

UNIVERSITE KASDI MERBAH OUARGLA

Faculté des Sciences Appliquées
Département de Génie Electrique



Mémoire

MASTER ACADEMIQUE

Domaine : Sciences et technologies

Filière : Electrotechnique

Spécialité : Electrotechnique industrielle

Présenté par :

KHELFAOUI Abdallah

BOUBERMA Omar

Thème:

**MODELISATION PAR METHODE DES
ELEMENTS FINIS DES PHENOMENES DE
CONDUCTION SURFACIQUE SUR
L'ISOLATEUR POLLUES**

Soutenu publiquement

Le : 08/06/2014

Devant le jury :

M^r AMIEUR Toufik

M^r ABI MOULOUD Adel

M^r NACEUR Sonia

M^r BOUCHALA Tarek

MA (A)

MA (A)

MA (A)

MA (A)

Président

Encadreur/promoteur

Examineur

Examineur

UKM Ouargla

UKM Ouargla

UKM Ouargla

UKM Ouargla

Année universitaire 2013/2014

Remerciement :

Nous remercions en premier lieu Dieu le tous puissant de nous avoir accordés sa volonté et sa foie pour mener à bien nos études.

Nous tenons à exprimer nos sincères remerciements et notre reconnaissance à notre promoteur Mr. Abi-Miscud Adel assistant à l'université d'avoir guidés et conseillés pour accomplir ce modeste travail.

Nous aimerons remercier l'ensemble des enseignements qui ont contribuée de près ou loin à notre formation ; sans oublier notre collègue de class Master Electrotechnique Industriels.

En fin, nous n'oublions pas tous ce que nous ont aidé de proche ou de loin pour la réalisation de ce travail.

Abdallah et Omar



Sommaire

Sommaire

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

Chapitre I : Généralité sur la haute tension

I.1.Introduction.....	2
I.2.Utilité de la haute tension.....	2
I.3.Réseaux électriques	3
I.4. Comparaison entre lignes aériennes et câbles souterrains HT	3
I.5. Phénomène d'ionisation dans les Gaz	3
I.5.1. Notions sur les Gaz	3
I.5.2. Constitution de l'atome	4
I.5.3. Mouvement des particules de gaz	5
I.5.4. Pression du gaz	5
I.6. Le claquage	5
I.6.1. Tension critique de claquage U_C	5
I.6.2. Etincelle-arc électrique.....	6
I.7. L'avalanche électrique.....	6
I.7.1.Description de l'avalanche.....	6
I.9. L'utilisation de la haute tension.....	7
I.10.Classification.....	8
I.10.Conclusion.....	8

Chapitre II: le phénomène de pollution des isolateurs

II.1. INTRODUCTION.....	9
II.2.Définition	9
II.2.1.Diélectriques.....	9
II.2.2.Isolant.....	9
II.2.3.Isoler.....	9

II.2.4. Isolation.....	9
II.2.5. Isolement.....	9
II.2.6. Système d'isolation	10
II.2.7. Décharge disruptive.....	10
II.2.8. L'arc électrique.....	10
II.3. Les isolateurs.....	11
II.3.1. Définition.....	11
II.3.2. Fonctionnement et constitution d'un isolateur.....	11
II.4. Principaux types d'isolateurs.....	11
II.4.1. Isolateurs rigides.....	11
II.4.2. Chaîne d'isolateurs.....	12
II.4.2.1. Isolateurs capot et tige.....	12
II.4.2.2. Isolateur à long fût.....	13
II.5. La pollution.....	14
II.6. Source de pollution.....	14
II.6.1. Pollution naturelle.....	14
II.6.1.1. Pollution marine.....	14
II.6.1.2. Pollution désertique.....	15
II.6.2. Pollution industrielle.....	15
II.6.3. Pollution mixte.....	15
II.7. Contournement	15
II.7.1. Définition.....	16
II.7.2. Déroulement du contournement.....	16
II.8. Approche mathématique.....	17
II.8.1. Modèle expérimental.....	17
II.8.2. Circuit électrique équivalent.....	18
II.8.3. Caractéristique « tension-courant ».....	18
II.9. Contournement sous tension alternative.....	19
II.10. CHOIX DES ISOLATEURS.....	19
II.11. REMEDES.....	20
II.11.1. Allongement de la ligne de fuite.....	20
II.11.2. Graissage.....	20

