UNIVERSITE KASDI MERBAH OUARGLA

Faculté des sciences et technique

Département de génie électrique

Mémoire

MASTER ACADEMIQUE

Domaine : science et technique

Filière : génie électrique

Spécialité : Matériaux électrotechnique

Présenté par : **BOUSBIA SALAH Samiha**

Thème

Étude de la distribution du champ électrique pour isolateur HT à l'aide de la méthode des éléments finis

Soutenu publiquement

Le : 24/06/2013

Devant le jury :

M. A.KHALFA	MA (B)	Président	UKM Ouargla
M. A.ABIMOULOUD	MA (A)	Encadreur/rapporteur	UKM Ouargla
M. Y.BOUREK	MA (A)	Examinateur	UKM Ouargla
M. A.BOUHAFAS	MA (A)	Examinateur	UKM Ouargla

Année Universitaire : 2012 /2013

INTRODUCTION GENERALE

L'énergie électrique joue un rôle important dans le développement économique et industriel d'un pays. Il est devenu primordial d'assurer un bon acheminement de l'électricité jusqu'aux consommateurs, en assurant la continuité et la fiabilité du service. C'est pour cela que l'une des principales cibles, dans les travaux de recherche dans le domaine de l'énergie, est la diminution du nombre et de la durée des interruptions de l'alimentation en énergie électrique.

Les équipements de haute tension présents dans les réseaux aériens de transport de l'énergie électrique, sont supposés opérer de façon fiable, quelles que soient les conditions environnementales. En particulier, les isolateurs constituent un élément essentiel dans le bon fonctionnement des lignes. Ils ont un double rôle ; mécanique, en supportant les conducteurs sous tension, et électrique, en assurant l'isolement électrique entre les deux parties.

La pollution, à l'état sec, n'engendre pas une dégradation de la rigidité diélectrique. Cependant, en s'humidifiant, elle provoque la dissolution des sels et la formation d'une couche électrolytique. Cette dernière engendre la naissance d'un courant de fuite qui, par effet Joule, échauffe la couche de pollution qui sèche progressivement .La répartition du potentiel entre électrodes est changée. Ainsi, une partie importante de la tension appliquée se trouve rapportée sur la bande sèche engendrant, si le champ local dépasse un certain seuil, un claquage diélectrique et l'établissement d'une décharge électrique ou d'arcs partiels.

Dans certaines conditions, cette décharge peut s'allonger jusqu'à provoquer le contournement total de l'isolateur.

La problématique reliée à une telle étude, se trouve dans la difficulté à déterminer, expérimentalement, de manière précise, la distribution du potentiel et celle du champ électrique le long des isolateurs pollués. En effet, ils requièrent un appareillage lourd et sophistiqué, généralement coûteux.

Avec le développement croissant de l'informatique et de logiciels de calcul électromagnétique, il est maintenant possible d'obtenir des résultats rapides et précis. Parmi les méthodes numériques disponibles et applicables aux calculs électromagnétiques, la Méthode des Éléments Finis. Ainsi, son utilisation, par le biais du logiciel commercial **COMSOL Multiphysics**, fut retenue pour réaliser les différentes simulations.

Notre travail est dédié à la détermination numérique des distributions du potentiel et du champ électriques le long d'un isolateurs de type U 120. Ainsi, nous avons réparti notre travail en quatre chapitres distincts.

Dans le premier chapitre nous entamons la présentation d'une synthèse bibliographique sur l'utilité de la haute tension.

Dans le deuxième chapitre, nous citons les phénomènes de pollution et leurs conséquences sur le transport de l'énergie électrique, ainsi que les techniques de lutte contre ces phénomènes.

Dans le troisième chapitre, nous présentons les principes de la méthode des éléments finis et comment l'exploiter à l'aide du logiciel **COMSOL Multiphysics**.

Le quatrième chapitre est consacré à l'étude, via le logiciel **COMSOL Multiphysics**, de la distribution du potentiel et du champ électriques le long de la surface de l'isolateur U 120 en fonction de la nature de la matière isolante et de la conductivité de la pollution.

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

Chapitre I :

Généralités sur la haute tension

Chapitre II :

Le phénomène de pollution des isolateurs

Chapitre III :

La Méthode des éléments finis

Introduction générale

Conclusion générale

Sommaire

Bibliographie

Chapitre IV :

Calcul du Champ Electrique sur la Surface de l'Isolateur U120 Par La FEM

Figure	Titre de figure	pages
Figure (I.1)	Transformateur élévateur	06
Figure (I.2)	Pression du gaz	06
Figure (I.3)	Etincelle-arc électrique	07
Figure (I.4)	L'avalanche	08
Figure (II.1)	Isolateur rigide	12
Figure (II.2)	Isolateur capot et tige	13
Figure (II.3)	Isolateur long fut à extrémités métalliques tronconiques	14
Figure (II.4)	Isolateur long fut à extrémités métallique des formes tiges scellées	14
Figure (II.5)	Isolateur capot et tige de profil standard	14
Figure (II.6)	Isolateur capot et tige de profil antibrouillard	15
Figure(II.7)	Isolateur capot et tige de profil plat.	15
Figure(II.8)	Isolateur capot et tige de profil sphérique	16
Figure (II.9)	Profil d'un isolateur en matériaux synthétique	17
Figure (II.10)	Les bonnes propriétés hydrophobes	18
Figure (II.11)	Le vieillissement d'isolateurs	18
Figure (II.12)	Pollution des isolateurs	19
Figure (II.13)	Déroulement du contournement	20
Figure (III.1)	Fenêtre principal de **Comsol** (le navigateur de modèle)	33
Figure (III.2)	Graphical user interface **Comsol** multiphysics	34
Figure(III.3)	Propriété de sous-domaine **Comsol** multyphisics	35
Figure (III.4)	Fenêtre des conditions aux limites	36
Figure (III.5)	Elément du maillage avec PDETOOL	37
Figure (III.6)	Exemple de maillage d'une géométrie d'un mos avec PDETOOL	38
Figure (III.7)	Fenêtre de progression de la résolution	40
Figure IV.1	Isolateur u120 utilise dans les lignes mt dans la région d'Ouargla	41
Figuire IV.2	Dessin technique de l'isolateur	42
Figure IV.3	La géométrie tridimensionnelle	44
Figure IV.4	Le géomètre bidimensionnel	45
Figure IV.5	Création de maille ou maillage	46

Figure IV.6	Distribution du potentiel pour l'isolateur propre en verre	46
Figure IV.7	Ligne de fuite objet de calcul de potentiel et du champ	47
Figure IV.8	Distribution du potentiel le long de la ligne de fuite pour l'isolateur propre en verre	47
Figure IV.9	Distribution du champ électrique le long de la ligne de fuite pour l'isolateur propre en verre	48
Figure IV.10	Distribution du potentiel le long de la ligne de fuite pour l'isolateur propre en céramique	48
Figure IV.11	Distribution du champ électrique le long de la ligne de fuite pour l'isolateur propre en céramique	49
Figure IV.12	Distribution du potentiel le long de la ligne de fuite pour l'isolateur propre en porcelaine	49
Figure IV.13	Distribution du champ électrique le long de la ligne de fuite pour l'isolateur propre en porcelaine	50
Figure IV.14	Champ électrique max coté tige et capot en fonction de la permittivité	51
Figure IV.15	La géométrie bidimensionnelle d'un isolateur polluée	52
Figure IV.16	Distribution du potentiel pour l'isolateur polluée en verre	52
Figure IV.17	Distribution du champ électrique le long de la ligne de fuite pour l'isolateur en verre polluée	53

Tableau	Titre de tableau	Page
Tableau IV.1	Caractéristique dimensionnelles de l'isolateur U120	42
Tableau IV.2	Caractéristique électrique de l'isolateur U120	42
Tableau IV.3	Mesure géométrique de la tige	43
Tableau IV.4	Mesure géométrique du verre	43
Tableau IV.6	Mesure géométrique du ciment(1)	43
Tableau IV.7	Mesure géométrique du ciment(2)	43
Tableau IV.8	Champ électrique max calculé dans les régions proche du capot et la tige en fonction de la permittivité	50
Tableau IV.9	Champ électrique max calculé en fonction de la conductivité de la couche de pollution.	53

Symbole	Définition
HVDC	High Voltage Direct Current (Anglais) ou Courant Continu Haute Tension(Français)
HT	Haute Tension
SF6	Sulfur hexafluoride
MEF	Méthode d'Eléments Finis
If	Courant de fuite
DDSE	Densité du Dépôt de Sel Equivalent
EDP	Equation différentielle aux dérivées partielles
G.U.I	Graphical User Interface
1D,2D,3D	Un Dimension, Deux Dimensions, Trois Dimensions

[1] Adel ABIMOUL0UD « Comportement d'une Surface Isolante Partiellement Polluée sous Tension Alternative 50Hz » thèse de magister en Génie Electrique, Ecole Nationale Polytechnique Alger Décembre 1999.

[2] TLIDJANE Aissa, MEKHALFIA Riadh et KEBAILI Hamza « Etude Du Phénomène De Contournement Des Isolateurs Pollues Sous Tension Continue» La thèse D'ingenieur EUR D'état En Génie Electrique Universite De M'sila 2009/2010

[3] Abdelouahab MEKHALDI « Etude des phénomènes de conduction et de décharge électrique sur des surfaces isolantes polluées sous tension alternative 50 Hz » Thèse de doctorat d'Etat en Génie Electrique, Ecole Nationale Polytechnique Alger 1999.

[4] Siméon DIAMPENI KIMBAKALA « modélisation dynamique des décharge se propagent sur des surface isolantes polées avec des dépôts discontinus sous différentes formes de tension » thèse de Doctorat en Génie Electrique Ecole Centrale de Lyon Décembre 2007.

[5] Davies A J,"the finite élement method: a first approach":editions clarendon press .P.287.1980

[6] Huebner K H :"The finit element for the engineers "Toronto:Edition John Wiley and Sons,P.500.1975

[7] Bernett D S , "finite element analyses : from concepts to application" Don Mills ,on: Edition Addision –Wesley,P.844.1887

[8] Imbert J "Analyse des structures par éléments finis"3er ed, Toulouse: Edition Cépaduès, P.506.1991

[9] Baker A J et pepper D W, "finite element 1-2-3" Montréal: Edition MeGrow-Hill,P.341,1991.

[10] Garrigues J "La méthode des éléments finis "Ecole supérieure de mécaniques de Marseille. Consulté le 10 juillet 2010,Titre de : http://J garrignes .perso.centrale –marseille.fr/EF book rv.pdf.janvier 2002

[11] Gancolvés E. "Résolution numérique discrétisation des EDP et EDO " institut nationale polytechnique de Grenoble, consulter le 10 Juillet 2010. Titré de http : // www.hach.ulg .ac,be/cms/en system/files/cours%20Grenoble%20 EDP-EDO.pdf, Septembre 2005 .

[12] Marceau D, "Méthode des élément finis", cours offert à l'Université du Québec à Chicoutimi, Chicoutimi, Qc,2008.

[13] Pérez J P, Carles R et Flecekinger R, "Electromagnétisme fondent et application" ,4° éd, Paris : Edition Masson, P.740 ,2001.

Dédicace

Je dédie ce modeste travail :
A mes très chers parents qui m'ont couvert d'amour, de soutien qu'ils trouvent dans ce mémoire le fruit de leur travail :
Mon papa que je ne remercierai jamais assez pour tout ce qu'il a fait pour moi, que dieu le garde à jamais,
Ma maman qui m'abreuve d'amour et d'affection intarissable, source de mon bonheur et ma raison d'être,
A mes frères :

Zakaria, Taki El Din, Ghayeth et Loukmane
A mes sœurs :

Khouloud et Malak

A tous mes amis : Sarah, Houssam, Haider et Qu'ils m'excusent de ne pas pouvoir les citer au risque d'oublier quelqu'un,

La prédiction du comportement des isolateurs des lignes aériennes de haute tension dans un site spécifique est une tâche souvent difficile. Pour palier tels problèmes en utilise des méthodes numériques. La méthode des éléments finis (MEF), est l'une des méthodes numériques puissantes qui a été développée dans cette étude, à l'aide de logiciel **COMSOL Multyphysics**

Cette méthode a permet de calculer la distribution du champ et du potentiel électrique sur la surface de l'isolateur capot-tige U120 utilisé dans la région de Ouargla. Les résultats de simulations numériques, pour différentes permittivités de la matière isolante, à savoir le verre la porcelaine et la céramique, sont effectuées. Par la suite, l'effet d'une couche de pollution, introduite sur la surface supérieure de l'isolateur est aussi examiné.

Les résultats ont montré que le niveau de champ électrique est très accentué dans la région proche de la tige mise à la haute tension puis démunie considérablement le long de la ligne de fuite. Ensuite, le champ augmente d'une manière modéré dans la région proche du capot, qui est mise à la terre.

Les niveaux de champ électrique dans l'isolateur en verre est supérieur à celui de l'isolateur en porcelaine et celle en céramique. La permittivité diélectrique élevée de la céramique et de la porcelaine offre une distribution plus lisse du champ électrique le long de la ligne de fuite.

La disposition de la couche de pollution sur la partie supérieure de l'isolateur n'engendre aucun phénomène de conduction de courant. Cette couche de pollution fait décroitre le niveau du champ électrique car elle représente une surface équipotentielle. Les résultats de simulation ont montré que dans cette configuration de pollution la conductivité de la couche de pollution n'a aucun effet sur le niveau de champs électrique calculé.

Chapitre I :

Généralités sur la haute tension

Chapitre II :

Le phénomène de pollution des isolateurs

Chapitre III :

La Méthode des éléments finis

Introduction générale

Conclusion générale

Sommaire

Bibliographie

Chapitre IV :

Calcul du Champ Electrique sur la Surface de l'Isolateur U120 Par La FEM

I.1. Introduction:

La ligne à haute tension est le composant principal des grands réseaux de transport d'électricité. Elle transporte l'énergie par l'intermédiaire de l'électricité de la centrale électrique au consommateur. Ces lignes sont aériennes, souterraines ou sous-marines, quoique les professionnels réservent plutôt ce terme aux liaisons aériennes.

Aujourd'hui, certaines lignes sont régulièrement exploitées à des tensions supérieures à 765 kV. De nouvelles lignes (dites « HVDC »pour « High Voltage Direct Current » « à courant continu haute tension ») permettent de transporter le courant avec moins de pertes sur de plus grandes distances, éventuellement sous l'eau. [1]

I .2. Utilité de la haute tension:

L'énergie électrique sort des centrales avec une tension de quelques kV (5 à 10 kV), le transport se fait avec une haute tension (220 kV et plus) pour minimiser les pertes Joule dans la ligne et de pouvoir transiter de grandes puissances

L'équation de fonctionnement d'un transformateur idéale est la suivante :

$$\mathbf{P_{entrée} = P_{sortie} \Rightarrow U_1 I_1 = U_2 I_2} \qquad \text{(I. 1)}$$

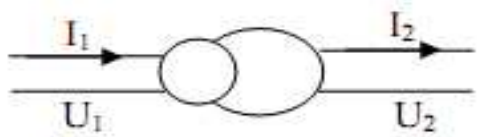


Figure I.1 : Transformateur élévateur

D'après l'expression ci-dessus, l'élévation de la tension (U2 > U1) permet de limiter les pertes en diminuant le courant et permet également de faire transiter de plus grandes puissances. Par exemple, pour évacuer l'énergie d'un groupe de 100 MVA, le courant sera de 260 A sous 220kV mais de 4 000 A sous 15 kV. Le transport de 4000 A sous 15 kV entraînerait des coûts d'équipement et surtout de pertes par effet Joule inadmissibles. Les courants de court-circuit et leurs effets seraient aussi considérablement augmentés. Or, il existe maintenant des groupes de 1300 MVA ! Donc on est conduit à augmenter la tension des

réseaux de transport. Evidemment, il y a une limite supérieure principalement constituée par le coût des isolements.

L'utilisation de la haute tension a fait apparaitre plusieurs problème tel que : claquage, isolation, effet couronne ; contournement des isolateurs ; pertes diélectriques. [1]

I .3.Réseaux électriques :

- Les réseaux de transport sont triphasés, sans conducteur de neutre
- Le domaine de ce qu'on appelle Très Haute Tension va de 60 à 800 kV (entre Phases).

Les réseaux de transport sont triphasés, sans conducteur de neutre**.** Le domaine de ce qu'on appelle Très Haute Tension va de 60 à 800 kV (entre Phases). II existe des projets jusqu'à 1200kV.

- Leurs fréquences sont 50 ou 60 Hz (quelques cas à 16 2/3 Hz)
- Les courant transportés vont de 400 à 3 000 A.

II existe des projets jusqu'à 1 200 kV.

- Leurs fréquences sont 50 ou 60 Hz (quelques cas à 16 2/3 Hz)
- Les courant transportés vont de 400 à 3 000 A

I .4 . Comparaison entre lignes aériennes et câbles souterrains HT :

Inconvénients des câbles:

- Difficultés technologiques d'isolation des câbles qui ne permettent pas d'atteindre des tensions très élevées
- Problème de l'évacuation de la chaleur
- Difficulté de connexion entre ligne aérienne et câble
- Difficulté de maintenance en cas de défaut
- Les coûts relatifs qui sont élevés pour les câbles, environ 10 fois supérieurs aux coûts des lignes.

Remarque : La pose des câbles se fait dans des situations bien particulières de technique d'environnement. Par exemple, la liaison entre les rives Nord et Sud de la méditerranée.

I.5. Phénomène d'ionisation dans les Gaz :

I.5.1. Notions sur les Gaz :

- Tous les gaz sont isolants
- Ont la même constante diélectrique.
- L'air est l'isolant le plus disponible, le plus utilisé et par dessus il est gratuit.
- Il est impossible de connaître le comportement particulier d'une particule, mais la théorie cinétique des gaz permet de connaître, en raison même de leur grand nombre, leur comportement moyen.

