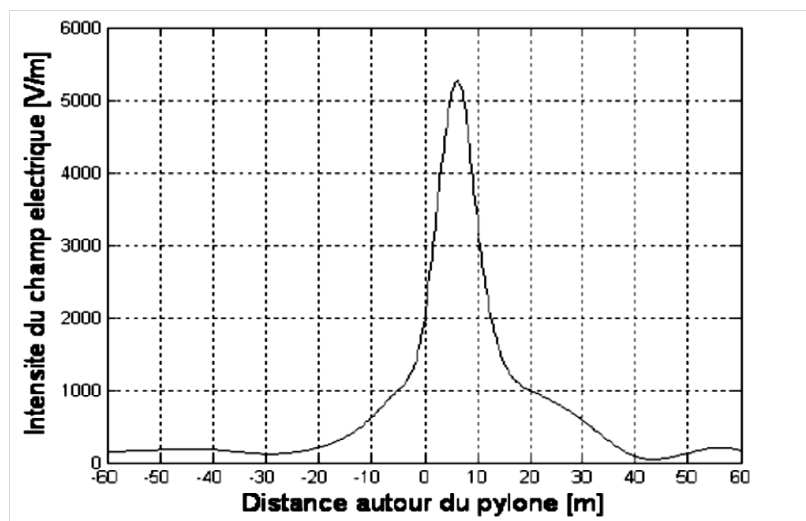


Fig.III.3:Le électrique de la ligne électrique à 1,8 m au-dessus du sol champ.[17]

Les calculs sont basés sur l'expression (36). On observe que la valeur maximale de l'intensité du champ électrique, $E_{\max} = 5,170 \text{ kV/m}$, près de pylône de suspension pris comme axe de référence, à $x = 7\text{m}$, dépasse peu la valeur de 5 kV/m recommandée par les normes d'UE [17].

III-6-CONCLUSION :

L'analyse par la méthode des éléments finis du champ électrique appliquée à la ligne électrique de transport prend en considération la structure réelle des lignes électriques aériennes à haute tension ayant les phases constituées d'un faisceau de deux conducteurs séparés. Par comparaison, la méthode d'images des charges électriques (la méthode CIGRE) réalise l'analyse en remplaçant les conducteurs en parallèle de la ligne par un seul conducteur équivalent, ce qui produit d'erreurs supplémentaires de calcul.

D'après l'analyse d'exemple de calcul, on observe que les valeurs d'intensité du champ électrique, les charges électriques et les coefficients capacitifs, déterminés numériquement, sont comparables par rapport à grandeurs déterminées par le calcul analytique qui utilise des hypothèses simplificatrices.

En conséquence, l'analyse avec éléments finis, en utilisant la transformation de Kelvin pour les domaines de champ ayant de frontières ouvertes, est un procédé numérique alternatif pour les méthodes analytiques de calcul du champ électrique d'une ligne électrique aérienne.

CHAPITR

IV:

SIMULATION

IV-1-INTRODUCTION :

Nous sommes intéressés Dans ce dernier chapitre à la détermination des répartitions du potentiel et du champ électriques autour d'une ligne aérienne. Pour cela, nous avons utilisé le logiciel COMSOL.

Différente modelés des lignes ont été pris à savoir, triphasé, monophasé et la disposition des conducteurs.

IV-2-SIMULATION :

- Ligne monophasée :

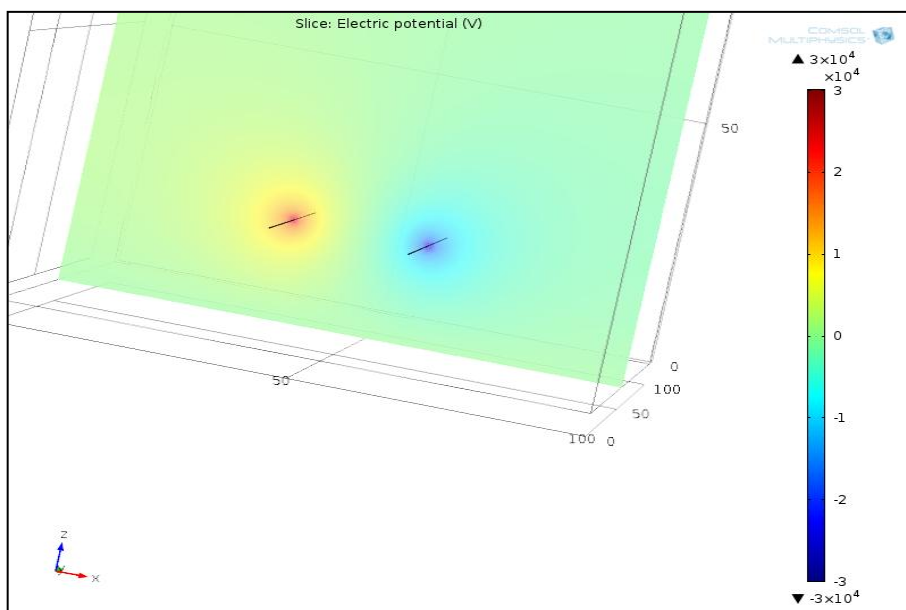


Fig. IV.1: Distribution du potentiel autour d'une ligne électrique monophasé.