II.11.3. Lavage périodique.....	20
II.11.4. Anneaux de garde	21
II.12Classement de Degré de pollution.....	21
II.13CONCLUSION.....	22

Chapitre III : les modèles de contournement des isolateurs

III.I. Introduction	23
III.2.Modèles de contournement.....	23
III.2.1. Modèle d'Obenaus.....	23
III.2.2. Modèle d'Alston et Zoledziowski.....	24
III.2.3. Modèle de Danis.....	25
III.2.4. Modèle de Nacke et Wilkins.....	26
III.2.5. Modèle de Tegar (pollution discontinue).....	27
III.2.6. Modèle de Dhahbi et Beroual.....	29
III.2.7 Modèle de Dhahbi, Beroual et Krahenbul.....	29
III.3 Conclusion.....	30

Chapitre IV: Calcule de la résistance résiduelle par MEF/COMSOL

VI.I. Introduction.....	31
VI.2.Principe.....	31
VI.3.Démarche éléments finis.....	31
VI.4.Discrétisation géométrique.....	31
VI.5.Utilisation d'un logiciel éléments finis.....	32
VI.8.Description du logiciel « COMSOL Multyphysics ».....	32
VI.9.L'interface graphique de COMSOL	33
IV.10 Simulation.....	38
IV.11.L'isolateur U120.....	38
IV.12.Résultats et Interprétations	43
IV.13.Algorithme de calcule des valeurs critiques	44
IV.14.Conclusion	48
Conclusion générale.....	4

Figure	Titre de figure	pages
Figure I.1	Transformateur élévateur	02
Figure I.2	particules dans le gaz et le solide	03
Figure I.3	Pression du gaz	05
Figure I.4	Etincelle-arc électrique	06
Figure I.5	l'avalanche	07
Figure II.1	Isolateur rigide	11
Figure II.2	Assemblage à rotule	12
Figure II.3	Isolateur à capot et tige	13
Figure II.4	Quelques profils des isolateurs à capot et tige	14
Figure II.5	Isolateur long fut	14
Figure II.6	Décharge électrique (contournement)	15
Figure II.7	Déroulement de contournement	17
Figure II.8	Modèle expérimentale	17
Figure II.9	Circuit électrique équivalent	18
Figure II.10	Caractéristique tension-courant	19
Figure.III.1	Circuit électrique équivalent d'après Obenaus	23
Figure.III.2	Modèle cylindrique d'Alston et Zoledziowski	25
Figure III.3	Modèle de Danis	26
Figure III.4	Représentation schématique de la surface d'un isolateur Modèle de Tegar	27
Figure III.5	Circuit électrique équivalent du modèle de laboratoire	28
Figure III.6	Circuit électrique équivalent de la propagation de l'arc	29
Figure III.7	Modèle d'un isolateur pollué et circuit équivalent correspondant Modèle de Dhahbi, Beroual et Krahenbul	29
Figure VI.1	Erreur de discrétisation géométrique	32
Figure VI.2	Fenêtre de select spcae	34
Figure IV.3	Fenêtre de « SELECT SPCAE »	34
Figure IV.4	Fenêtre de « ADD PHYSICS(MODEL) »	35
Figure IV.5	Fenêtre "SELECT STUDY TYPE"	35
Figure IV.6	Géomètre exemple de l'équivalent de l'isolateur U120	36
Figure IV.7	Matériel exemple de l'équivalent de l'isolateur U120	36
Figure IV.8	détermination de physics	37
Figure IV.9	Le maillage U120	37
Figure IV.10	Résultats de simulation	38

Figure IV.11	L'isolateur capot-tige U120	39
Figure IV.12	Plant équivalent de modèle du l'isolateur	39
Figure IV.13	Les déférentes étapes utilisées pour la simulation pour l'équivalent rectangulaire de l'isolateur U120	41
Figure IV.14	Les déférentes étapes utilisées pour la simulation pour l'équivalent de plan ouvert de l'isolateur U120	40
Figure IV.15	Courbes de résistance résiduelle du modèle rectangulaire et la résistance de (tableau IV.1) de type U120 represent la longueur de l'arc	43
Figure IV.16	Courbes de résistance résiduelle du modèle rectangulaire et celle du modèle ouvert à largeur variable de l'isolateur U120 represent la longueur de l'arc	44
Figure IV.17	Organigramme de calcule des valeurs critiques	45
Figure IV.18	Les valeur critique du modèle rectangulaire de l'isolateur U120	46
Figure IV.19	Les valeur critique du modèle ouvert de l'isolateur U120	47