N'importe quel gaz, utilisé comme diélectrique doit posséder certaines caractéristiques pour le bon fonctionnement telles que:

- Grande résistivité.
- pertes faible.
- Rigidité diélectrique élevée.
- Non inflammable.
- Résistant aux effets thermiques et chimiques.
- Absence de toute toxicité.
- Maintenance pas chère et pratique.

Les gaz ne sont pas généralement considérés comme des "matériaux", parce que la distance entre les molécules adjacentes est si grande et le nombre d'atomes ou de molécules par unité de volume est si petit, qu'ils ne sont pas capables de résister aux forces mécaniques. Cependant, les gaz sont des "diélectriques" dans le sens d'isolants électriques, et sont employés pour empêcher l'écoulement du courant. [1]

I.5.2. Constitution de l'atome :

Le noyau renferme:

Des Portons : $m_p=1,6725.10^{-27}\ kg$; $q_p= 1,6.10^{-19}$ C

Des neutrons : $m_n=1,6725.10^{-27}\ kg$; $q= 0$

Les électrons gravitent autour du noyau :

$m_p=9,1019.10^{-31}\ kg$; $q_e= - 1,6.10^{-19}$ C

A l'état fondamental, l'atome est neutre ;

- S'il libère un électron il devient un ion positif. A-1é → $A+$
- S'il gagne un électron devient un ion négatif A+1é → $A-$

Remarque : Le photon est un quantum d'énergie (m=0 ; q=0).

I.5.3. Mouvement des particules de gaz :

Le mouvement des particules dans le gaz est libre, contrairement au solide qui est une masse compacte car les particules sont reliées entre elles par des liaisons cristallines fortes.

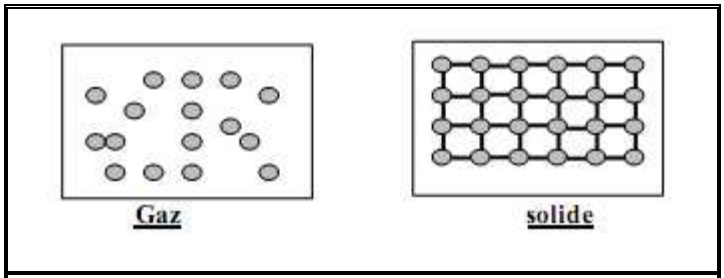


Figure I.1 *:* particules dans le gaz et le solide

I.5.4. Pression du gaz :

La pression P est proportionnelle à la densité atomique δ.

- ✓ δ : Nombre d'atomes/unité de volume .
- ✓ λ : libre parcours moyen (l pm) : distance séparant deux particules voisines.

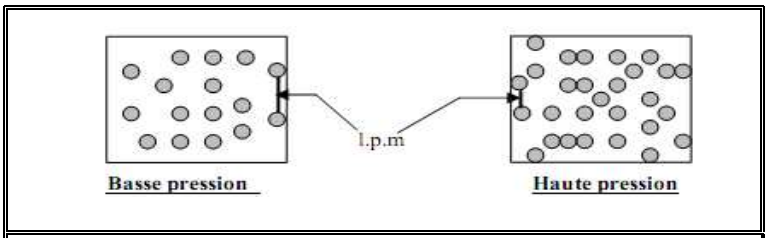


Figure I.2 : Pression du gaz [1]

I.6. Le claquage :

I.6.1. Tension critique de claquage U_C :

U ≥ Uc l'isolant ne peut pas supporter cette tension → Claquage (décharge électrique).

Remarque :

A la pression atmosphérique, si d = 1cm : Uc ≈ 30 kV;

Donc le champ critique Ec ≈ 30 kV/cm

I.6.2 .Etincelle-arc électrique:

Lors d'un claquage, si l'on contrôle le courant avec une résistance élevée, la décharge se stabilise pour des courants de l'ordre du µA(Etincelle). Sinon, s'il n'y a pas de résistance de protection R, la décharge évolue rapidement vers d'autres régimes caractérisés par des courants beaucoup plus élevés (arc électrique), si la source d'alimentation a une puissance suffisante.

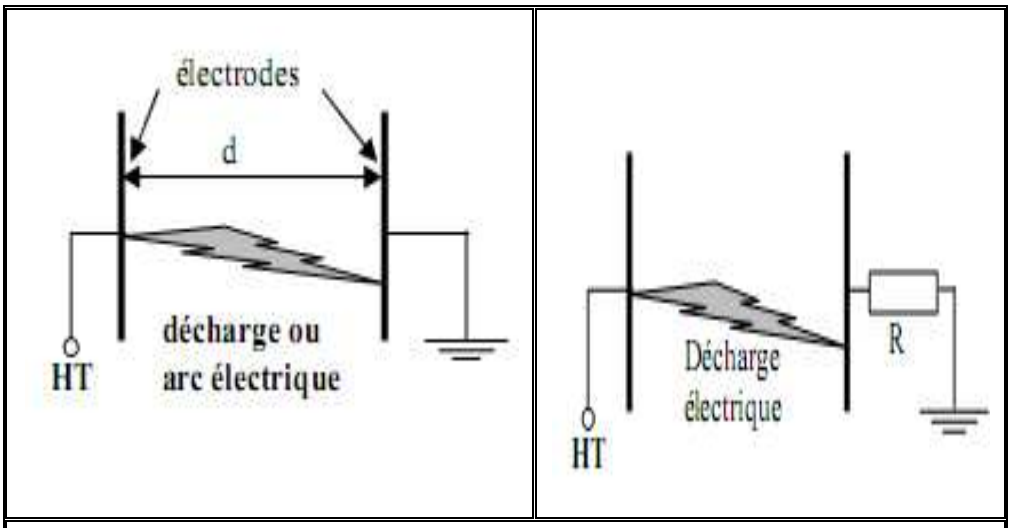


Figure I.3 : Etincelle-arc électrique

I .7. L'avalanche électrique:

On considère deux électrodes planes placées dans un gaz et soumises à une tension élevée.

On appel Electron primaire l'électron crée par ionisation grâce à des agents naturels tels que les rayonnements cosmiques et la radioactivité de la terre.

I.7.1.Description de l'avalanche:

L'électron primaire e_0 accéléré par le champ(E) entre en collision avec un atome A_1 et l'ionise, (A_1) libère un électron et devient lui même un ion positif.

Les électrons e_0 et e_1 ionisent par collision deux atomes A_2 et A_3 qui libèrent deux électrons e_2 et e_3. Ces quatre électrons entrent en collision avec quatre autres atomes qu'ils en créant une ionisent → avalanche électronique.

La multiplication des électrons se poursuit suivant ce processus jusqu'à ce que l'avalanche arrive à l'anode.

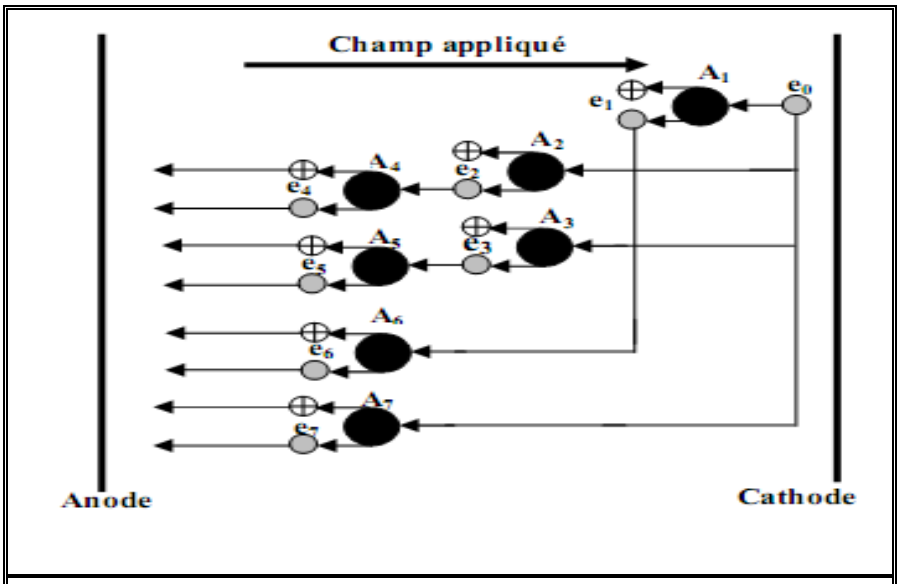


Figure I.4 : l'avalanche

Remarque :

- L'avalanche prépare le chemin au claquage du gaz.
- Un atome ionisé fournit un électron et devient lui même un ion positif ; Il y a autant d'électrons dans l'avalanche que d'ions positifs. Chaque collision ionisante produit une paire électron-ion positif.
- L'avalanche progresse dans le sens opposé au champ électrique (Cathode→Anode) .

I .8. Charge d'espace :

Les électrons plus rapides sont absorbés par l'anode, tandis que les ions positifs lourds et plus lents forment entre les électrodes un ensemble de charges qu'on appelle (Charge d'espace).

I.8.1. Forme de la charge d'espace:

Comme l'avalanche débute prés de la cathode et finit sur l'anode, elle présente la forme d'un cône. Elle progresse dans le sens opposé à E.

I.9. L'utilisation de la haute tension:

Tout transfert d'énergie impose d'utiliser un système de liaisons associant une grandeur de flux et une grandeur d'effort. Pour le transfert d'énergie par l'électricité, la grandeur d'effort est la tension et la grandeur de flux est l'intensité du courant. La plus grande partie de l'énergie perdue lors de ce transfert dépend de la grandeur de flux, responsable des pertes liées au déplacement. Le choix d'utiliser des lignes à haute tension s'impose dès qu'il s'agit de transporter de l'énergie électrique sur des distances supérieures à quelques kilomètres. Le but est de réduire les chutes de tension en ligne, les pertes en ligne et, également, d'améliorer la stabilité des réseaux. [1]

I.10.Classification:

- ✓ **Tensions de fonctionnement:**

On peut classer les lignes électriques en fonction de leur tension de fonctionnement (prise entre deux de leurs trois conducteurs) :

- Basse tension - moins de 1000 volts, utilisée pour la connexion vers un immeuble d'habitation ou de petits clients commerciaux et de l'utilitaire.
- Moyenne tension - entre 1000 volts (1 kV) et 33 kV, utilisée pour la distribution dans les zones urbaines et rurales.
- Haute tension - entre 33 kV et 230 kV utilisée pour le transport de grandes quantités d'énergie électrique.
- Très haute tension - plus de 230 kV à 800 kV utilisée pour de longues distances, de très grandes quantités d'énergie électrique.

- Ultra haute tension - supérieure à 800 kV.

I.11.Conclusion :

Le transport de l'énergie électrique se fait avec une haute tension pour minimiser les pertes Joule dans la ligne et de pouvoir transiter de grandes puissances. L'utilisation de la haute tension a fait apparaitre plusieurs problème tel que : claquage, isolation, effet couronne ; contournement des isolateurs ; pertes diélectriques.

II.1. Introduction :

Le phénomène de pollution des lignes aériennes est un sujet d'étude d'une importance primordiale. Cela provient du fait que la pollution des isolateurs constitue un sérieux problème pour l'exploitation des réseaux de haute tension En effet, et suite à l'interaction entre l'air transportant des grains de poussières et l'isolateur, une couche étrangère se dépose sur les surfaces de celui-ci. Une fois cette couche est humidifiée, la tension de tenue diminue considérablement et provoque des incidents très graves Cela est dû à plusieurs facteurs dont les plus importants sont le profil de l'isolateur et la nature de l'agent polluant.

II .2. Les isolateurs :

II .2.1. Définition :

L'isolateur est un matériau isolant solide que présente une très grande résistance au passage du courant et dont la conductibilité est pratiquement nulle. Il est utilisé pour isoler les conducteurs ou les pièces sous tension afin d'empêcher les court–circulation, les pertes de courant et les charges d'électrocution.

II.2.2. Fonctionnement et constitution d'un isolateur :

Les isolateurs sont des composants indispensables au transport et à la distribution de l'énergie électrique. Leur fonction est de réaliser une liaison mécanique entre des conducteurs portés à des potentiels différents accrochés aux pylônes des lignes aériennes, ils maintiennent les conducteurs dans la position spécifiée (isolateurs d'alignement et d'ancrage), ils assurent la transition entre l'isolation interne (huile, SF6) et l'isolation externe, ils permettent de raccorder les matériels électriques au réseau (traversées de transformateur, extrémités de câbles) et ils constituent, également, l'enveloppe de certains appareils (disjoncteurs, parafoudres, réducteurs de mesure).

Les matériaux isolants solides les plus utilisés sont essentiellement le verre trempé et la porcelaine. Mais les résines synthétiques commencent aussi à être utilisées.

Les isolateurs sont conçus et dimensionnés pour résister aux contraintes prévisibles introduites par l'environnement du point de vue électrique, l'isolateur est considéré comme étant deux électrodes dont l'intervalle comporte trois zones constituant trois isolants en parallèle ayant des comportements différents, qui sont les suivants.

- l'intervalle d'air.
- le matériau diélectrique.
- l'interface air-matériau diélectrique (la longueur de l'interface constitue la ligne de fuite ligne le long de laquelle circulerait le courant de fuite).

II .2. 3. Principaux types d'isolateurs :

On peut distinguer deux principaux types d'isolateurs : les isolateurs de type rigide et les éléments de chaîne.

II .2.3.1. Isolateurs de type rigide :

Un isolateur rigide (Figure. II.1) est relié au support par une ferrure fixe. Tous les isolateurs rigides normalisés sont livrés avec une douille scellée de telle façon qu'ils puissent être vissés directement sur les ferrures correspondantes. La céramique et le verre sont les deux matériaux utilisés pour les isolateurs rigides.

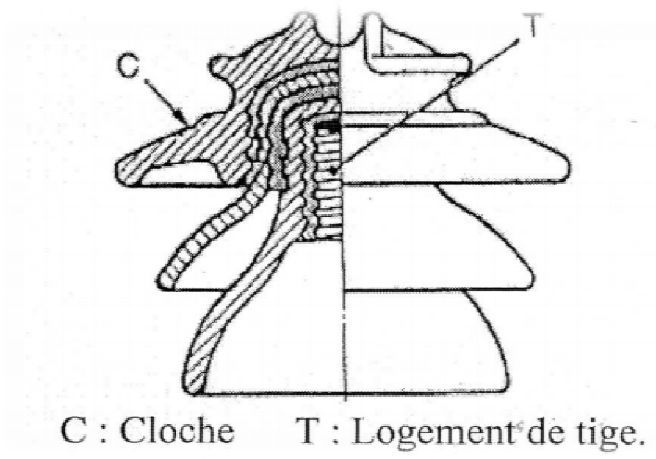


Figure II.1: Isolateur rigide

II .2.3.2. Isolateurs suspendus ou éléments de chaîne :

C'est un isolateur constitué par un matériau isolant équipé de pièces métalliques de liaison, nécessaires pour le relier de façon flexible à d'autres éléments de chaîne, à la pince de suspension du conducteur ou au support, ces éléments sont soumis principalement à des

efforts de traction. Ils sont généralement utilisés en suspension et forment des chaînes d'isolateurs soit verticales (chaînes d'alignement), soit horizontales (chaînes d'ancrages)

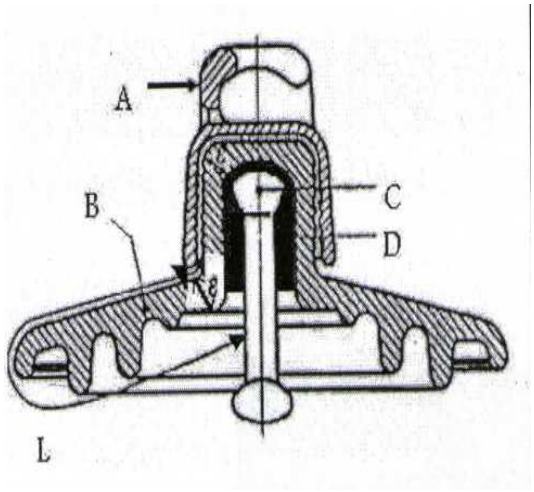
Il existe deux types principaux d'éléments de chaîne.

- L'isolateur capot et tige.
- L'isolateur long fut.

II .2.3.2.a. Isolateurs à capot et tige

L'isolateur capot et tige est constitué d'un bloc isolant portant à sa partie supérieure un capot scellé en fonte malléable et à l'intérieur une tige en acier, avec cannelures et dont la tête conique est également scellée dans le verre (ou la porcelaine). L'extrémité inférieure de cette tige est arrondie et a les dimensions voulues pour pénétrer dans le capot de l'élément suivant, et y être maintenue par une goupille L'assemblage consiste à effectuer un scellement du capot et du diélectrique par du ciment, puis celui de la tige et du diélectrique.

La coupe de l'isolateur capot-tige est schématisée à la figure (Figure. II.2)



A : le capot.

B : le diélectrique (verre trempé ou céramique).

D : le ciment de fixation.

C : la tige.

L: plus courte distance dans l'air entre le capot et la tige.

ε : longueur du canal de perforation,<< L/2.

Figure II.2 : Isolateur capot et tige

A. Profil standard :

La faible profondeur, l'espacement entre les anneaux (nervures) et la ligne de fuite moyenne permettent l'utilisation de profil dans une zone de pollution modérée.

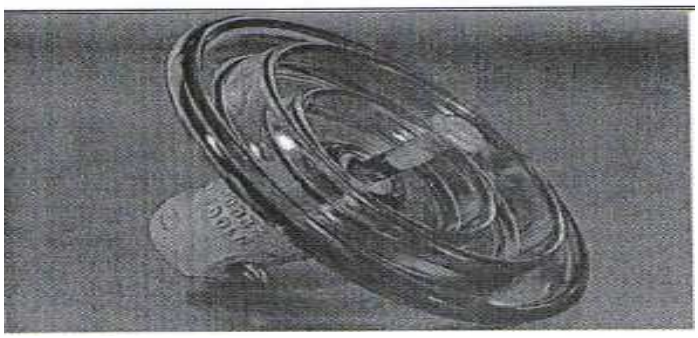


Figure II.5 : isolateur capot et tige de profil standard

B. Profil antibrouillard :

Plus large que le profil standard, l'écartement entre les anneaux permet un bon nettoyage par le vent ou la pluie et facilite le lavage manuel si nécessaire. L'espacement prévient également l'apparition d'arcs entre les anneaux adjacents dans des conditions sévères de pollution.