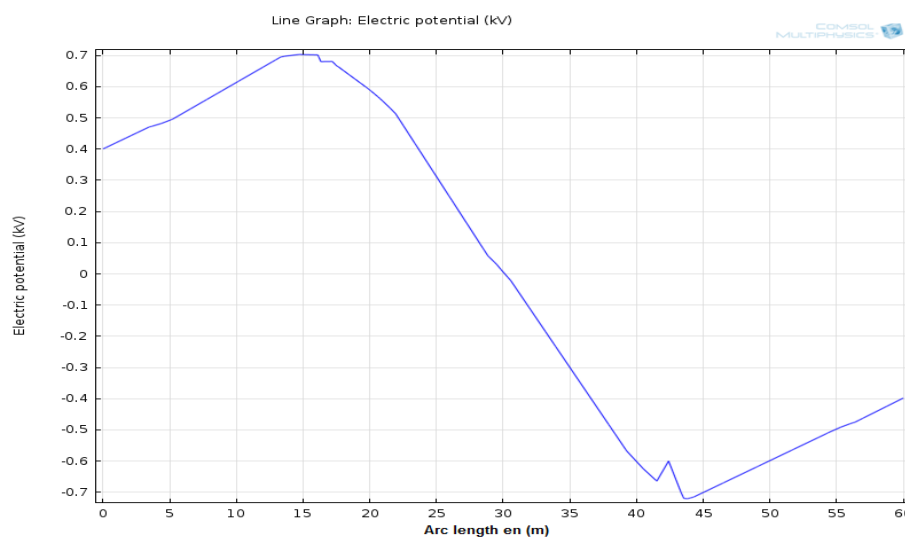


Fig. IV.2: Potentiel électrique au-dessus de la ligne aérienne monophasé à 2 mètre d'hauteur.

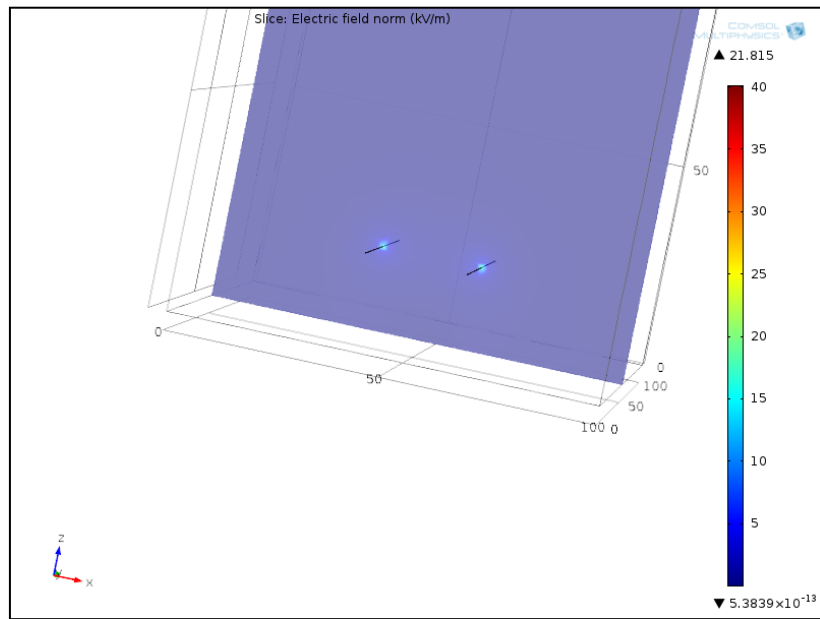


Fig. IV.3: Distribution du champ électrique autour d'une ligne électrique monophasé.

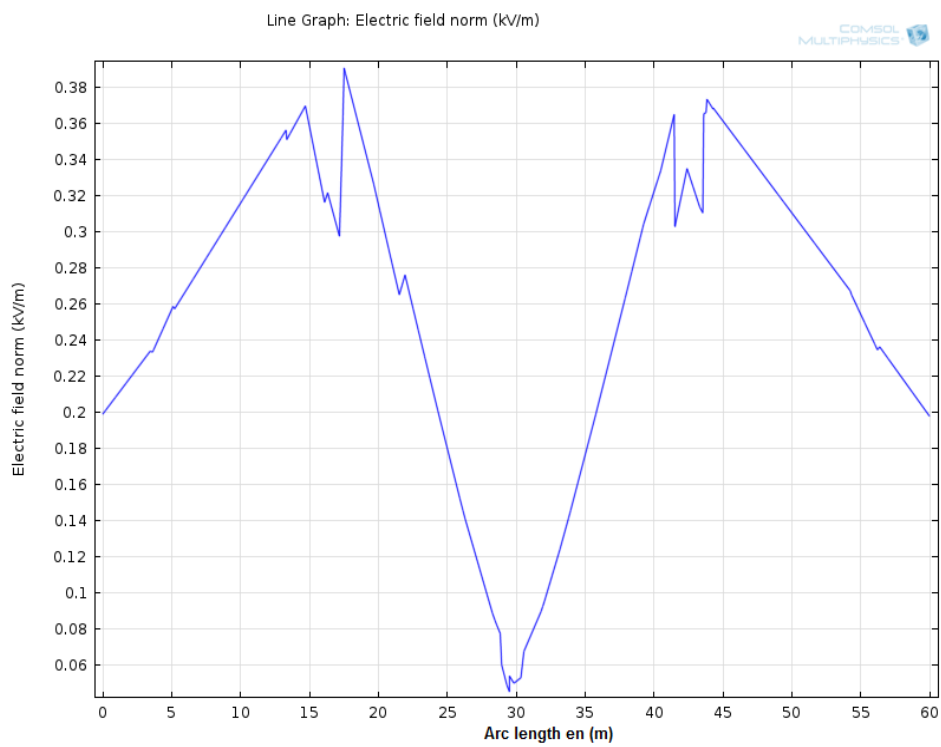


Fig. IV.4: champ électrique au-dessus de la ligne aérienne monophasé à 2 mètre d'hauteur.