δ	Nombre d'atomes/unité de volume
λ	libre parcours moyen
I_c	courant critique de contournement (A)
E_c	champ critique (kV/cm)
x	longueur de la décharge
L	longueur de l'électrolyte
U_d	tension de la décharge
U_p	chute de tension dans la couche de pollution
U_e	chute de tension dans les électrodes
A, n	constantes qui dépendent des conditions expérimentales
R (k Ω)	résistance de la couche de pollution
r (k Ω /cm)	résistance par unité de longueur de la couche de pollution
U_{m1}, I_{m1}	Valeurs minimales de tension et courant
THT	très haut tension
R_{arc}	la résistance d'arc par unité de longueur
n et N	Les valeurs des paramètres dépendent du milieu dans lequel brûle la décharge
r_{p1} et r_{p2}	résistance linéique
b	la largeur de la surface de l'isolateur
rd	le rayon de la base de l'arc
f	le facteur de forme
Z_{eq}	l'impédance équivalente d'un circuit électrique
ω	la pulsation
ρ_p	la résistivité de la pollution.
ϵ	la permittivité de la pollution
r (mm)	la rayon d'arc
R_{p1}, R_{p2}	la résistance de la couche de pollution de l'isolateur rectangulaire
l_{pm}	distance séparant deux particules
U_c	la tension critique de contournement (V)



Introduction générale

Introduction générale

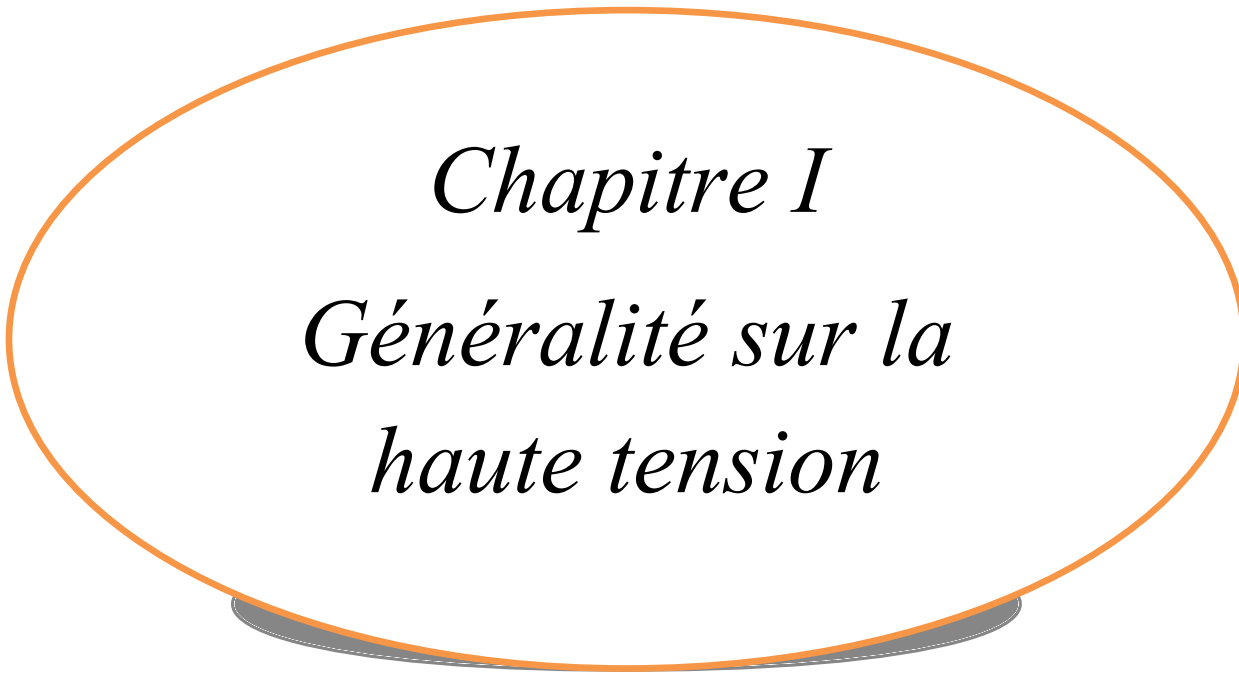
L'isolateur est un élément destiné à relier mécaniquement les conducteurs sous tension aux structures qui les supportent et assurer l'isolement électrique entre eux. Il comporte deux parties; une partie isolante en verre ou en porcelaine ou encore en matière composite (silicone, EPDM) et des pièces métalliques ou en fibre de verre qui servent de liaison scellée sur le diélectrique.