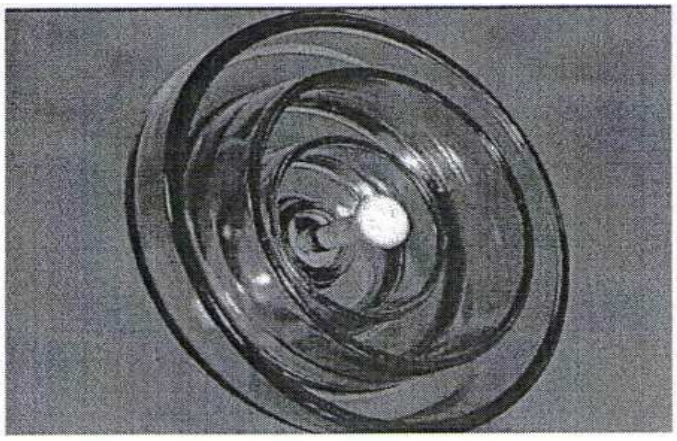


Figure II.6: Isolateur capot et tige de profil Antibrouillard

C. Profil plat:

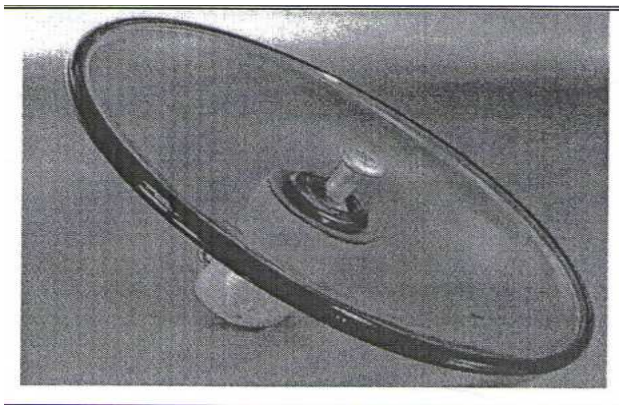


Figure II.7 : un isolateur capot et tige de profil plat.

D. Profil sphérique : [2]

Ce type de profil donne une ligne de fuite équivalente au profil standard, mais l'absence d'anneaux facilite le nettoyage manuel

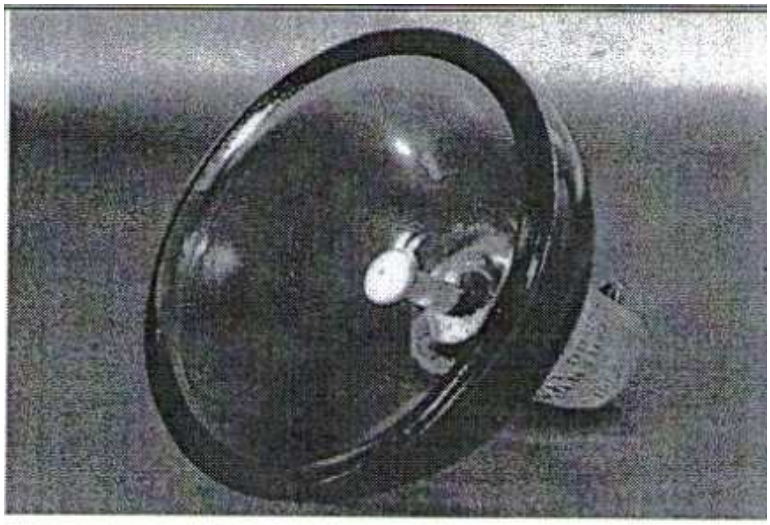


Figure II.8 : isolateur capot et tige de profil sphérique

II .2.3.2.b. Isolateur à long fût :

Il est constitué d'un cylindre plein en céramique, en porcelaine ou en matériaux synthétiques, muni d'ailettes (Figure. II.3) (Figure. II.4).A chaque extrémité est fixée une pièce métallique de liaison. Celle-ci peut être enveloppante en forme de capot scellé autour des extrémités tronconiques prévues sur le cylindre, ou bien en forme de tige scellée dans une cavité prévue à cet effet. De tels isolateurs peuvent être utilisés unitairement ou en série de plusieurs éléments en fonction de leur longueur et du niveau d'isolement requis.

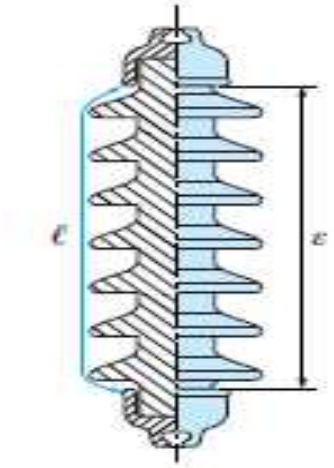


Figure II.3: Isolateur long fut à extrémités métalliques tronconiques

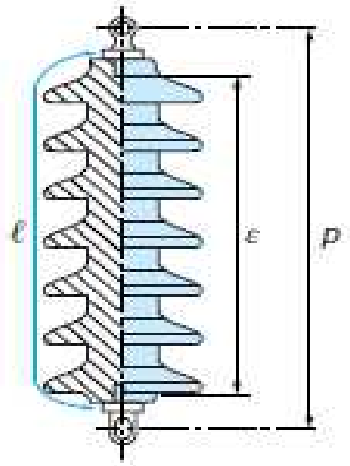


Figure II.4: Isolateur long fut à extrémités métallique des formes tiges scellées

L'élimination complète des rainures internes réduit l'accumulation des agents polluants sur la surface basse, grâce au courant d'air, cette conception est particulièrement efficace dans les zones désertiques ou l'auto lavage est peu fréquent par la pluie. [1]

II .3.Matériaux isolants utilisés pour la fabrication des isolateurs:

On trouve plusieurs isolants solides qui peuvent être utilisés pour la fabrication des isolateurs de haute tension comme le verre, la céramique et la porcelaine. Mais durant ces dernières années, la porcelaine est de plus en plus abandonnée à cause de deux inconvénients principaux qui sont le lourd des isolateurs et la difficulté de détection des amorçages.[2]

Ces dernières années, on s'intéresse de plus en plus à l'utilisation de l'isolateur en matériaux polymères. [1]

A. Céramique :

Le développement de la fabrication des céramiques datent depuis longtemps à cause de leurs performances. Pour les isolateurs qui vont être utilisés dans des lieux où il ya des contraintes mécaniques très importantes, on utilise de préférence des céramique a grains très fins. Souvent on trouve les céramiques dans les postes : isolateurs supports, couverture isolante des sectionneurs, des disjoncteurs, des transformateurs de potentiel, des bornes de traversées des transformateurs de puissance. [1]

B. Verre :

En Algérie, les isolateurs utilisés dans les lignes de moyenne haute tension sont en verre. Parmi les avantages que présentent le verre, le bas prix et l'observation des défauts est très facile. On trouve deux types de verre pour la fabrication des isolateurs : le verre trempé et le verre recuit. [1]

B .1 .le verre trempé :

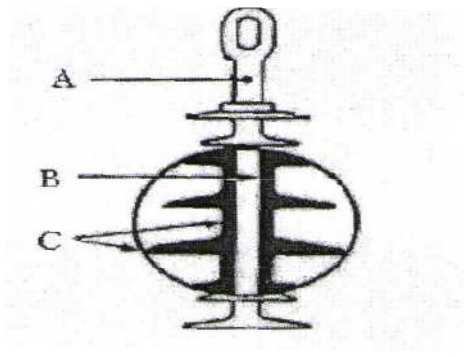
La résistance à la traction du verre trempé est environ 5 a 6 fois plus grande que le verre recuit et peut supporter des variations brusques de température pouvant atteindre 100° C.

B .2.Le verre recuit :

Le verre recuit est utilisé pour la fabrication d'isolateurs rigides, mais présente cependant des inconvénients. Parmi ces inconvénients, nous citons le fait qu'il ne résiste pas aux variations brusques de température et qu'il ne supporte que des tensions mécaniques relativement faible et c'est pour cette raison qu'il n'est pas utilisé pour la fabrication des isolateurs de suspension.

C. Matériaux synthétiques :

Les isolateurs en matériaux synthétiques sont composés d'un centre en fibres de verre imprégnées d'une résinée et d'un revêtement à ailettes de type élastomère. Leurs avantages est qu'ils sont légers et présentent une grande résistance mécanique (Figure. II.9).



A : pièces d'accrochage métallique.

B : noyau en fibre de verre-résine.

C : Revêtement à ailettes en matériaux synthétique.

Figure II.9 : profil d'un isolateur en matériaux synthétique. [4]

Ils ont de bonnes propriétés hydrophobes et peuvent être utilisés dans des conditions de pollution très sévères (Figure. II.10) [3].L'inconvénient de ces isolateurs est le vieillissement sous l'effet des différentes contraintes auxquelles ils sont soumis (électriques, mécanique, atmosphériques…) (Figure II.10.11)

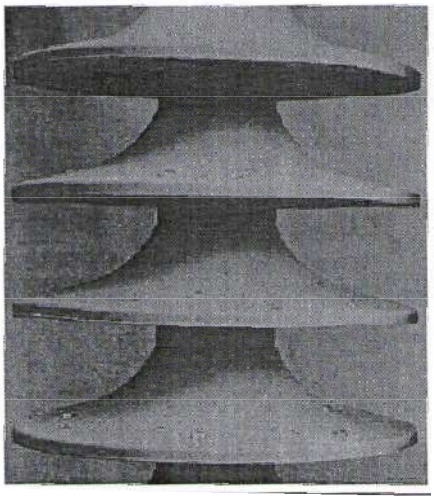


Figure. II.10: Les bonnes propriétés hydrophobes.

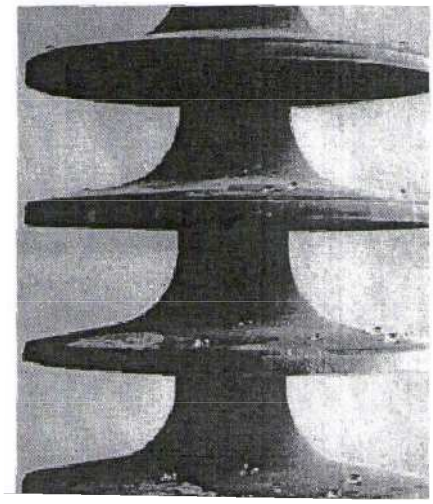


Figure .II.11: Le vieillissement d'isolateurs.

II .4 .Choix des isolateurs :

Les isolateurs entrent pour un pourcentage très modeste de l'ordre de 7%, dans le prix d'une ligne aérienne moyenne tension. Cependant, ils sont un élément essentiel dont dépendent la sécurité d'exploitation, la qualité et la continuité de service.

Les isolateurs les mieux adaptés à un environnement donné sont ceux qui retiennent le taux de dépôts polluants le moins élevé, c'est-à-dire ceux qui possèdent les meilleures propriétés d'auto – nettoyage.[2]

II.4.1.Pollution des isolateurs

La pollution est un phénomène qui constitue un sérieux problème sur l'isolement des ouvrages de haute tension, dont il faut tenir compte lors du dimensionnement de l'isolement des lignes de haute tension. Ceci est dû à la formation de couches plus ou moins conductrices sur la surface des isolateurs. Ces couches peuvent engendrer une diminution considérable de la résistivité superficielle des surfaces des isolants et par suite la diminution de la tension de tenue des isolateurs. [1]

L'échauffement de la couche polluante conductrice humidifiée, provoqué par la circulation des courants de fuite sur la surface de ces isolateurs, entraine des assèchements locaux de la couche de la pollution et l'apparition d'arcs de petite longueur (arcs partiels). Dans certaines condition, ces arcs partiels peuvent se développer le contournement total des isolateurs, en connectant l'extrémité sous haute tension à celle mise à la terre, et conduisant ainsi à la mise hors service de l'ensemble de l'installation.

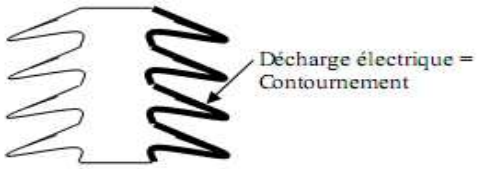


Figure. II.12 : Pollution des isolateurs

II .5. Contournement :

Le contournement est représenté par une décharge disruptive le long d'une surface solide dont la trajectoire contourne cette dernière. Aussi le terme contournement est employé pour des décharges par amorçage dans l'air.

II .5.1.Déroulement du contournement:

- **Phase 1 : dépôt de pollution**

Des grains de pollution se déposent sur la surface de l'isolateur (Figure. II.13a).

- **Phase 2 : Formation d'un électrolyte conducteur**

A sec, la résistance superficielle reste élevée malgré le dépôt de pollution. Quand la couche de pollution devient humide (brouillard, humidité, rosée du matin, pluie fine…), elle se transforme en électrolyte conducteur et donne naissance à un courant de fuite superficiel (If) circulant sur la surface de l'isolateur (Figure. II.13b).

- **Phase 3 : formation d'une bande sèche**

Dans les régions étroites de l'isolateur, où la densité de courant est élevée, une partie de l'électrolyte s'évapore et crée une bande sèche (Figure. II.13c).

- **Phase 4 : contournement**

Comme la résistance de la bande sèche est beaucoup plus grande par rapport au reste de l'électrolyte, pratiquement toute la tension aux bornes de l'isolateur est maintenant appliquée aux extrémités de cette zone. Il se produit alors un claquage dans la bande sèche:

- Soit la décharge s'éteint ⇒ pas de contournement (Figure. II.13d).
- Soit la décharge progresse sur la surface ⇒ contournement de l'isolateur (Figure. II.13e)

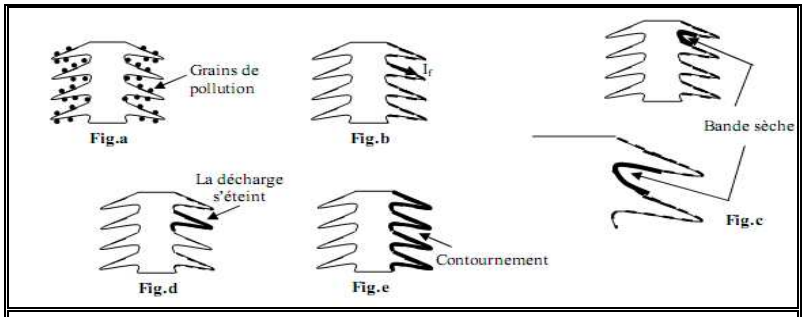


Figure. II.13 : Déroulement du contournement

II.5.2.Contrainte de contournement :

La contrainte de contournement d'un isolateur est le rapport de tension contournement à la longueur totale de l'isolateur.

II .5.3.Tension de contournement :

La tension de contournement est le niveau de tension le plus bas à partir du quel tous les arcs joignent les deux électrodes. [3] Elle dépend :

- De la résistivité volumique moyenne de la pollution.

- De la répartition de la couche de pollution.
- Du profil et des dimensions de l'isolateur.

II .5.4.Tension de tenue :

C'est le niveau de tension le plus important, que peut supporter une isolation sans provoquer de décharge disruptive (contournement dans le cas des isolateur). [1]

II .5.5.Courant de fuite :

C'est un courant de nature impulsionnelle. Il est de faible amplitude, circulant à travers la couche polluante le long de surface de l'isolateur .Il est donc à caractère électrolytique et de type résistif. Il devient important lorsqu'on s'approche de la tension de contournement .Il dépend de plusieurs facteurs, entre autres, la nature de la couche de pollution, la longueur de la ligne de fuite et les conditions atmosphériques

II .5.5.a .Courant de fuite critique :

C'est le courant minimal nécessaire pour provoquer le contournement sous pollution d'un isolateur à tension donnée. Il est indépendant du procédé d'essai ainsi que la forme de l'isolateur. Le seul facteur dont dépend ce courant sous une tension donnée est la ligne de fuite, c'est à dire la contrainte spécifique exprimée en kV/cm.

II .5.6. Longueur critique d'arc:

C'est la longueur limite X_C de l'arc partiel au-delà de laquelle l'arc conduira au contournement total.

II.5.7.Conductance superficielle:

La conductance superficielle est le rapport du courant de fuite circulant à la surface de l'isolateur sur la tension appliquée. Elle caractérise l'état global de la surface isolante.

II .6.Contournement sous tension alternative :

Pour une tension alternative, au passage par zéro la décharge s'éteint. A la demi-alternance qui suit, la décharge doit obligatoirement réamorcer et ne dispose tout au plus que de 10 ms pour produire le contournement. Pour ces conditions, le contournement est plus difficile en tension alternative qu'en tension continue.

Condition de réamorçage (empirique):$U = 800 \frac{X}{\sqrt{I}}$

I : courant de fuite maximal au cours de la demi-alternance précédente.

X : longueur de la décharge à réamorcer.

II .7.Pollution des isolateurs :

II.7.1. Formation des couches polluantes sur les isolateurs:

Les couches de pollution se déposent progressivement sur les surfaces des isolateurs des lignes de haute tension, du fait qu'ils forment des obstacles à l'écoulement d'air, transportant de diverses substances organiques ou minérales (poussières, sel marin, fumée, engrais,...). La couche de pollution se concentre en général, dans les parties protégées contre les facteurs de nettoyage naturel (vent violent, pluie abondante,…). La répartition de la pollution est loin d'être uniforme et homogène et dépend essentiellement :

Du profil de l'isolateur (forme géométrique de la surface).