- Ligne triphasé en position nappe :

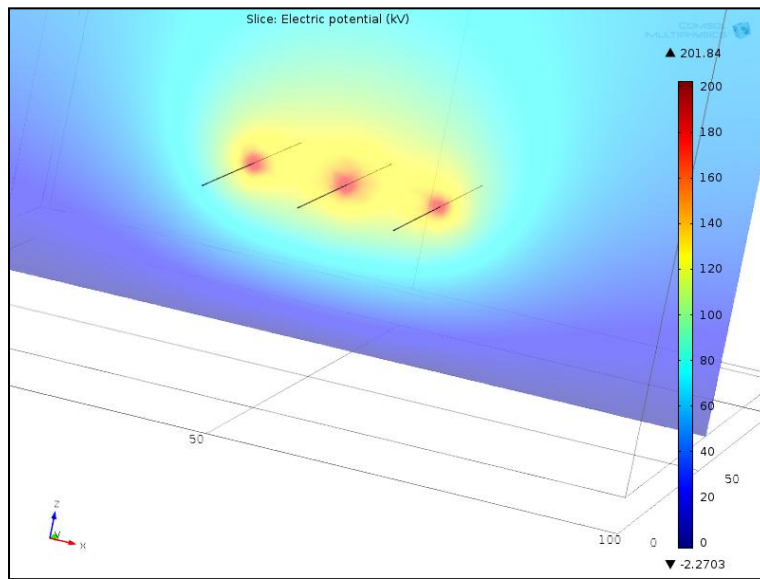


Fig. IV.5: Distribution du potentiel autour d'une ligne électrique triphasée en nappe.

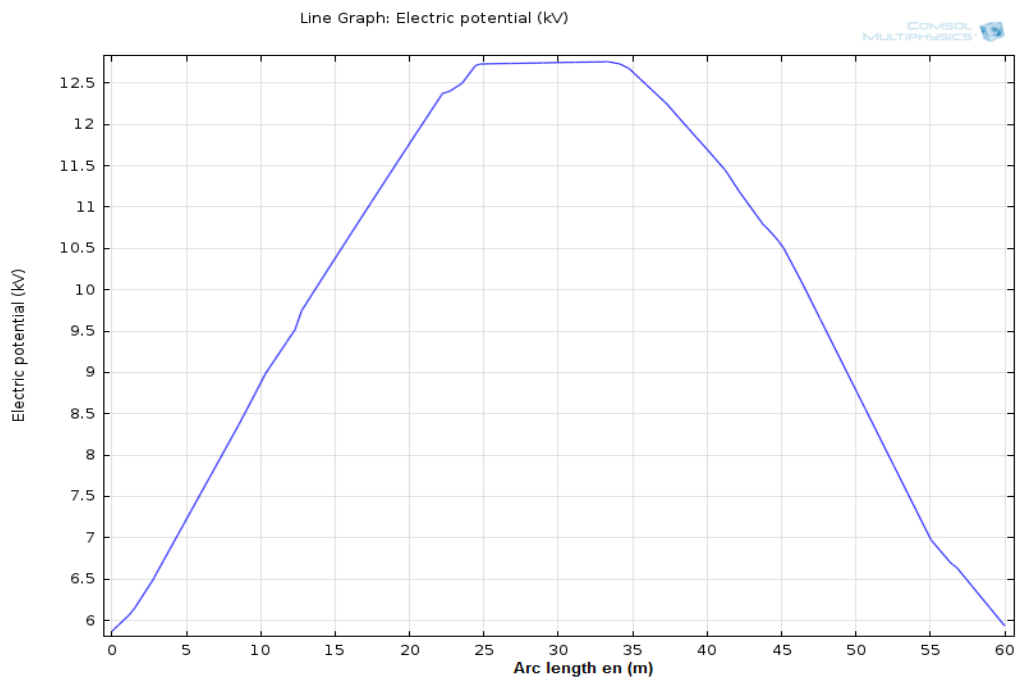


Fig. IV.6: Potentiel électrique au-dessus de la ligne aérienne triphasée en nappe à 2 mètre d'hauteur.