Les principaux types d'isolateurs sont les isolateurs rigides et les isolateurs de suspension. Les premiers sont généralement reliés au support par une ferrure fixe et sont souvent utilisés dans les lignes de distribution. Quant aux isolateurs de suspension, les plus utilisés sont les isolateurs à capot et tige.

L'isolateur doit présenter de bonnes qualités mécaniques et électriques de façon à remplir son rôle pendant toute sa durée de vie. Une quantité importante de travaux tant théoriques qu'expérimentaux a été consacrée à l'étude du contournement des isolateurs sans pour autant aboutir à l'élaboration d'un modèle pouvant tenir compte des paramètres réels caractéristiques du phénomène de pollution. Il s'agit en particulier de la forme des isolateurs, de la répartition des couches polluantes et de leur résistivité, des échanges thermiques, du non uniformité du mouillage et de l'intensité des arcs au voisinage de la surface de l'isolateur, de la formation d'arcs multiples. Aussi, la détermination de la tension de contournement d'un isolateur pollué est entachée d'une dispersion marquée, même lorsque les conditions sont en apparence contrôlées.

Le présent travail porte sur l'étude de l'effet de la pollution et le phénomène de conduction surfacique sur les isolateurs. Notre travail comporte quatre chapitres. Dans le premier chapitre nous présentons une synthèse bibliographique sur l'utilité de la haute tension. Dans le deuxième chapitre, nous citons les différents types des isolateurs, la pollution et le phénomène de contournement. Dans le troisième chapitre, nous présentons les principaux modèles de contournement. Dans le quatrième chapitre nous présentons les principes de la méthode des éléments finis et comment l'exploiter à l'aide du logiciel **COMSOL Multiphasiques**. Ce chapitre sera aussi consacré à l'étude et la modélisation des phénomènes de conduction sur la surface polluée de l'isolateur capot tige U120.

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



Chapitre I
Généralité sur la
haute tension

I.1.Introduction:

L'énergie électrique est la forme d'énergie la plus largement répandue car elle est facilement transportable à un rendement élevé et un coût raisonnable. Un réseau électrique est un ensemble d'infrastructures dont le but est d'acheminer de l'énergie électrique à partir de centres de production vers les consommateurs d'électricité (charge).

Les lignes 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 en 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 :

$$P_{entre} = P_{sortie} \Rightarrow U_1 I_1 = U_2 I_2 \Rightarrow I_2 = I_1 \frac{U_1}{U_2} \quad (I. 1)$$



Figure I.1 : Transformateur élévateur

D'après l'expression ci-dessus, l'élévation de la tension ($U_2 > U_1$) 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 isollements.

L'utilisation de la haute tension a fait apparaître plusieurs problèmes tels 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).

Il existe des projets jusqu'à 1 200 kV.