- De l'orientation (verticale ou inclinée) de la chaîne par rapport au sol.
- De la distance à la source de la pollution.
- De la nature des dépôts, poids et taille des particules.
- Des caractéristiques climatiques du site (vent, pluie, givre,…).
- Des caractéristiques géographiques du site zone urbaine, industrielle, littoral, sahara,…etc.[2]

II.7.2 Sources de pollution :

La nature de la pollution est sujette à l'origine des agents entrant dans sa formation. On distingue trois sources :

1. Pollution naturelle.
2. Pollution industrielle.
3. Pollution mixte.

II.7.2.a. Pollution naturelle :

Elle dépend du climat et des facteurs météorologiques des régions .Elle est constituée de dépôts de poussières véhiculées par les vents tels que: sable, embruns marins,….etc., ces dépôts, et selon leur nature, se présentent comme suit :

II.7.2.b. Pollution marine :

Dans les installations au voisinage de la mer, les embruns portés par le vent se déposent progressivement sur les isolateurs, formant ainsi, une couche de sel qui recouvre

toute leur surface. Cette couche, qui humidifiée par les embruns eux-mêmes, devient de plus en plus conductrice. Ce qui donne naissance à des courants de fuite encore plus intenses, et des arcs pouvant se développer jusqu'à provoquer le contournement total de l'isolateur.

II.7.2.c. Pollution désertique :

Dans les régions désertiques, la pollution est due surtout aux tempêtes de sable. La densité de sel dans le sable est très élevée, et la rosée matinale est la seule source d'humidification dans ces régions. Cette humidification favorise la conduction sur la surface isolante.

II.7.2.d. Autre type de Pollution naturelle :

La pluie est un phénomène naturel. Dans certaines conditions de pluie violente, un film continu d'eau peut s'établir d'une extrémité à l'autre de la chaîne d'isolateur. Comme l'eau n'est jamais parfaitement isolante, ce phénomène peut conduire au contournement; c'est le contournement sous pluie.

- **Pollution industrielle :**

Dans des zones à forte concentration industrielle, au voisinage des usines de pétrochimie, de cimenteries, …etc., les isolateurs se recouvrent peu à peu de poussières résultant des fumées dégagées par ces dernières, et qui sont faiblement conductrices, mais hygroscopique, à la présence d'une humidité intense. Le sel contenu dans ces poussières abaisse considérablement la résistivité superficielle des isolateurs. De plus, dans les régions agricoles, les agents polluants peuvent être insecticide, engrais, grains de pollens, Cette pollution peut aussi être d'origine domestique, quant il s'agit des facteurs tels: fumées et gaz résultant des moyens de réchauffement des habitations ou de moyens de transport.

- **Pollution mixte :**

La pollution mixte est la plus sévère pour l'exploitation des ouvrages électriques. Car elle résulte de la combinaison entre deux ou plusieurs pollutions précitées. La couche électrolytique formée par le processus d'humidification des dépôts solides accumulés progressivement sur la surface des isolateurs, engendre une diminution considérable de la rigidité diélectrique.

II.8 .Mesure de la sévérité de pollution des sites :

Le choix des isolateurs à installer sur le réseau ne peut se faire que si la sévérité de la pollution est connue. Les principales méthodes qui ont été employées pour caractériser la sévérité d'un site sont :

II.8.1. La densité du dépôt de sel équivalent (DDSE) :

Cette méthode consiste à nettoyer la surface d'un isolateur pollué à l aide d'une matière absorbante (coton) et de l'eau distillée. La conduction de la solution contaminant permet par une mesure, d'obtenir la qualité équivalente de sel et par suite de déterminer la salinité équivalente.

II.8.2. Conductance superficielle :

A l'aide de mesure de courant de fuite d'un isolateur pollué dans un site donnée, nous mesurons le rapport G =I /V

La conductivité superficielle est obtenue en multipliant la conductance G par un facteur de forme de l'isolateur, généralement la tension est appliquée aux électrodes terminales, ce qui fournit la conductivité superficielle globale de l'isolateur.

II.8.3. Courant de fuite :

Si deux isolateurs identiques, l'un exposé à la pollution naturelle dans site donnée et l'autre pollué artificiellement dans un laboratoire, présentent les mêmes valeurs maximales du courant de fuite, sous une même tension, en peut dire que la pollution artificielle est alors équivalente à la pollution naturelle (réelle du site).

II.9.Classification des sites pollués :

Il est possible de caractériser la sévérité de la pollution d'un site en utilisant par exemple, la méthode du brouillard salin équivalent. La sévérité considérée est alors exprimée en termes de salinité équivalente. En effet, on peut faire correspondre à chaque site ou règne indifféremment une pollution naturelle, industrielle ou mixte, une solution saline équivalente.

Afin de définir l'isolement des lignes de transport et d'établir la corrélation entre la salinité équivalente et le niveau de pollution naturelle, quatre classes de sévérité ont été proposées :

- **Classe 1 :** Cette classe correspond à une pollution faible d'origine naturelle excepté marine. Elle concerne généralement des zones non industrielles ayant une faible densité d'habitations, situées loin de la mer. Un isolement normal convient facilement pour ces zones. La salinité équivalente maximale retenue pour cette classe correspond à une pulvérisation d'une solution de chlorure de sodium [NaCl] à 2.5 g/l de concentration.
- **Classe 2 :** Cette classe correspond à une pollution moyenne, naturelle (excepté marine) ou faiblement industrielle. Elle correspond à des zones à moyenne densité d'habitation et situées loin de la mer. Ces zones nécessitent un isolement renforcé. En classe 2, la salinité équivalente maximale retenue est de 10 g/l [NaCl].
- **Classe 3 :** Elle correspond une forte pollution marine et industrielle. Les zones considérées possèdent une forte densité d'habitation et situées près de la mer, donc exposées à des embruns marins relativement forts. Ces sites nécessitent un isolement important. La salinité équivalente maximale, concernant cette classe, est 80 g/l [Na Cl] .
- **Classe 4** : Elle correspond à des zones où le niveau de pollution est exceptionnel. La pollution dans ces zones peut être naturelle, industrielle ou mixte. Ces zones sont sujettes aux fumées industrielles et aux poussières conductrices produisant des dépôts très épais, et situées très proches de la côte et donc soumises à des vents marins très forts et très polluants. Elles nécessitent un isolement exceptionnel. La salinité équivalente maximale, pour cette classe, est de 160g/1[Na Cl].

II.10. Techniques de lutte contre la pollution:

L'augmentation du degré de pollution représente un risque immense pour les installations électriques. Pour cela, plusieurs techniques de lutte contre la pollution sont utilisées.

II.10.1. Allongement de la ligne de fuite :

Cette méthode permet d'adapter le dimensionnement aux nouvelles conditions de pollution. Deux techniques sont utilisées :

- Le changement de type d'isolateur (pour rallonger la ligne de fuite) : c'est une technique très coûteuse et souvent impossible à réaliser en poste.

- L'utilisation des matériaux polymères qui sont collés sur la surface des isolateurs existants pour prolonger la ligne de fuite.

II.11. Isolateurs plats :

Les isolateurs sans nervures ont la propriété d'accumuler moins de pollution que les isolateurs traditionnels et s'autonettoyant très bien sous l'effet du vent. [2]

II.11.1 Graissage périodique :

Par mesure économique, seuls les isolateurs de postes sont concernés. On utilise des graisses silicones. Grâce à ses propriétés hydrophobes, la graisse protège temporairement les isolateurs

II.11.2. Revêtement silicone :

Cette méthode consiste à appliquer, par pulvérisation ou au pinceau, un caoutchouc silicone qui se vulcanise à température ambiante à la surface des isolateurs. Ce revêtement protège les isolateurs et améliore leurs tenues sous pollution.

II.12. Les isolateurs composites :

Ils ont de bonnes propriétés hydrophobes et peuvent être utilisés dans des conditions de pollution très sévères. Cependant, ces isolateurs, revêtus d'un polymère voient leurs caractéristiques changer au cours du temps ; ils peuvent vieillir sous l'effet des différentes contraintes (électriques et climatiques) auxquelles ils sont soumis en service.

II.13. Nettoyage des isolateurs :

Le nettoyage manuel et le lavage périodique hors tension sont fréquemment utilisés à travers le monde. Néanmoins, l'application de ces méthodes pose des problèmes majeurs à cause des interruptions de service, parfois assez longues. Pour éviter ces coupures, un lavage sous tension des isolateurs est réalisé à l'aide d'installations fixes ou mobiles. Dans les deux cas, il est effectué selon des règles strictes concernant la qualité de l'eau du lavage, le processus du lavage et les distances de sécurité, et ce afin d'éliminer tout risque de contournement pendant le lavage.

II.14.conclusion :

Dans ce chapitre, une synthèse des différents aspects des phénomènes de pollutions est présentée. Les principales conclusions que l'on peut tirer de cette synthèse sont:

La pollution reste un facteur déterminant pour le dimensionnement des isolateurs dans les ouvrages de haute tension.

La connaissance de degré de pollution est une condition indispensable, pour prévoir une isolation externe convenable.

La nature et la sévérité de pollution dépendent, en grande partie, de la localisation géographique et de l'industrialisation du site.

La meilleure définition de degré de pollution d'un site est d'obtenir la salinité équivalente du site.

Les techniques de lutte contre la pollution actuellement connues (graissage, lavage, nouveau type d'isolateurs, revêtements hydrophobes) permettent de disposer aujourd'hui de solutions curatives à la plupart des problèmes de pollution rencontrés par les exploitants sur le réseau.

III.1 Introduction :

La méthode des éléments finis (MEF) est un outil bien maîtrisé actuellement, tant d'un point de vue recherche et développement que d'un point de vue utilisation dans l'industrie. C'est une méthode robuste qui a fait ses preuves, mais les défis d'aujourd'hui et de demain présentent de nouveaux enjeux et trouvent des limites à la MEF

III.2 Méthode des éléments finis :

La résolution exacte d'un système différentiel modélisant une problématique physique n'est pas toujours accessible. Lorsqu'il s'agit de modèles à géométries complexes, le recours à des méthodes numériques de calcul et, plus précisément, la méthode des éléments fiais (MEF) est donc recommandé. La MEF est un outil mathématique très puissant et largement adopté en ingénierie (électromagnétisme, mécanique, transfert de chaleur...) [5] [6] [7] [8] parce qu'elle offre la possibilité d'obtenir des solutions approximatives décrivant la réponse d'un système physique soumis à des mécanismes externes (une tension, une sollicitation, etc.) [9] [10] [11] [12]. L'évolution technologique connue en informatique a mis à notre disposition de nombreux logiciels d'éléments finis dédiés à plusieurs secteurs de recherche (**COMSOL Multiphasics**, Effel GID, etc.). Toutefois, il est indispensable de maîtriser les fondements de la MEF pour pouvoir résoudre adéquatement les problématiques rencontrées,

III.3 Étapes de la Méthode des éléments finis :

L'application de la MEF à un problème revient à suivre les étapes successives explicitées comme suit [10]

III.3.1.Première étape : définition du problème

Convertir la problématique physique en une équation différentielle aux dérivées partielles (EDP) à satisfaire en tout point d'un domaine géométrique, et ce, en prenant en Considération les conditions imposées sur les frontières de ce domaine (conditions aux limites). Ces conditions sont en générale de trois types [12].

- Condition de Dirichlet qui se traduit par une valeur que la solution doit vérifier sur les limites du domaine (ex : potentiel, température, déplacement);
- Condition de Newman qui s'exprime par la valeur de la dérivée de la solution aux bords des frontières (ex ; pression, flux);
- Condition de Robin, appelée également condition mixte, qui décrit une combinaison des conditions de Newman et Dirichlet (ex ; convection),

III.3.2. Deuxième étape : forme variationnelle

Reformuler l'EDP sous forme d'identité intégrale nommée "forme variationnelle" ou encore "forme faible". Compte tenu des conditions aux limites, la fonction inconnue intervient ainsi avec des dérivées d'ordre inférieur dans la nouvelle forme obtenue (forme variationnelle). Dans cette recherche, la MEF est employée pour calculer la distribution du potentiel le long de la surface de l'isolateur selon L'équation de Laplace suivante [13]

$$\nabla^2 \emptyset = 0 \qquad \text{III(1)}$$

La forme variationnelle de cette équation s'écrit donc [10] :

$$\iint_{\Omega} \psi \ . \nabla^2 \emptyset . d\Omega = 0 \qquad \text{III(2)}$$

Où ψ est une fonction quelconque définie sur Ω appelée fonction test ou fonction de pondération.

III.3.3. Troisième étape : maillage, choix des nœuds et des fontions d'interpolation

Diviser le domaine Ω en sous-domaines Ω_i (pas nécessairement identiques) appelés mailles. Ces dernières sont munies d'une partition de nœuds, Le choix des nœuds aux extrémités des mailles offre deux avantages, à savoir le nombre de nœuds est réduit puisqu'il y aura des nœuds communs à chaque deux mailles voisines et la continuité de la solution approchée est assurée, car celle-ci aura la même valeur aux nœuds communs. Le deuxième pas de cette phase consiste à définir une fonction locale noté : f_i et appelée fonction d'interpolation sur chaque sous-domaines Ω_i. En effet, la solution F fournie par la MEF n'est qu'une juxtaposition des fonctions d'interpolation f_i (i=1,2….)., La maille complétée par ces informations est appelée élément. Les bibliothèques des logiciels d'éléments finis disposent d'un nombre important d'éléments. En voici quelques-uns [10] [9]

- Des lignes pour les problèmes à une dimension (1D);
- Des triangles et des quadrangles pour les problèmes â deux dimensions (2D);
- Des tétraèdres, des hexaèdres et des pentaèdres pour les problèmes à trois dimensions (3D) ;

Il est à noter que f_i doit être complètement et uniquement déterminée par les valeurs de la solution imposées aux nœuds. En d'autres mots, l'évaluation de f_i à chaque nœud de l'élément engendre un système d'équations dont la résolution donne f_i (par exemple : si f_i est un polynôme, les valeurs nodales de la solution servent à déterminer les coefficients de ce polynôme). La résolution d'une problématique par la MEF se ramène donc à trouver

ces valeurs nodales. Cette étape est de grande importance en ce qui a trait à la précision des résultats.

Par soucis de réduction de temps de calcul, l'élément utilisé (maille + nœuds + fonction d'interpolation) pour discrétiser la géométrie est une transformation d'un élément de référence standard topologiquement équivalent, prédéfini et préprogrammé à l'avance dans les bibliothèques des logiciels d'éléments finis. Le maintien de la continuité entre les éléments finis est également assuré par ce passage d'éléments [12].

III.3.4. Quatrième étape : discrétisation de la forme variationnelle

Satisfaire la forme variationnelle à l'aide des fonctions d'interpolation f_i déterminées en fonction des valeurs nodales pour chaque élément (plutôt que satisfaire l'EDP). Cette formulation est résolue en imposant des restrictions sur les fonctions de pondération ψ [10], Effectivement, si la condition « quelle que soit ψ » est conservée, F (solution approchée) serait une solution exacte de l'EDP. Il existe une infinité de manières de définir les fonctions de pondération ψ. Chacune de ses manières engendre une variante différente de la MEF qui conduit alors à une solution différente approximative, il faut toutefois que ce choix de fonctions mène à un système algébrique d'équations à solution unique [10].

La discrétisation de la forme variationnelle par la méthode de Galerkine, à titre d'exempte, donne un système d'équation de la forme suivante après l'assemblage des équations pour chaque élément [12]

$$[A_e][V_e]=[b_e] \qquad \text{III(3)}$$

Avec

$[A_e]$= : la matrice de rigidité de l'élément considéré.

$[b_e]$= le vecteur second membre du même élément.

$[V_e]$= : le vecteur des valeurs nodales du même élément

Les conditions aux limites sont prises en compte dans le vecteur $[b_e]$. À la suite du calcul des contributions de chaque élément fini, leur somme est simplement obtenue en additionnant les matrices de rigidité et les vecteurs seconds membres. La forme globale s'écrit donc [12] .

$$[A][V]= [b] \qquad \text{III(4)}$$

Où la dimension de [A], [b] et [V] est en corrélation avec le nombre de degrés de liberté du système discret [12]. Par rapproche de Galerkine, il en résulte un système matriciel symétrique [12]. La résolution de ce dernier est donc grandement simplifiée.

III.3.5. Cinquième étape : résolution du système matriciel

Résoudre le système matriciel explicité par la formule (3,4), soit par [10] [12].

- La méthode directe (élimination de Gauss, décomposition de Choleski,...);
- La méthode itérative (Jacobi, gradient conjugué).

La solution approchée est rendue définie avec les valeurs nodales recueillies

III.4 Avantages et limitations de la MEF :

La MEF est fortement conseillée pour résoudre les problèmes modélisés par une EDP, mais cela n'empêche pas qu'elle ait certaines lacunes.

a) Avantages :

- La MEF est désormais accessible par le biais de logiciels commerciaux performants.

Ces logiciels, qui n'exigent pas une connaissance approfondie de la MEF, ne prennent que quelques minutes pour effectuer la simulation. En outre, ils proposent des outils de visualisation graphique pour présenter les résultats. Ces deux points ont encouragé plusieurs chercheurs dans des domaines divers à l'adopter comme principale méthode de résolution;

- En ce qui est de la discrétisation de la géométrie Ω, il est possible d'utiliser plus d'un type d'élément dans le même maillage afin de s'approcher au mieux à la géométrie Ω
- la MEF peut être appliquée dans des conditions fort complexes, à savoir lors de tout problème physique ou mathématique (différentiel, intégral, intégro-différentiel vairtionnelle ...), linéaire ou non linéaire, domaines et géométrie quelconques, propriétés physiques à valeurs constantes ou variables (rigidité, densité, conductivité, résistivité, etc.), sollicitations externes de toutes formes ainsi que lorsqu'il s'agit de problèmes de natures variées (problème aux limites, transitoire..) [12],

b) Limitations :

- La solution calculée reste toujours dépendante des données numériques initiales
- (caractéristiques des matériaux, conditions aux limites) , En ce sens, l'influence de ces paramètres sur les résultats requiert un nouveau calcul avec d'autres valeurs;
- La modification d'une partie de la géométrie entraîne un nouveau maillage et, donc, une remise à zéro dans les calculs;

- Un mauvais choix du maillage proposé automatiquement par les logiciels limite la précision des résultats. L'usager doit donc porter une attention particulière lors de cette étape;
- Le traitement d'une problématique par la MEF implique une connaissance parfaite du domaine géométrique et des conditions aux limites, ce qui complique la mise en œuvre de ce traitement lorsque ce n'est pas le cas.