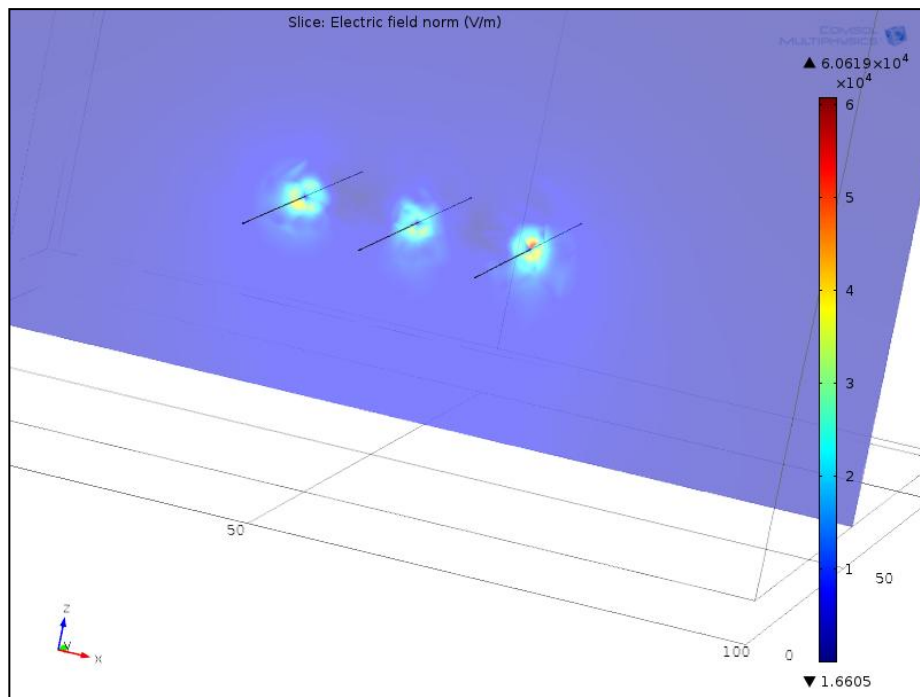


Fig. IV.7 : Distribution du champ électrique autour d’une ligne électrique triphasée en nappe.

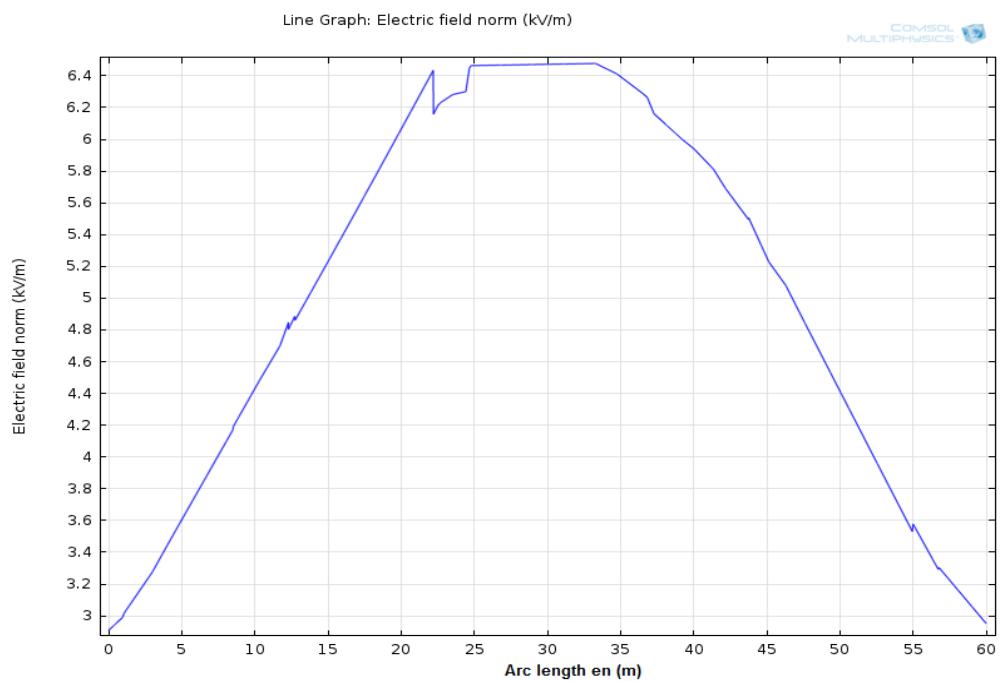


Fig. IV.8: champ électrique au-dessus de la ligne aérienne triphasée en nappe à 2 mètre d’hauteur.

- Ligne triphasé en position triangle :

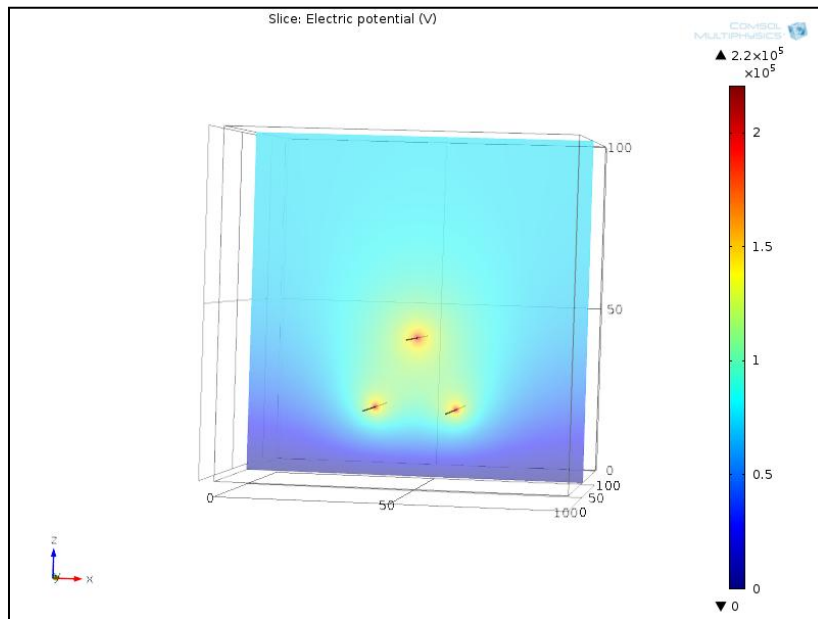


Fig. IV.9 : Distribution du potentiel autour d'une ligne électrique triphasé en position triangle .

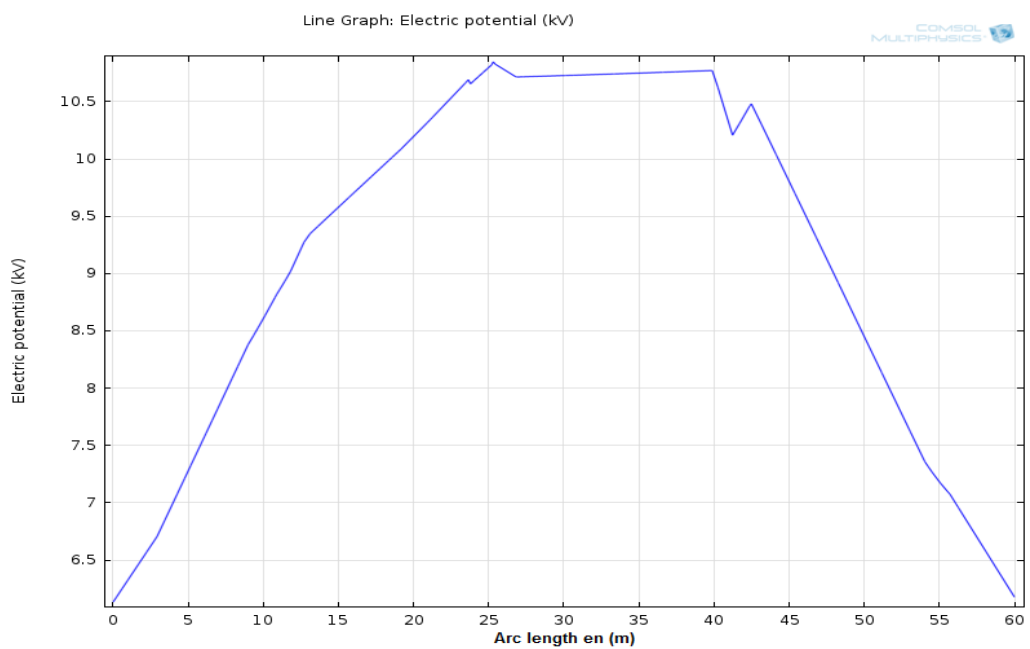


Fig. IV.10: Potentiel électrique au-dessus de la ligne aérienne triphasé en position triangle à 2 mètre d'hauteur.

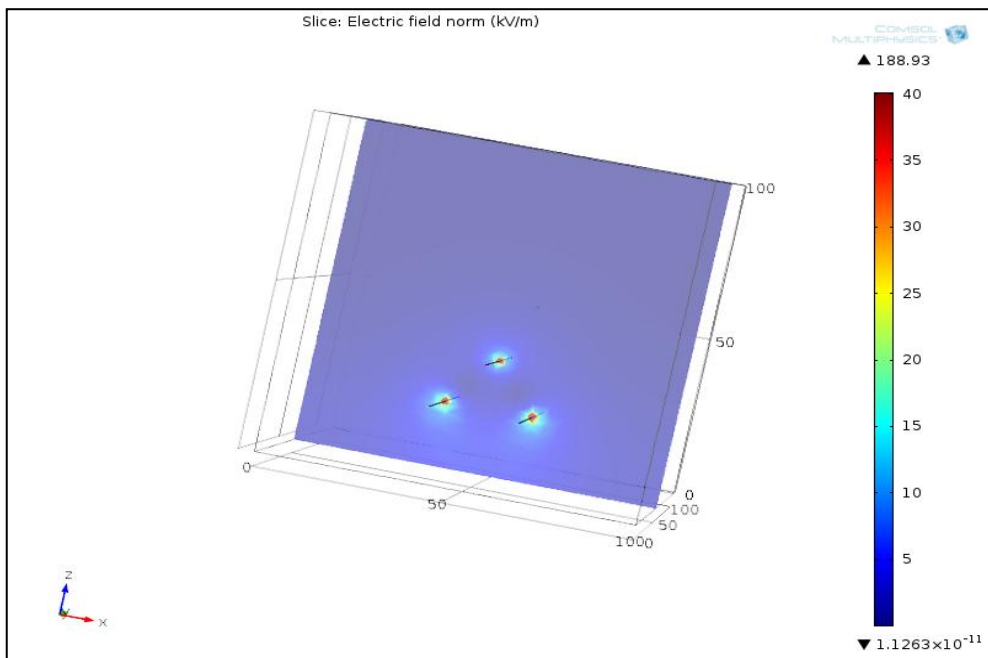


Fig. IV.11 : Distribution du champ électrique autour d'une ligne électrique triphasé en position triangle .