III.5 Description du logiciel (COMSOL Muitiphysics) :

III.5.1 Introduction :

Comsol Multiphysics, anciennement appelé FEMLAB, est avant tout un outil de résolution d'équations aux dérivées partielles par éléments finis. Sa particularité est de disposer d'une base de données d'équations permettant de modéliser différents phénomènes physiques, comme l'électrostatique, ainsi que multiple phénomènes physiques modélisées en PDE. Développé initialement comme une toolbox de MATLAB, il dispose aujourd'hui de son propre environnement graphique permettant à la fois le dessin des géométries et l'affichage de résultats en post-traitement. Sa spécificité est également de permettre de coupler différentes EDP, de manière à décrire des phénomènes multiphysiques, particulièrement adapté à la micro-électronique. Il est ainsi possible d'obtenir la déformation d'une membrane due à la pression dans un liquide par exemple. Ou encore l'élévation de température dans un conducteur due au passage d'un courant électrique.

Des fonctions avancées permettent d'entrer manuellement des EDP spécifiques. De plus, les données du logiciel sont accessibles depuis Matlab, ce qui permet la réalisation de scripts.

III.5.2 L'interface graphique (le navigateur de modèle)

Au démarrage du logiciel, le navigateur de modèle apparaît. C'est lui qui permettra de spécifier le ou les modèles physiques qui seront utilisés. C'est aussi ici que la dimension de l'espace est choisie. Pour chacun des modèles, il est précisé quelles sont les variables propres à ce modèle.

En effet, il faut crée manuellement des variables pour chaque modèle, toujours dans le navigateur de modèle il est possible de choisir les propriétés du mode d'application et même la forme de l'équation (linéaire, non linéaire ou idéale) toute fois plus de détailles sont proposés selon la précision souhaité.

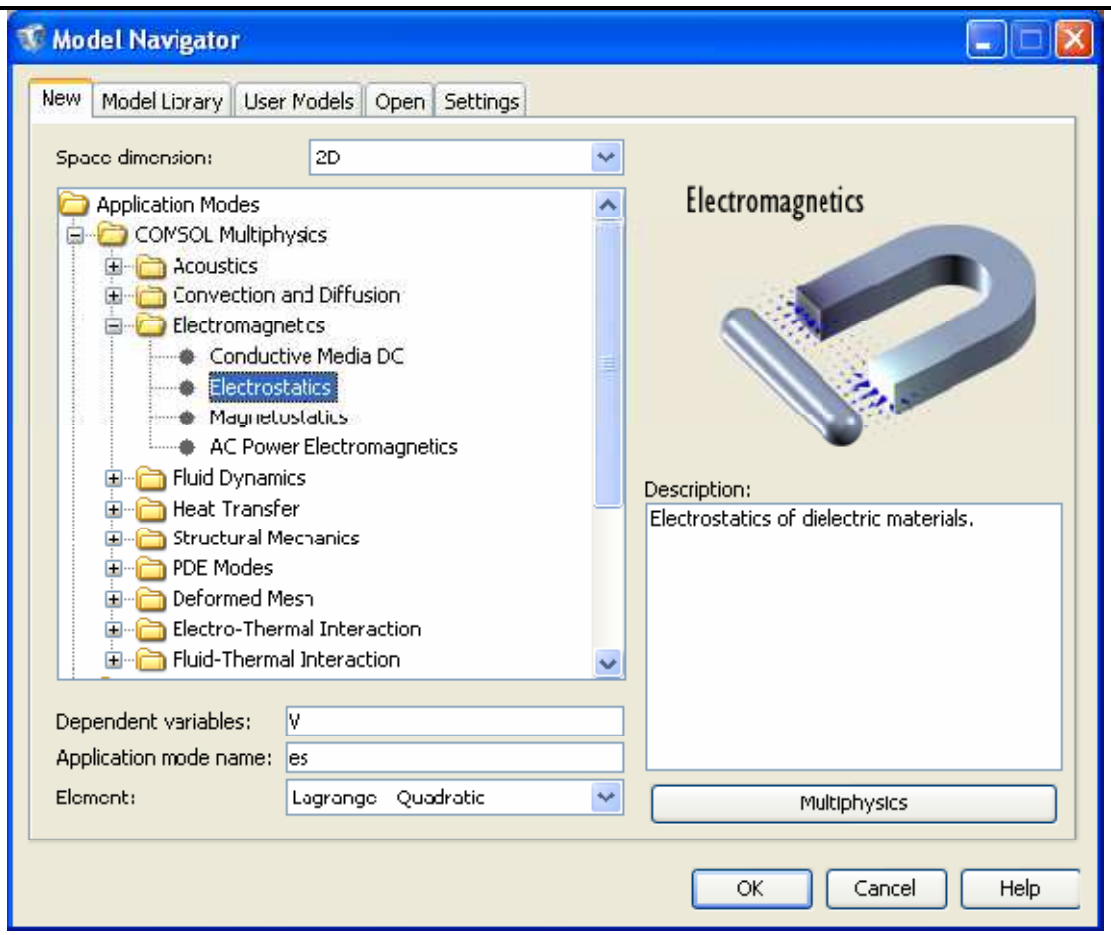


Figure III.1 : Fenêtre principal de Comsol (le navigateur de modèle)

III.5.3 Modélisation à l'aide du Graphical User Interface

Lorsque le ou les modèles ont été choisis, l'écran général apparaît. Nous allons donc d'abord construire la géométrie du problème. La G.U.I (**Graphical User Interface)** permet de créer le domaine sur lequel on cherche à résoudre l'E.D.P à l'aide de commandes classiques de logiciels de dessin (rectangles, lignes brisées, ellipses). On peut donc dessiner un large éventail de domaines différents

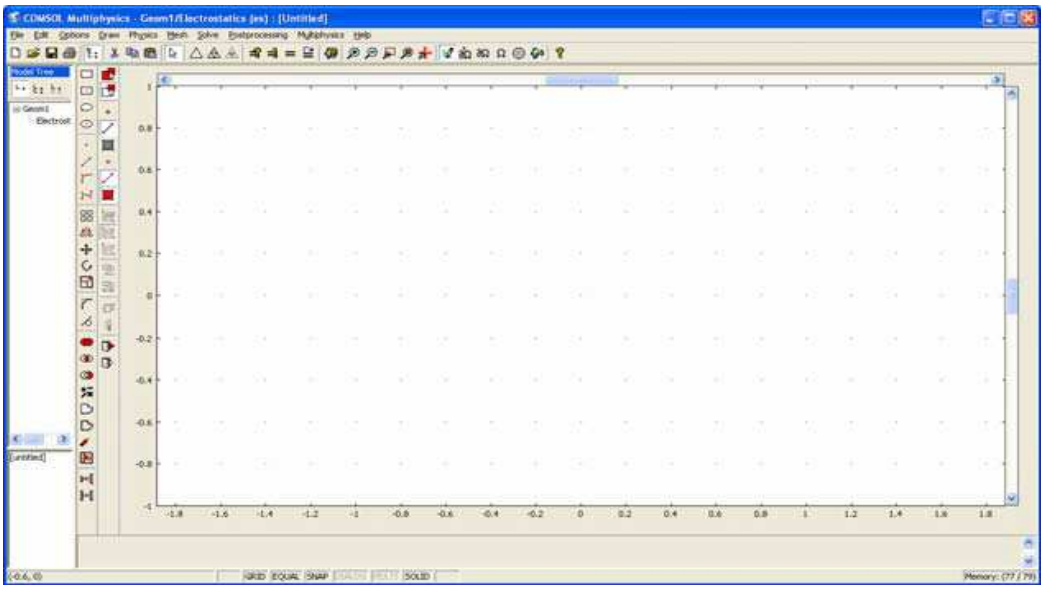
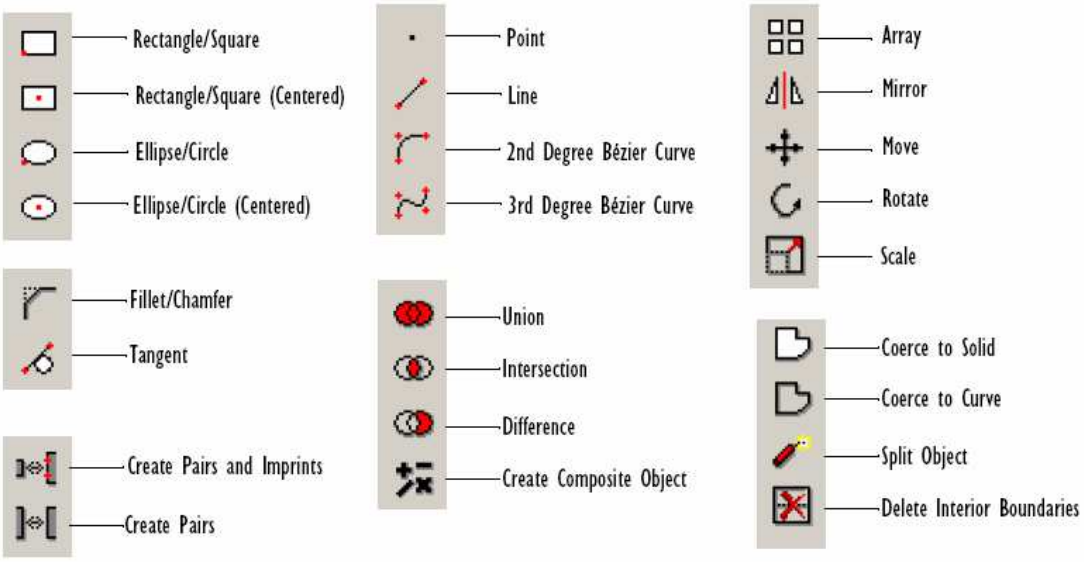


Figure III.2 : Graphical User Interface **Comsol Multiphysics**

III.5.4 Dessin de la Géométrie

La première chose à faire une fois le programme ouvert est de dessiner la géométrie de notre système. Le mode Dessin 2D par défaut fournit une barre d'outils très varier et complète pour la création de différente géométries.



III.5.5. Modélisation de la physique et des équations

Afin d'établir des modèles dans Comsol Multiphysics nous devons suivre une certaine hiérarchie notamment pour créer un nouveau modèle, spécifier la physique, adapter des équations prédéfinies, écrire nos propre PDEs, modeler la physique sur les géométries multiples, et même d'installer un modèle avec ses :

- Équations
- États de frontière et d'interface
- Propriétés matérielles
- Conditions initiales

III.5.6. Introduction des propriétés des domaines et sous-domaine

Le but est ici de définir les paramètres physiques qui définissent le domaine : constante diélectrique, charges volumiques, etc. Les paramètres sont évidemment liés au modèle physique étudié. Il est également possible d'écarter un des domaines du modèle étudié. Nous pouvons toute aussi bien ajouter des expressions au modèle.

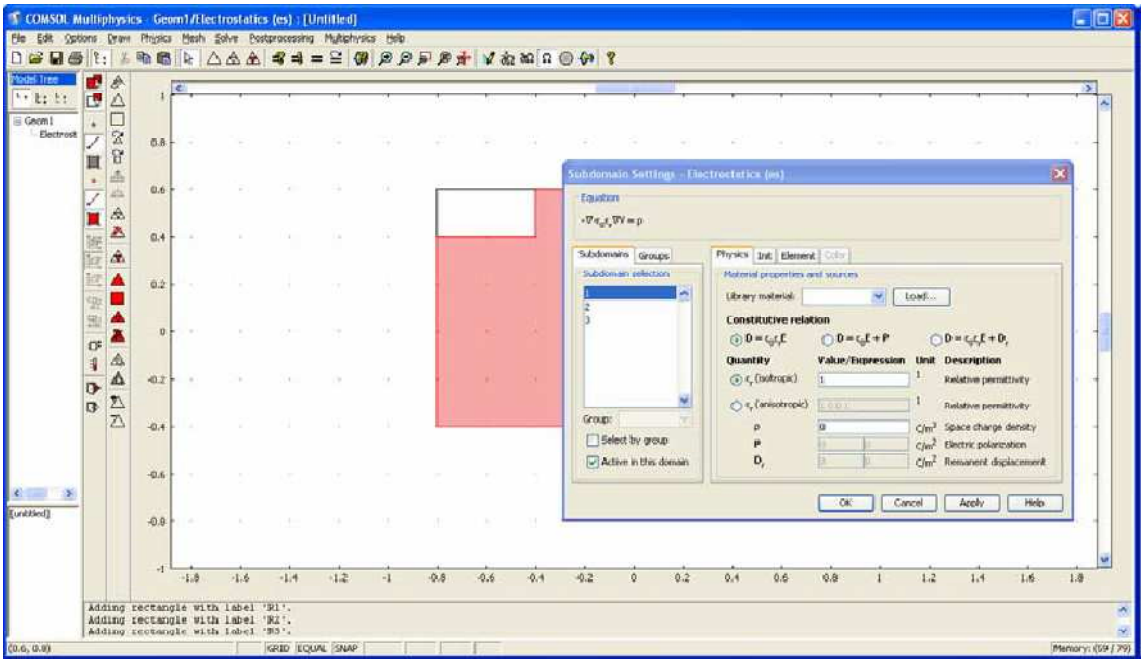


Figure III.3: Propriété de sous-domaine **Comsol Multyphisics**

III.5.7. Introduction des conditions aux limites

Pour résoudre les EDP, il est nécessaire de définir un certain nombre de conditions aux limites cohérentes.

A chaque frontière de domaine est associé un segment orienté. Il est possible de donner des valeurs de condition aux limites pour chacun de ces segments. Les options seront différentes suivant qu'il s'agisse ou non d'une frontière intérieure au système.

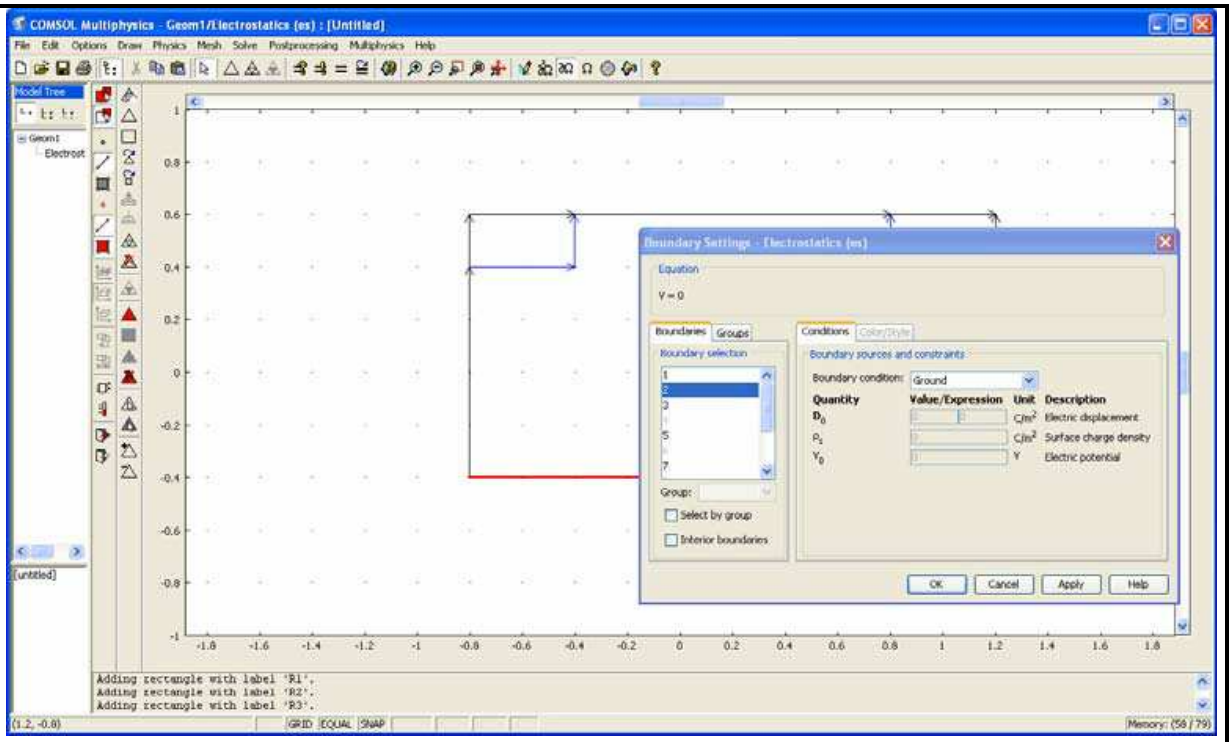


Figure III.4 : Fenêtre des Condition aux limites

III.5.8. Création de maille ou maillage

Un maillage est une partition du modèle de la géométrie en petites unités de formes simples. Nous pouvons créer un maillage libre dans Comsol Multiphysics en cliquant sur le bouton Initialiser Mesh sur la barre d'outils principale. Il peut être utilisé sur tous types de géométrie. Il crée des maillages non structurés qui n'ont pas de restrictions en termes de distribution des éléments.

III.5.9. Eléments de Maille

Pour une géométrie 2D le générateur de maille divise les sous-domaines en éléments triangulaires ou quadrangulaires de maille. Si la frontière est courbée, ces éléments représentent seulement une approximation de la géométrie originale. Les côtés des triangles et des quadrangulaires s'appellent les bords de maille, et leurs coins sont des sommets de maille.

Un bord de maille ne doit pas contenir des sommets de maille dans son intérieur. De même, les frontières définies dans la géométrie sont divisées (approximativement) dans des bords de maille.