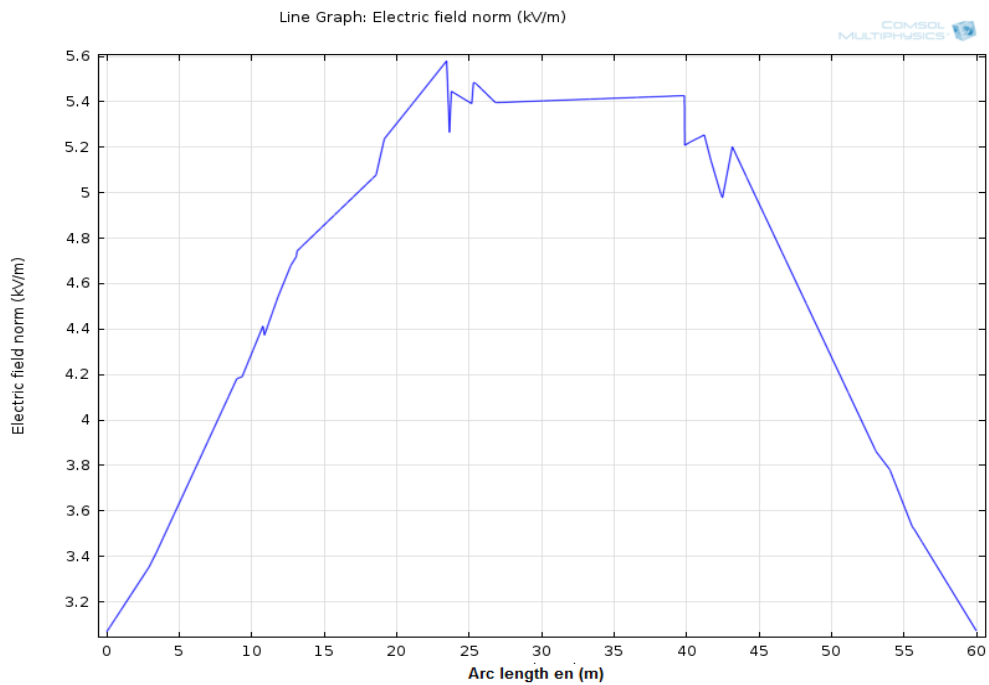


Fig. IV.12: champ électrique au-dessus de la ligne aérienne triphasé en position triangle à 2 mètre d'hauteur.

- Ligne triphasé triangle en double circuit :

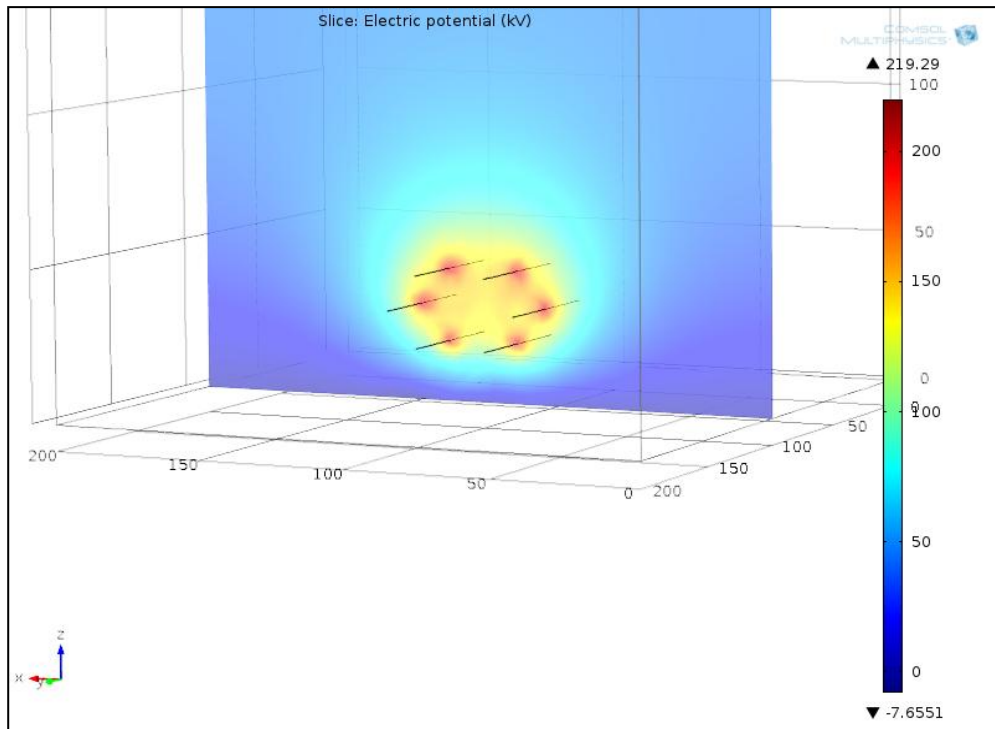


Fig. IV.13 : Distribution du potentiel autour d'une ligne électrique triphasé triangle en double circuit .

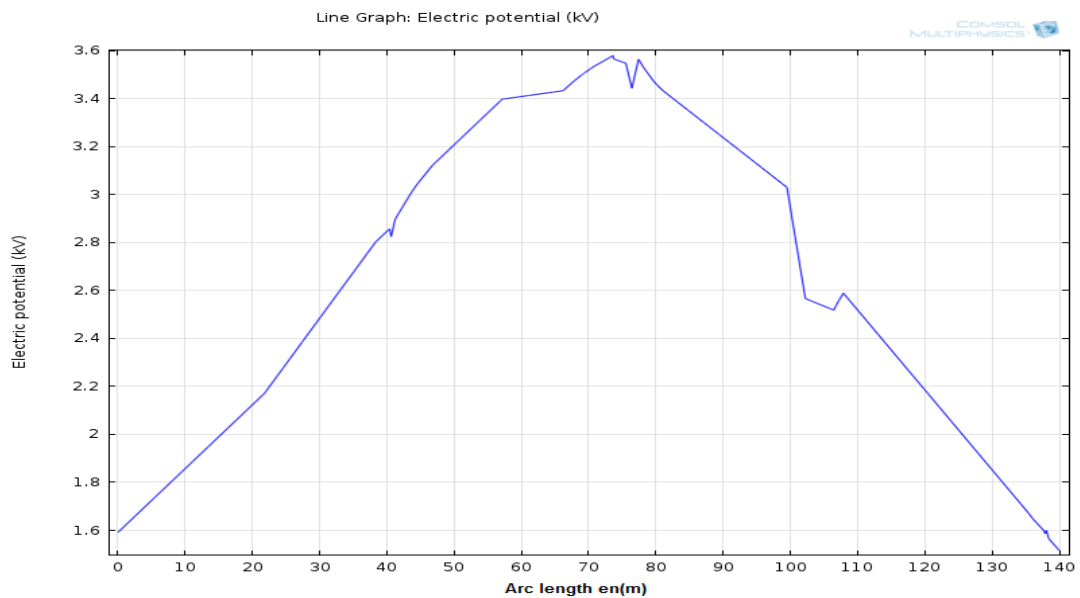


Fig. IV.14: Potentiel électrique au-dessus de la ligne aérienne triphasé triangle en double circuit à 2 mètre d'hauteur.

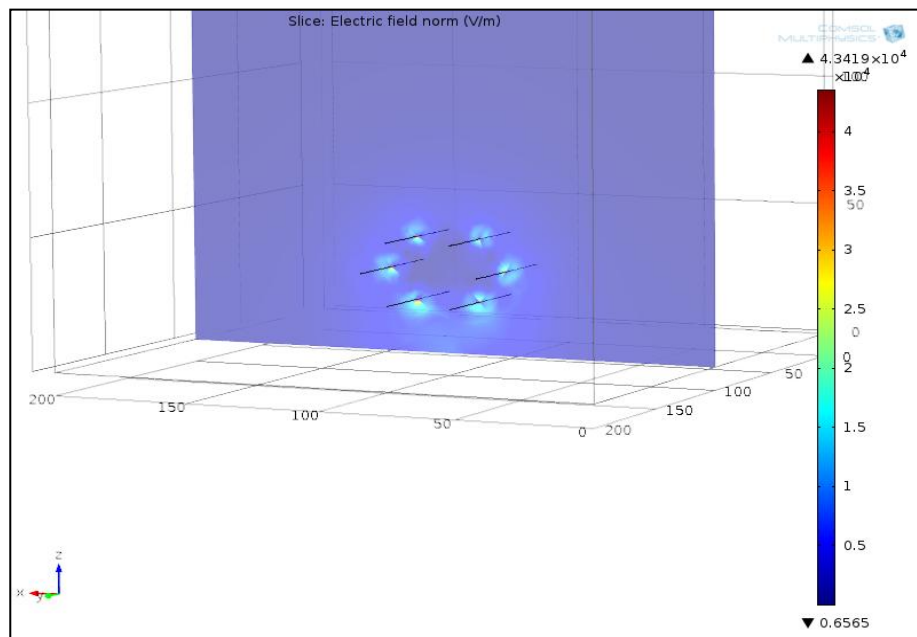


Fig. IV.15: Distribution du champ électrique autour d'une ligne électrique triphasé triangle en double circuit .

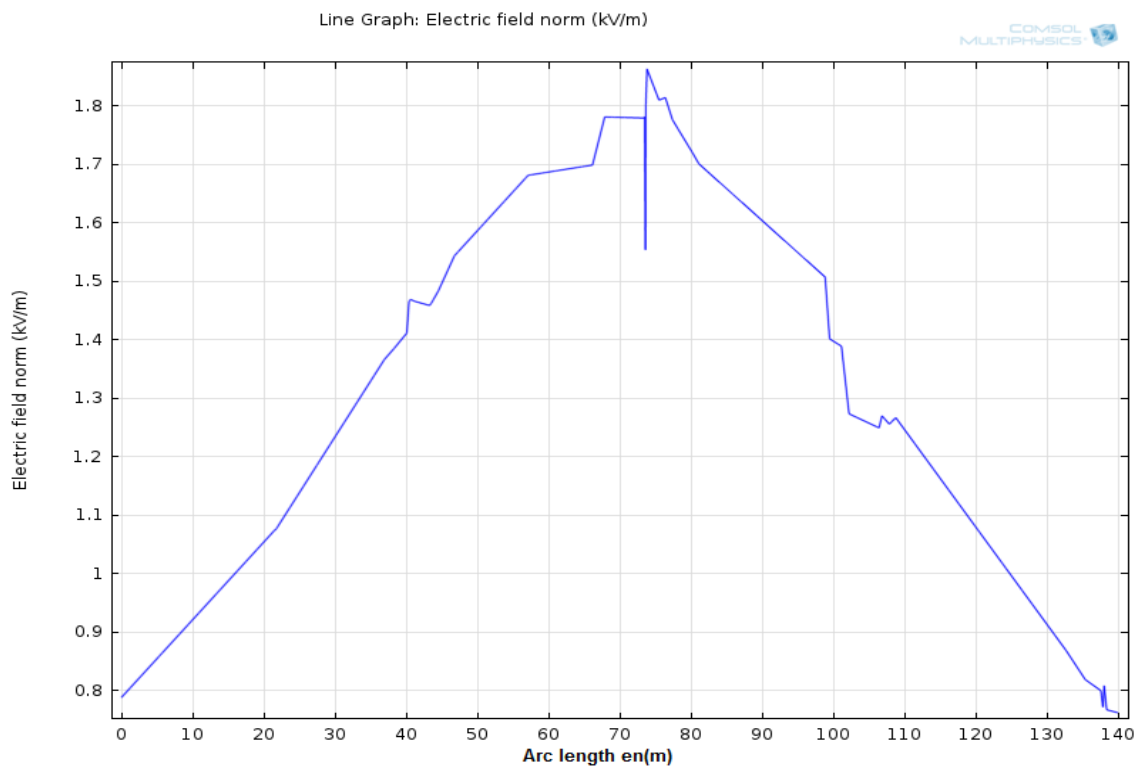


Fig.IV.16: champ électrique au-dessus de la ligne aérienne triphasé triangle en double circuit à 2 mètre d'hauteur.