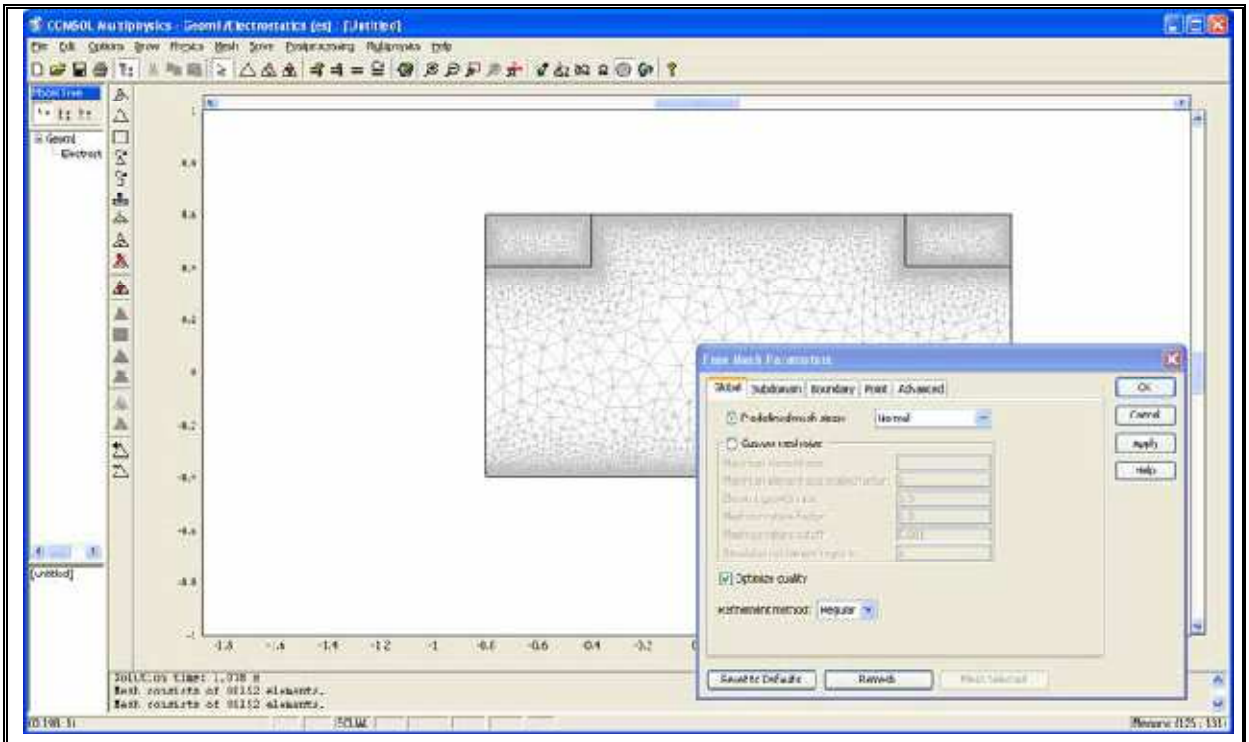


Figure III.5 : Elément du Maillage avec PDE tool

III.5.10. Création de mailles libres

Lors de la création de mailles libre, le nombre d'éléments du maillage est déterminé par la forme de la géométrie et les paramètres de maille différents. Nous pouvons contrôler les paramètres de maille en allant dans le menu Mesh et en choisissant Free Mesh Parameters, ce qui ouvre la boîte de dialogue Paramètres de maille libre. Avec les paramètres de maille, nous pouvons spécifier un maillage local-élément et le contrôle de la distribution des éléments.

III.5.11. Les paramètres globaux

La fenêtre apparaissant (figure) nous permet de définir les paramètres de maille qui déterminent la taille des éléments et la distribution des éléments dans la géométrie.

Un maillage prédéfini peut générer une maille extrêmement fines, extra, fine, fine, normal, grossier, grossier, en sus maillage grossier, ou extrêmement grossières. Nous pouvons aussi Personnaliser le maillage si vous souhaitez spécifier manuellement les paramètres de maillage global. Les maillages ressemblent a celui-ci :

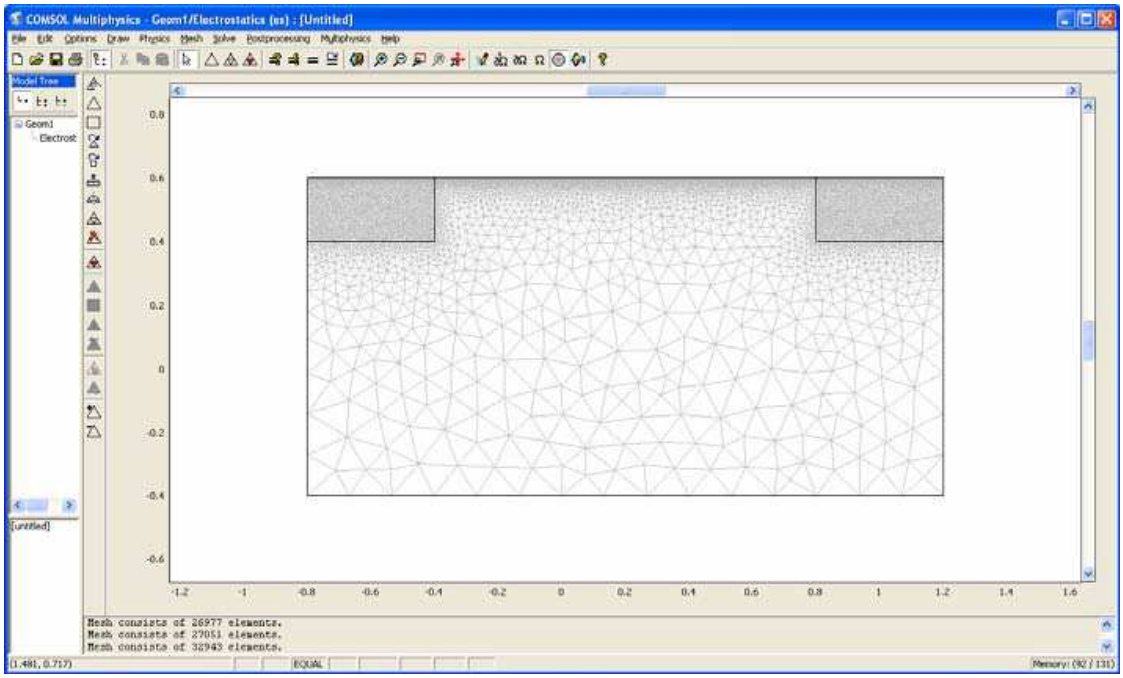


Figure III.6 : Exemple de maillage d'une géométrie d'un MOS avec PDEtool

III.5.12 Résolution du problème

Lorsque le problème est complètement défini, il ne reste plus qu'à le résoudre.

Il est recommandé d'examiner les différents solveurs de **Comsol Multiphysics** ainsi que les paramètres pour choisir le meilleur pour une application donnée. De même, lors de la résolution d'un problème multiphysique, il est possible de ne résoudre que pour une certaine partie des variables.

PDE tool inclut un ensemble de solver pour des problèmes à la base de PDE. Les types disponibles sont mentionnés ci-dessous :

• Stationary solver (pour la résolution de PDE Stationnaire linéaire ou non linéaire).

• Time-dependent solver (pour la résolution de PDE dépendante du Temps linéaire ou non linéaire).

• Eigenvalue solver (Pour la résolution de PDE par Valeurs Propres).

• Parametric solver (pour la résolution stationnaire de problèmes PDE -linéaire ou non linéaire- dépendant d'un Paramètre).

• Adaptive solver (Pour la résolution Stationnaire ou de valeurs propres de problèmes PDE linéaire ou non linéaire avec raffinement adaptatif de maillage).

III.5.13. Sélection du type d'analyse

Beaucoup de modes d'application suggèrent un ensemble de types d'analyse comme propriété de mode d'application. Les types d'analyse possibles varient avec le domaine d'application. Types que vous pouvez compter voir inclure stationnaire, eigenfrequency, coupure, dépendant du temps, et analyses paramétriques.

Nous pouvons choisir le type d'analyse en choisissant la plupart des modes d'application dans le navigateur modèle. Pour changer le type d'analyse on ouvre la zone de dialogue de propriétés de mode d'application ou à partir de la liste d'analyse dans la zone de dialogue de paramètres de solutionneur.

Les types d'analyse souvent à installation de diverses équations en mode d'application, et le type suggèrent également un solutionneur de défaut.

Pour dépasser ce défaut, allez à la zone de dialogue de paramètres de solutionneur.

Faire ainsi peut avoir comme conséquence un arrangement d'équation qui est incompatible avec le solutionneur que vous choisissez. Vous pouvez désactiver le choix automatique de solutionneur basé sur le type d'analyse en dégageant la boîte de contrôle choisie automatique de solutionneur sous la liste d'analyse dans la zone de dialogue de paramètres de solutionneur.

III.5.14. Progression de la résolution

Quand nous résolvons un problème il est utile de savoir ce qui vient après. Dans ce but **Comsol Multiphysics** fournit une fenêtre de progression. Elle apparaît quand on fait le maillage d'une géométrie, lors de la résolution d'un problème, ou en créant un rapport modèle

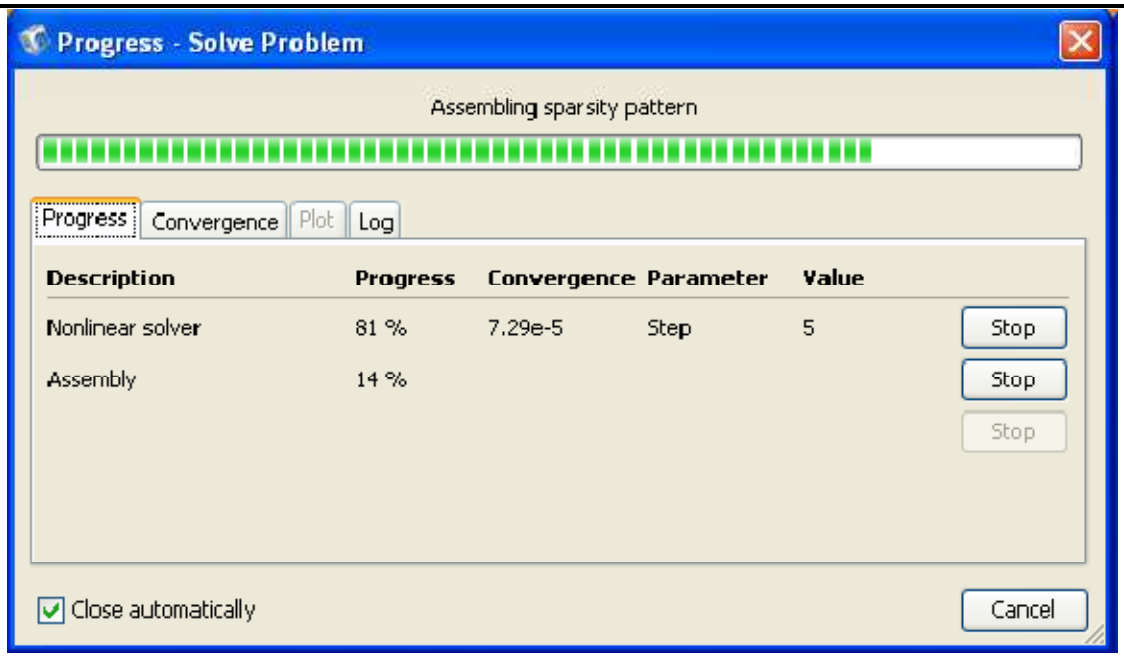


Figure III .7 : Fenêtre de progression de la résolution

Au dessus de la fenêtre de progression nous pouvons voir ce qui se produit à l'heure actuelle avec l'évaluation du temps restant.

Le champ de description montre le nom du solutionneur, le champ de progrès montre une évaluation du progrès du solutionneur, et le champ de convergence montre une évaluation de la convergence du solutionneur si disponible. Les champs de paramètre et de valeur contiennent l'information solutionneur-dépendante : le solutionneur adaptatif montre le nombre de génération adaptatif ; le solutionneur dépendant du temps montre le temps ; le solutionneur paramétrique montre la valeur de paramètre ; le solutionneur non linéaire et les solutionneurs de système linéaires itératifs montrent le nombre d'itération.

IV.1. Introduction :

La mesure directe du champ électrique sur la surface de l'isolateur étant quasiment impossible à obtenir, l'utilisation d'un outil numérique s'impose. Ce n'est que depuis quelques décennies que l'utilisation des méthodes numériques est devenue un puissant outil de calcul. Par ces nouvelles alternatives mathématiques et grâce à l'avancement des technologies de l'informatique, le calcul de la distribution de champ électrique est maintenant possible.

Dans ce chapitre nous allons étudier par simulation la distribution de champ et du potentiel électrique sur la surface d'un isolateur réel. L'isolateur qui a fait l'objet de notre étude est un isolateur (U120) utilisé dans les lignes aériennes de HT de la région d'Ouargla Figure IV.1.

Nous allons reproduire la même géométrie de l'isolateur à partir des dessins et caractéristiques technique données par le constructeur.

Pour étudier l'effet de la matière isolante nous avons pris trois types de matière qui sont le verre, la céramique et la porcelaine. Par la suite, une couche conductrice sur la surface de l'isolateur est introduite pour étudier l'effet de la pollution.

Figure IV.1 Isolateur U120 utilisé dans les lignes MT dans la région d'Ouargla

IV.2 Caractéristiques de l'isolateur :

Les caractéristiques de l'isolateur U120 sont résumées dans les tableaux suivants :

Isolateur « capot et tige » type aérodynamique U120 :

- Caractéristiques dimensionnelles

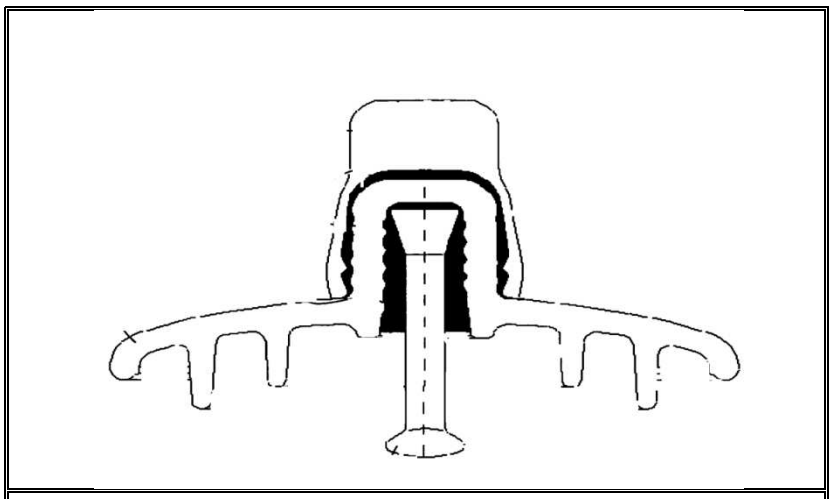
Diamètre (D) mm	360
PAS (P) mm	127
Ligne de fuite (mm)	350
Désignation de l'assemblage (Norme)	16
Poids net approximatif	5,6Kg
Goupille	acier inoxydable

Tableau IV.1 : Caractéristique dimensionnelles de l'isolateur U120

- Caractéristiques électriques **:**

Tension de tenue au choc, à sec positive	90KV
Tension de tenue au choc, à sec négative	100KV
Tension de tenue .50HZ à sec	55KV
Tension de tenue ,50HZ sous pluie	50KV
Charge de rupture électromécanique et mécanique	120KN
Tension de perforation dans l'huile	130KV
Niveau maximum de perturbation radioélectrique à 1MHZ	34Db

Tableau IV.2 : Caractéristique électrique de l'isolateur U120



Figuire IV.2 Dessin technique de l'isolateur

L'impression de ce dessin technique de l'isolateur (figure IV.2) sur papier gradué a permet de relever les mesures géométriques dans un repère XY de chaque élément constituant l'isolateur comme indiquent les tableaux IV.3 IV.4 IV.5 IV.6 IV.7, qui représentent respectivement la tige, le verre, le ciment de la partie inférieur, le ciment de partie supérieur et le capot. La limite inférieure de la tige est prise comme origine(X=0,Y=0).

X (cm)	0	1.5	1.5	0.75	0.75	1.35	0
Y (cm)	0	0.5	0.8	1.5	10.2	12.4	12.4

Tableau IV.3 : Mesure géométrique de la tige

X(cm)	0	1	1.5	2	2.5	3	5	5.5	5.5	6.5
Y(cm)	12.7	12.7	12.3	6	6	6.5	6.5	6	4	4

Suite

6.5	8.5	8.5	9.5	9.5	11.5	12	12.5	12.7	12.5	11.5	3.7	3	3	1.5	0
6	5.5	3	3	5.5	5	4	4	4.5	5.5	6.3	8	8	12.5	14	14

Tableau IV.4 : Mesure géométrique du verre

X (cm)	0	2	3	3.2	3.7	4	3	0
Y (cm)	14.3	14.3	13	8.2	8	10	14.6	14.6

Tableau IV.5 : Mesure géométrique du capot

X (cm)	0	1.3	0.75	0.75	2	1.5	1	0
Y (cm)	12.4	12.4	10.2	6.3	6	12.3	12.7	12.7

Tableau IV.6 : Mesure géométrique du ciment(1)

X (cm)	0	1.5	3	3	3.7	3.2	3	2	0
Y (cm)	14	14	12.5	8	8	8.2	13	14.3	14.3

Tableau IV.7 : Mesure géométrique du ciment(2)

La simulation de l'isolateur par le logiciel **COMSOL Multiphysics** consiste à suivre les étapes suivantes :

VI.3 Définition De La Géométrie :

L'introduction des mesures géométriques dans la rubrique **Geometry** de logiciel **COMSOL** permet d'avoir le schéma tridimensionnel de la Figure IV.3 suivante qui reproduise d'une façon adéquate l'isolateur réel.