IV-3 :CONCLUSION :

Utilisant le logiciel COMSOL Multiphasiques, basé sur la méthode des éléments finis, nous avons pu analyser les distributions du potentiel et du champ électriques au-dessus des différents modèles des lignes aériennes, Comme principaux résultats, nous pouvons dire que la répartition du champ électrique est plus élevée au dessous des conducteurs en cas monophasé et au-dessus du centre de la distance géométriques équivalente pour les autres cas. Nous avons vu également que la distribution du potentiel autour de la ligne électrique est pratiquement identique à chaque type de ligne triphasé. Par ailleurs, la distribution de potentiel auprès du conducteur sont très dense. La tension appliquée affecte uniquement les valeurs du potentiel et du champ électriques, mais pas leurs formes.

Par contre, si en déplaçant plus loin au-dessous du centre d'ensemble des conducteurs de la ligne étudié le champ est presque nulle (négligeable) pour 30 mètres de longueur.

CONCLUSION GENERALE

Dans le présent travail, on a dominant les composantes et les paramètres électrique de la ligne aérienne (résistance, inductance, capacitance et conductance), ces paramètres varient avec la tension, la fréquence et la section des conducteurs. La résistance et la conductance varient aussi en fonction de température et la distance entre conducteurs influe sur l'inductance et la capacitance.

D'après les définitions des paramètres électrique de la ligne aérienne on peut conclure et désigne que le champ électriques et magnétique rayonné par les lignes électriques ont des relations directe avec ces paramètres électriques et la positionnement de ces conducteurs et vis avis à la hauteur des lignes para port a la terre.

La méthode d'image des charges électriques réalise l'analyse en remplaçant les conducteurs en parallèle de la ligne par un seul conducteur équivalent, ce qui produit d'erreurs supplémentaires de calcul.

Ainsi, l'analyse avec la méthode des éléments finis, en utilisant la transformation de Kelvin pour les domaines du champ ayant des frontières ouvertes, est une procédure numérique alternative pour les méthodes analytiques de calcul du champ électrique d'une ligne électrique aérienne.

BIBLIOGRAPHIE

BIBLIOGRAPHIE

- [1] MODERN POWER SYSTEM ANALYSIS, Turan Gönen, éd. John Wiley & Sons, 1988.
- [2] ANALYSIS OF FAULTED POWER SYSTEMS, Paul Andeson, Iowa State University Press, 1973.
- [3] CONSTRUCTION DES LIGNES AÉRIENNES À HAUTE TENSION, Charles Avril, éd. Eyrolles, 1984.
- [4] ELECTRICAL TRANSMISSION AND REFERENCE BOOK, vol. 1 et 2, éd. Central Station Engineer of the Westinghouse Electric Corporation.
- [5] CALCUL DES RÉSEAUX DE PUISSANCE, J.L. Horward, notes de cours, Université de Liège, 1997.
- [6] Jean Louis Fleury, Les coureurs de lignes : L'histoire du transport de l'électricité au Québec, Montréal, Stanké, 1999, 507 p. (ISBN 2-7604-0552-4)
- [7] Hydro-Québec, L'électricité, de la centrale à la maison, Montréal, Hydro-Québec, 2003, 46 p. (ISBN 2-550-40950-7)
- [8] Société d'énergie de la Baie James, Le complexe hydroélectrique de la Grande Rivière : réalisation de la première phase, Montréal, Société d'énergie de la Baie James / Éditions de la Chenelière, 1987, 496 p. (ISBN 2-89310-010-4)
- [9] CIGRÉ, Group de travail, 36.01 (Interférences et champs), Champs électriques et magnétiques engendrés par les réseaux de transport. Exemple de calcul des perturbations électromagnétiques par la méthode CIGRÉ, Travail 21-43, 1980, Paris.
- [10] Gh. Iacobescu, I. Iordanescu, M. Tudosie: Re_ele _i sistemeelectrice, Editura didactic_ _i pedagogic_., Bucuesti, 1981.
- [11] R. G. Olsen and P.S. Wong, Characteristics of low frequency electric and magnetic fields in the vicinity of electric power lines, IEEE Trans. on Mag. ,vol 7, no.4 oct.1992.
- [12] E.M. Freeman and D.A. Lowther: A novel mapping technique for open finite element solutions to Poisson's equation, IEEE Trans. Magn., Vol. 24, pp. 2934 - 2936, nov.1988.
- [13] I. R. Ciric and S. H. Wong, Inversion transformation for the finite element solution of three-dimensional magnetic and electric problems, IEEE Transactions on Magnetics, (25) pp. 4135 - 4136, sept. 1989.

BIBLIOGRAPHIE

- [14] D. A. Lowther and E.M. Freeman, Further aspects of the Kelvin transformation method for dealing with open boundaries, *IEEE Trans. Magn.*, vol. 28, pp. 1667-1670, Mar. 1992.
- [15] D. C. Meeker: *Finite Element Method Magnetics (FEMM 4.0), User's Manual.*, 2004.
- [16] Q. Chen and A. Konrad, A review of finite element open boundary techniques for static and quasistatic electromagnetic field problems, *IEEE Transactions on Magnetics*, 33(1), January 1997.
- [17] CIGRÉ, Guide pour l'établissement délimités d'exposition aux champs électriques, magnétiques et électromagnétiques, International Congress on Large High Voltage Electric, 1-9 sept. 2001, Travail 30.01, Paris.
- [18] T. Horváth, The electric and magnetic field exposition of biological object due high voltage lines, *Proceedings of the 3rd Japan-Hungary Joint Seminar on Applied Electromagnetics in Materials and Computational Technology*, 10 -13 July, 1994, Budapest.