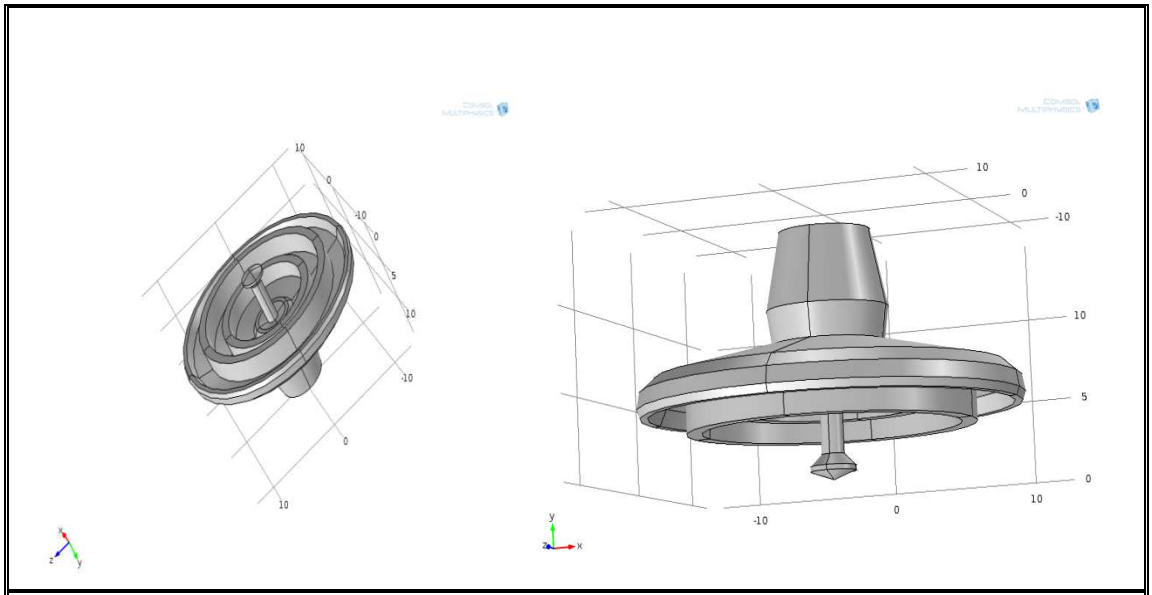


Figure IV.3 L'image de simulation de l'isolateur U120 en géométrie tridimensionnel

Du fait que la géométrie de l'isolateur est axisymétrique les calculs de simulation seront effectués sur une géométrie bidimensionnelle pour diminuer le temps de simulation et l'espace mémoire. Le schéma bidimensionnel est représenté dans la Figure IV.4 suivante.

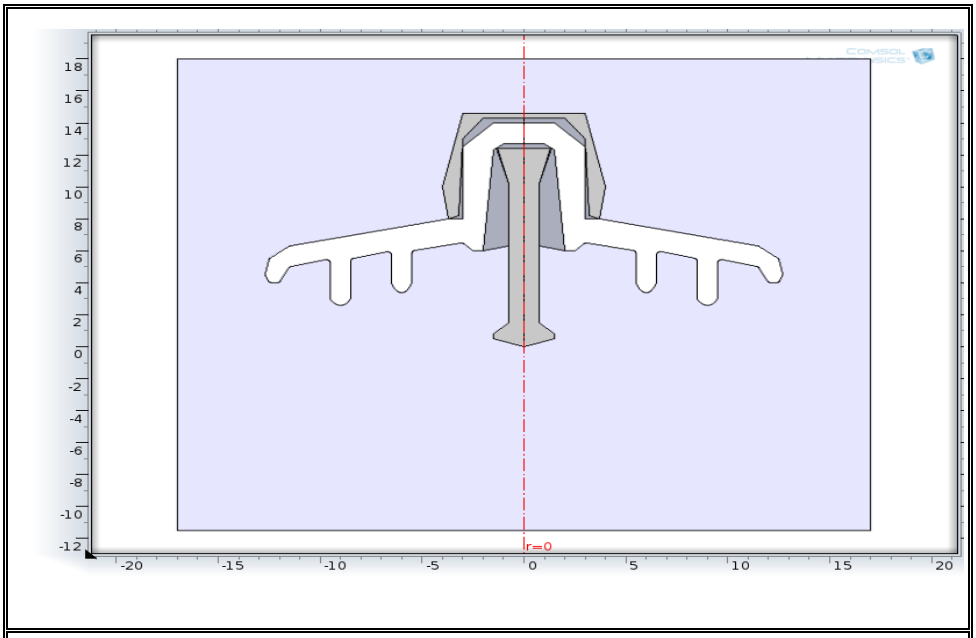


Figure IV.4 Le géomètre bidimensionnel

IV. 4 Définition des domaines :

Après avoir introduit les mesures géométriques, nous définissons chaque matière séparément. Les matériaux utilisés sont:

- L'air entourant l'isolateur
- Verre, Céramique ou Porcelaine pour la partie isolante
- Fer (iron) pour le capot est la tige.
- Cément pour la l'agent de liaison entre le verre et les parties métalliques

IV. 5. Introduction des propriétés des domaines et sous-domaine :

Outre que les propriétés électriques comme la permittivité, perméabilité et conductivité de chaque domaine la valeur de la tension de la tige est fixée à 50 kV. Celle du capot est fixée à une tension nulle qui représente la masse de terre.

IV.6. Création de maille ou maillage :

Le maillage est distribué d'une façon fine surtout dans l'interface air-verre (Figure IV.5) où la rigidité diélectrique est la plus faible. Cette interface représente la ligne de fuite de l'isolateur où le calcul du champ électrique et le potentiel aura lieu.

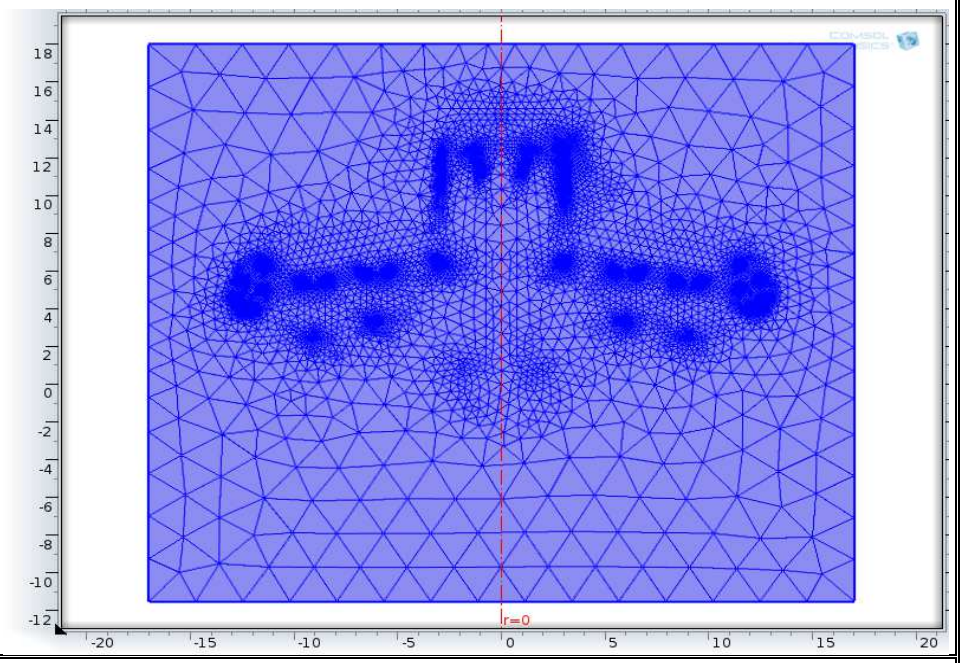


Figure IV.5 Création de maille ou maillage

IV.7 Résolution du problème

IV.7.1 Effet de la nature de la matière isolante

Les résultats de simulation sont donnés par la Figure IV.6 qui représente la distribution du potentiel dans la totalité des domaines.

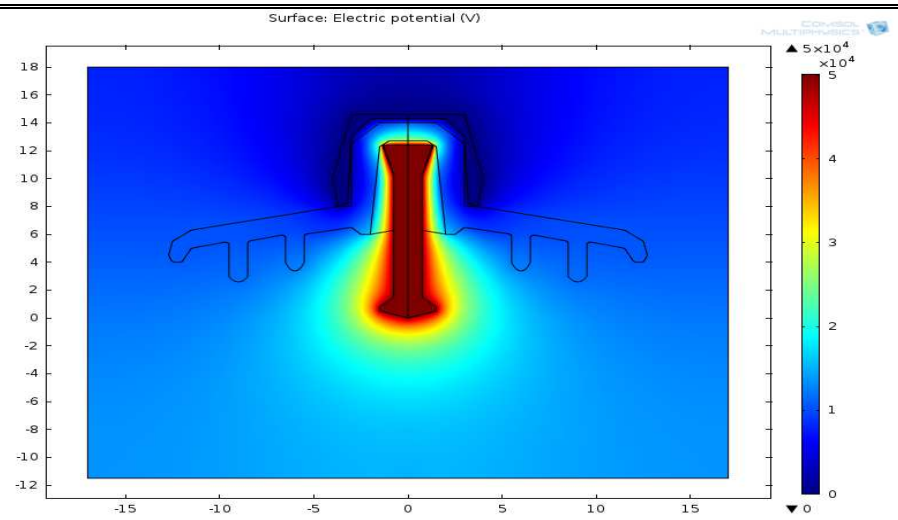


Figure IV.6 Distribution du potentiel pour l'isolateur propre en verre

Nous nous somme intéressé par l'étude du potentiel et du champ électrique le long de la ligne de fuite. Cette ligne est donc illustrée par une couleur bleu comme indiqué dans la Figure IV.7 suivante.

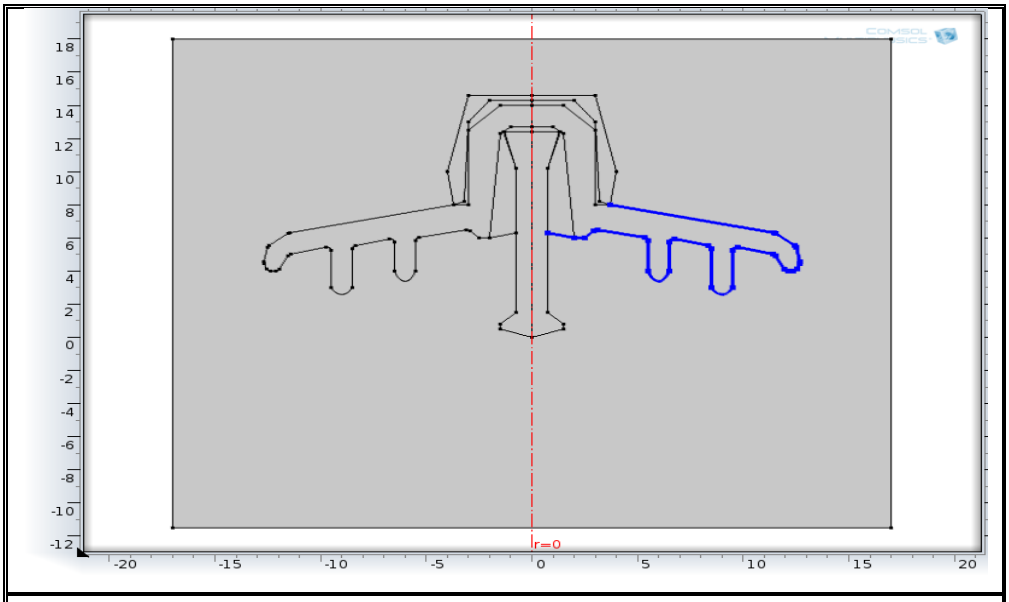


Figure IV.7 Ligne de fuite objet de calcul de potentiel et du champ

Les valeurs du potentiel et du champ électrique sont données par la Figure IV.8 et la Figure IV.9 respectivement.

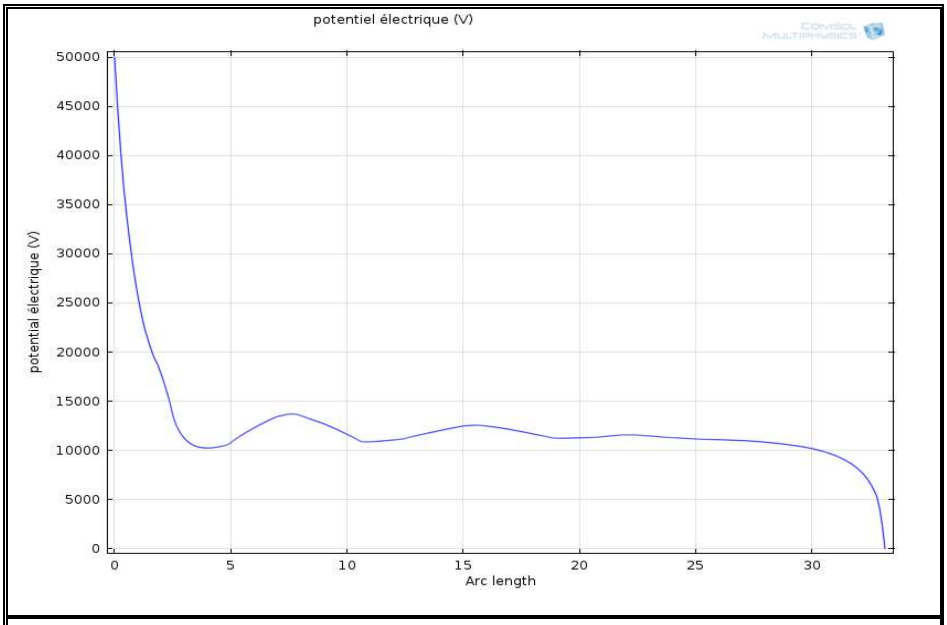


Figure IV.8 Distribution du potentiel le long de la ligne de fuite pour l'isolateur propre en verre

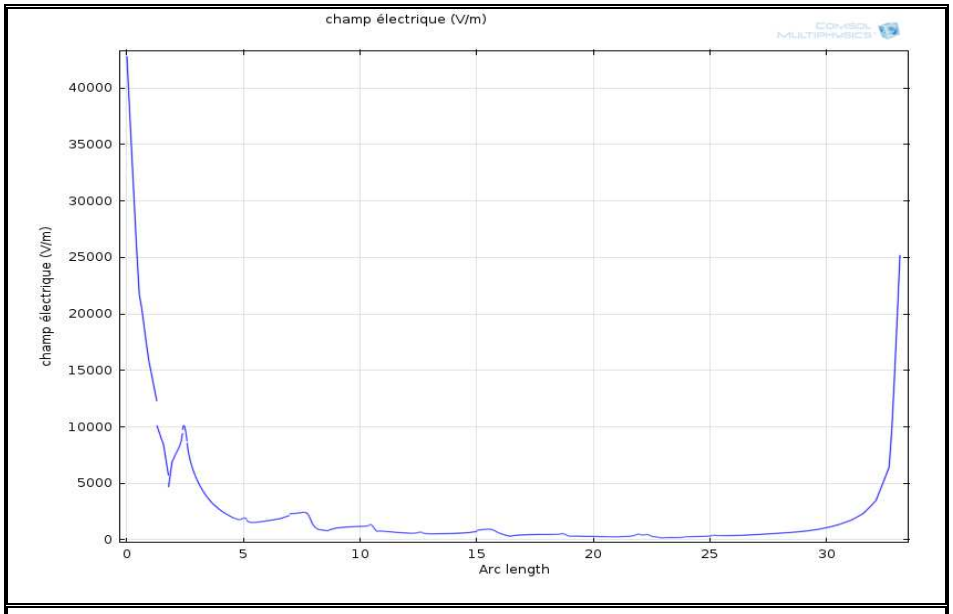


Figure IV.9 Distribution du champ électrique le long de la ligne de fuite pour l'isolateur propre en verre

Pour étudier l'impact de la nature de la matière isolante sur la distribution du potentiel et du champ électrique, nous avons remplacé le verre premièrement par la céramique avec une permittivité relative de 30 puis par la porcelaine avec une permittivité de 6.5.

- Céramique

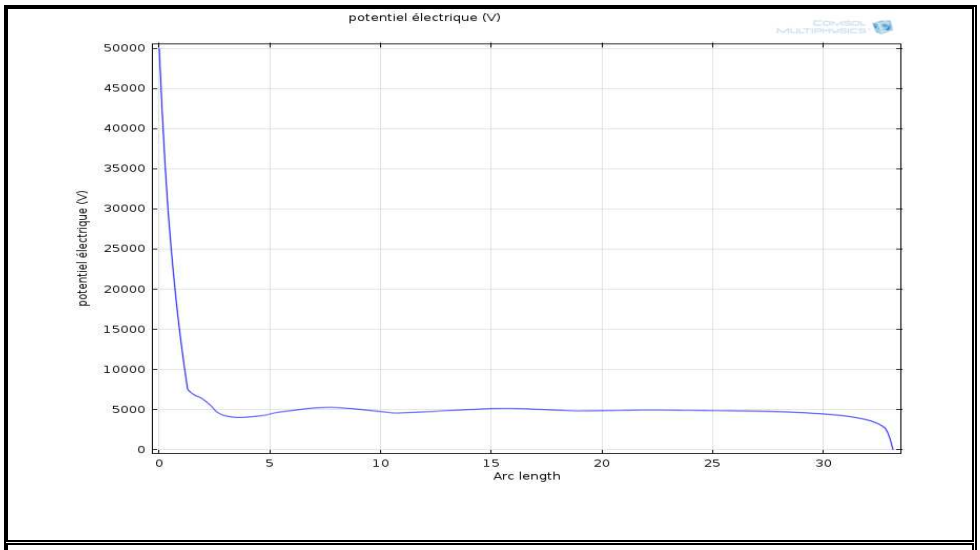


Figure IV.10 Distribution du potentiel le long de la ligne de fuite pour l'isolateur propre en céramique

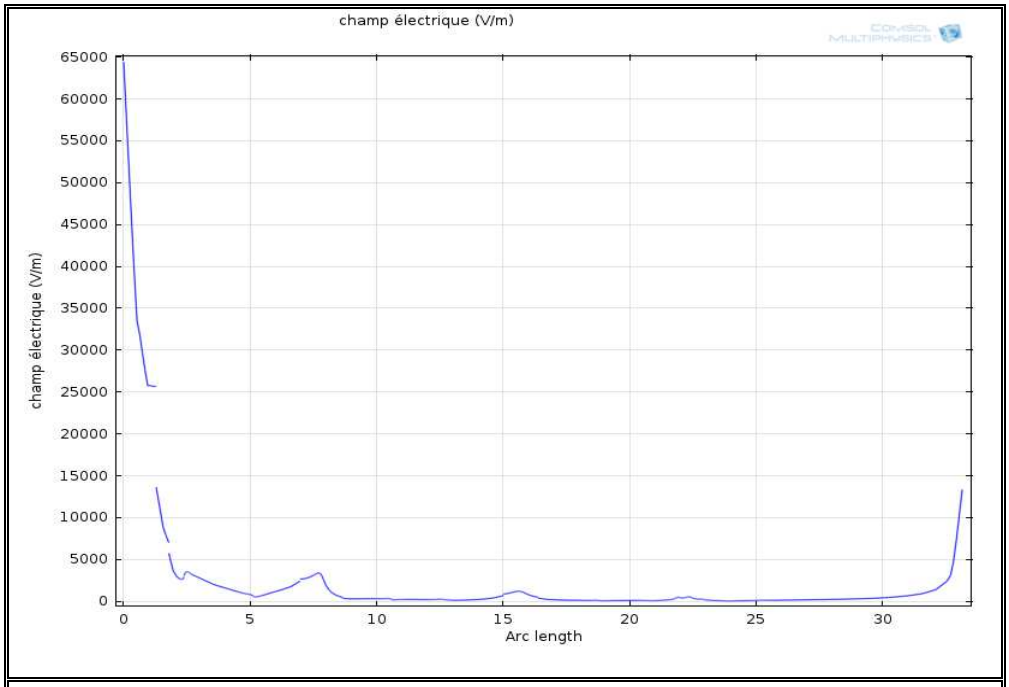


Figure IV.11 Distribution du champ électrique le long de la ligne de fuite pour l'isolateur propre en céramique

- Porcelaine :

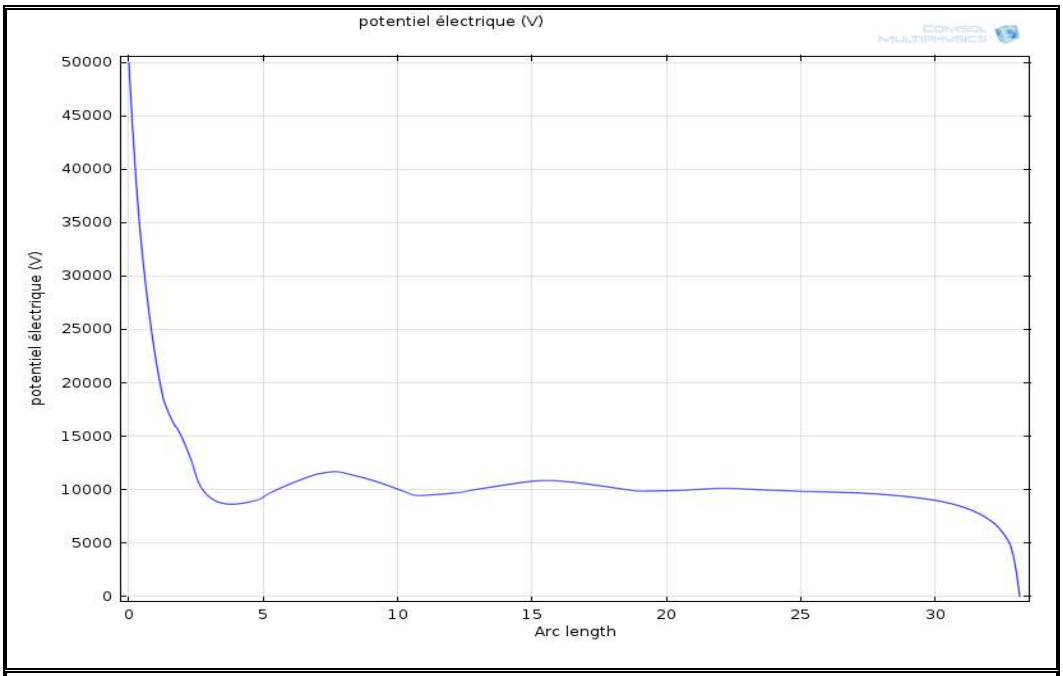


Figure IV.12 Distribution du potentiel le long de la ligne de fuite pour l'isolateur propre en porcelaine

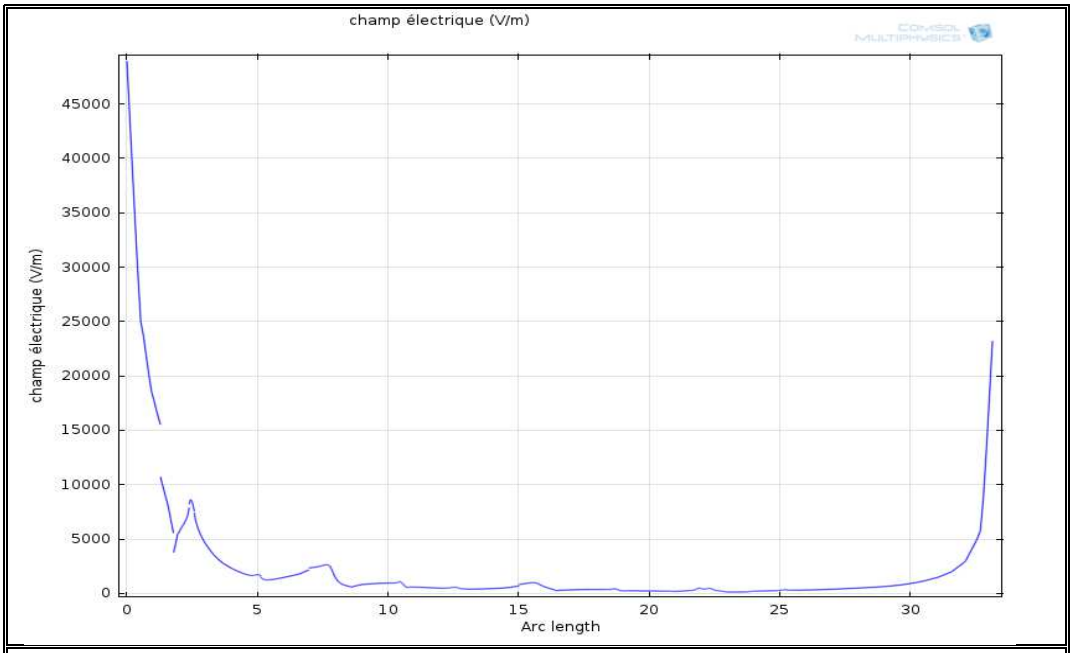


Figure IV.13 Distribution du champ électrique le long de la ligne de fuite pour l'isolateur propre en porcelaine

Discussion :

Les résultats montrent que le champ électrique est très accentué dans la région proche de la tige, puis il devient plus faible le long de la ligne de fuite jusqu'à la région proche du capot. A cette région le champ augmente mais d'une manière mois accentué que celle de la région proche du capot. Comme de monte le tableau IV.8 et la figure IV.14

Matériaux	Permittivité relative	Champ électrique Max coté tige (ciment)[kV/m]	Champ électrique Max coté capot [kV/m]
Verre	4.2	43,25	25
Porcelaine	6.5	43.25	24
Céramique	30	43.25	15

Tableau IV.8 : Champ électrique max calculé dans les régions proche du capot et la tige en fonction de la permittivité.

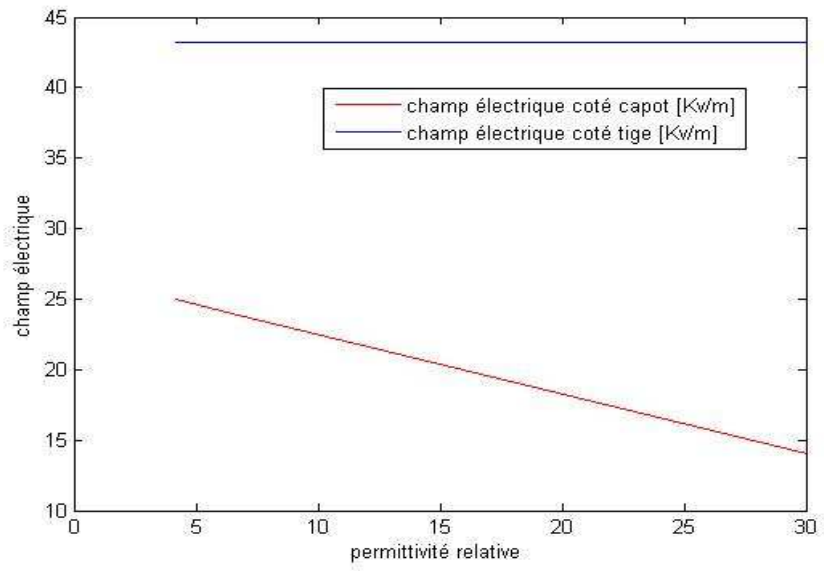


Figure IV.14 Champ électrique max coté tige et capot en fonction de la permittivité

Une discontinuité du champ électrique est obtenue dans la première partie de la ligne de fuite et cela est du au changement du milieu (ciment-verre) et au changement brusque de la pente de la courbe que parcourt la ligne de fuite.

Les niveaux de champ électrique dans l'isolateur en verre est supérieur à celui de l'isolateur en porcelaine et celle en céramique. La permittivité diélectrique élevée de la céramique et de la porcelaine offre une distribution plus lisse du champ électrique le long de la ligne de fuite

VI.8 Effet de la couche de pollution :

Une couche de pollution avec une épaisseur de deux millimètres est introduite sur la surface supérieure de l'isolateur comme indique la figure IV.15**.** Ce choix est du à la forte possibilité d'auto-nettoyage de la partie inférieure par l'effet de la gravité.

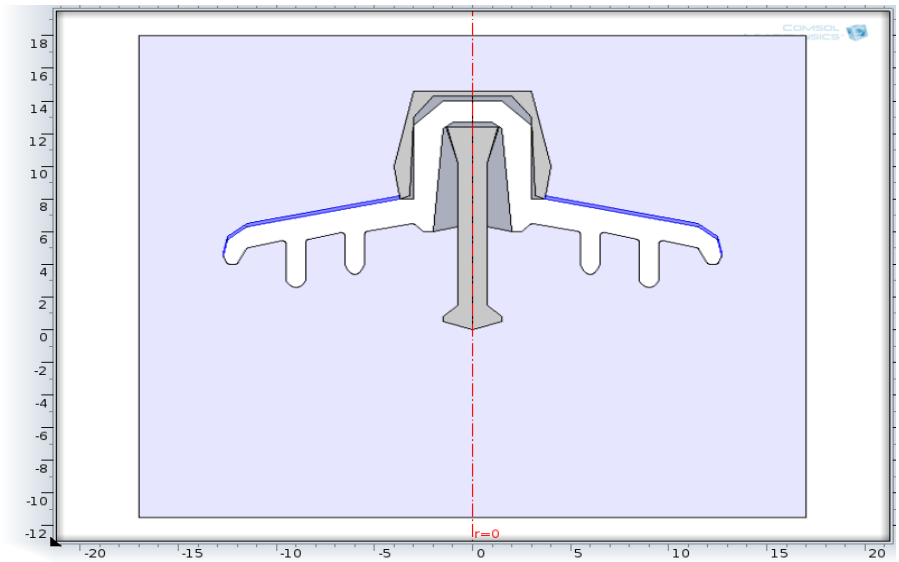


Figure IV.15 La géométrie bidimensionnel d'un isolateur polluée

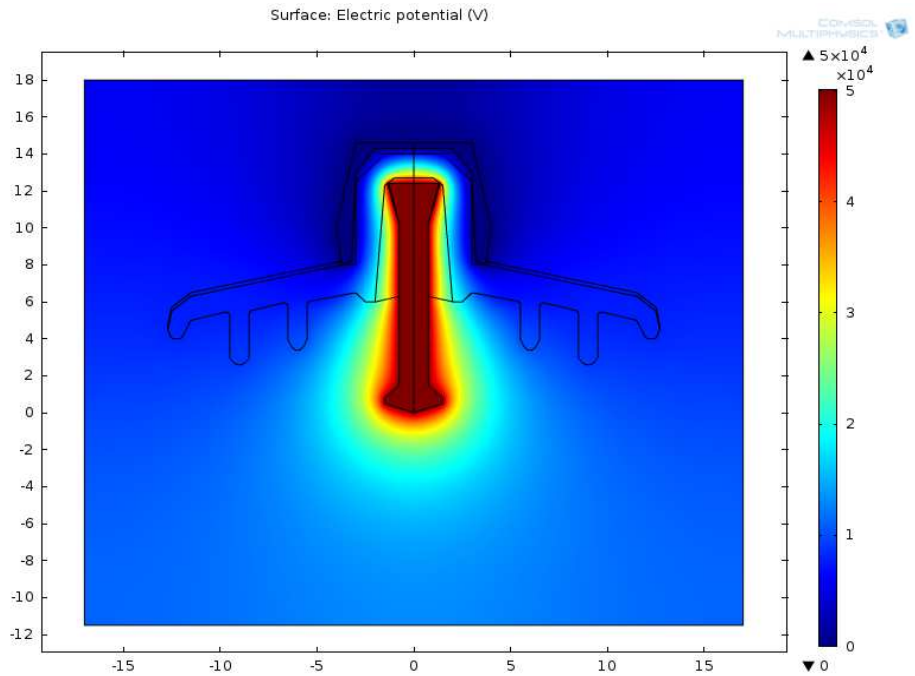


Figure IV.16 Distribution du potentiel pour l'isolateur polluée en verre

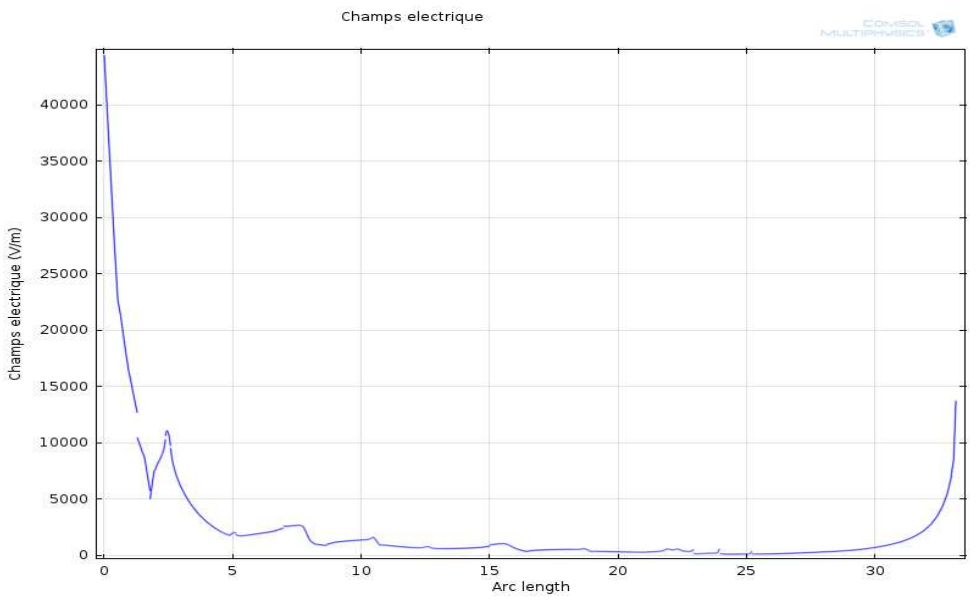


Figure IV.17 Distribution du champ électrique le long de la ligne de fuite pour l'isolateur en verre polluée

Les résultats de simulation montrent que la couche de pollution fait décroitre le niveau du champ électrique coté capot à des valeurs très faible par rapports à l'isolateur propre. Cela est du principalement qu'elle représente une surface équipotentielle.

Le tableau IV.9 .et la figure montre que le changement de la conductivité de la couche de pollution n'a aucun effet sur le niveau de champs électrique calculé. La disposition de la couche de pollution représente une configuration discontinue de la couche de pollution ou aucun phénomène de conduction surfacique n'aura lieu. Par conséquence, la conductivité de la couche de pollution aura le même effet dans le stade des phénomènes électrostatiques.

Conductivité [S\m]	Champ électrique Max coté tige [kV\m]	Champ électrique Max coté capot [kV\m]
1	44,86	14
10	44,86	14
100	44,868	14

Tableau IV.9 : Champ électrique max calculé en fonction de la conductivité de la couche de pollution.

La prédiction du comportement des isolateurs des lignes aériennes de haute tension dans un site spécifique est une tâche souvent difficile. Pour palier tels problèmes en utilise des méthodes numériques. La méthode des éléments finis (MEF), est l'une des méthodes numériques puissantes qui a été développée dans cette étude, à l'aide de logiciel **COMSOL Multyphysics**

Cette méthode a permet de calculer la distribution du champ et du potentiel électrique sur la surface de l'isolateur capot-tige U120 utilisé dans la région de Ouargla. Les résultats de simulations numériques, pour différentes permittivités de la matière isolante, à savoir le verre la porcelaine et la céramique, sont effectuées. Par la suite, l'effet d'une couche de pollution, introduite sur la surface supérieure de l'isolateur est aussi examiné.

Les résultats ont montré que le niveau de champ électrique est très accentué dans la région proche de la tige mise à la haute tension puis démunie considérablement le long de la ligne de fuite. Ensuite, le champ augmente d'une manière modéré dans la région proche du capot, qui est mise à la terre.

Les niveaux de champ électrique dans l'isolateur en verre est supérieur à celui de l'isolateur en porcelaine et celle en céramique. La permittivité diélectrique élevée de la céramique et de la porcelaine offre une distribution plus lisse du champ électrique le long de la ligne de fuite.

La disposition de la couche de pollution sur la partie supérieure de l'isolateur n'engendre aucun phénomène de conduction de courant. Cette couche de pollution fait décroitre le niveau du champ électrique car elle représente une surface équipotentielle. Les résultats de simulation ont montré que dans cette configuration de pollution la conductivité de la couche de pollution n'a aucun effet sur le niveau de champs électrique calculé.