- Leurs fréquences sont 50 ou 60 Hz (quelques cas à 16 2/3 Hz)
- Les courants 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. [1]

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 le marché 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 Protons : $m_p=1,6725 \cdot 10^{-27}$ kg ; $q_p= 1,6 \cdot 10^{-19}$ C

Des neutrons : $m_n=1,6725 \cdot 10^{-27}$ kg ; $q_n= 0$

Les électrons gravitent autour du noyau

$m_e=9,1019 \cdot 10^{-31}$ kg ; $q_e= - 1,6 \cdot 10^{-19}$ C

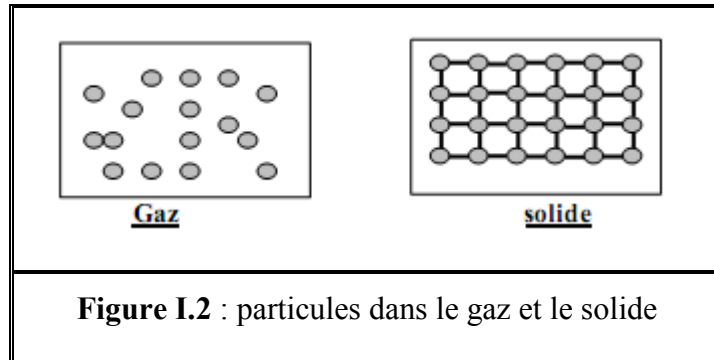
A l'état fondamental, l'atome est neutre ;

- S'il libère un électron il devient un ion positif. $A-1e \rightarrow A +$
- S'il gagne un électron devient un ion négatif $A+1e \rightarrow A -$

Remarque : Le photon est un quantum d'énergie ($m=0$; $q=0$). [2]

I.5.3. Mouvement des particules de gaz :

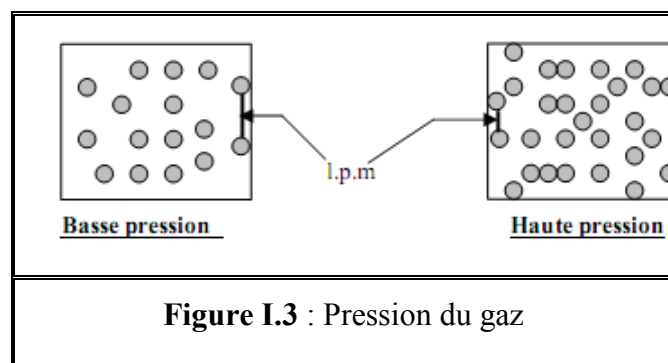
Le mouvement des particules dans le gaz est libre, contrairement au solide qui est une masse compacte car les particules sont reliées entre elles par des liaisons cristallines fortes. [2]



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.p.m) : distance séparant deux particules voisines. [2]



I.6. Le claquage :

I.6.1. Tension critique de claquage U_C :

$U \geq U_C$ l'isolant ne peut pas supporter cette tension \rightarrow Claquage (décharge électrique).

Remarque :

A la pression atmosphérique, si $d = 1\text{cm}$: $U_C \approx 30\text{ kV}$; Donc le champ critique $E_C \approx 30\text{ kV/cm}$

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.[2]

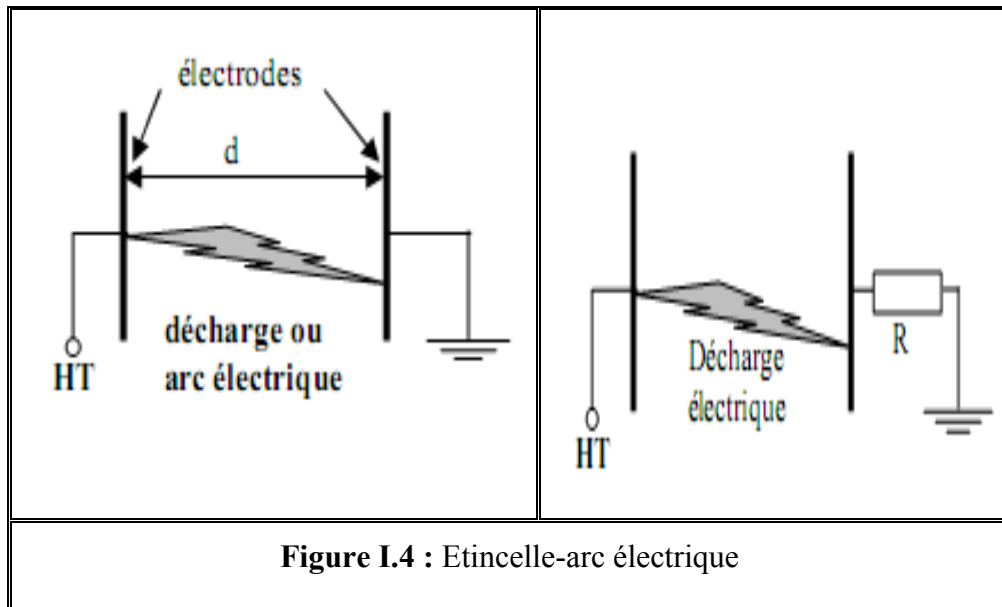


Figure I.4 : Etincelle-arc électrique

I.7. L'avalanche électrique:

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

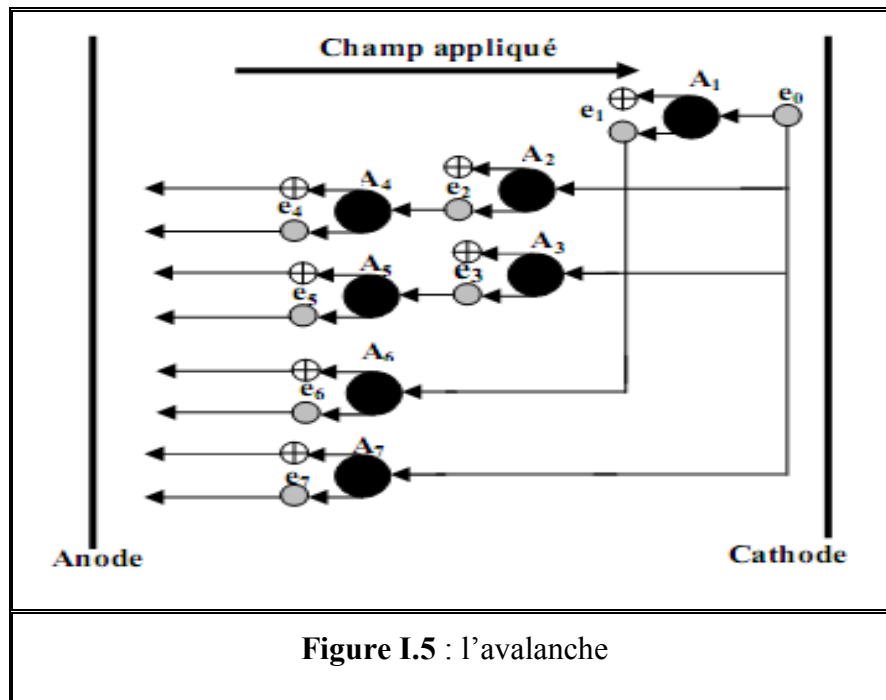
On appelle Electron primaire l'électron créé par ionisation grâce à des agents naturels tels que les rayonnements cosmiques et la radioactivité de la terre.

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 4 autres atomes qu'ils ionisent en produisant ce qu'on appelle une avalanche électronique.

La multiplication des électrons se poursuit suivant ce processus jusqu'à ce que l'avalanche arrive à l'anode. [2]

**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.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),[1] :

- 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.10.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 et pertes diélectriques.

Chapitre II

Phénomène de pollution des isolateurs

II.1. INTRODUCTION

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 répartition 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.[2]

II.2.Définition :**II.2.1.Diélectriques**

Un diélectrique est défini comme un milieu matériel dans lequel les bandes de conduction et de valence sont séparées par une énergie supérieure à 5 eV. Le milieu matériel peut être constitué par un solide, un liquide ou un gaz [3].

II.2.2.Isolant

Un isolant est une substance ou un corps dont la conductivité est nulle, ou en pratique, très faible.

II.2.3.Isoler

L'action d'isoler est le moyen d'empêcher la conduction entre conducteurs électriques soumis à des tensions différentes.

II.2.4.Isolation

L'isolation est l'ensemble des matériaux isolants utilisés pour isoler un dispositif.

II.2.5.Isolement

L'isolement est l'ensemble des qualités acquises par un corps conducteur du fait de son isolation.

II.2.6. Système d'isolation :

Un système d'isolation est constitué par des matériaux isolants ou un assemblage de matériaux isolants (isolation) à considérer, en liaison avec les parties conductrices associées.

II.2.7. Décharge disruptive

Le développement de la décharge disruptive (ou perforation diélectriques) à l'intérieur des matériaux isolants solides est lié à un ou à une association des phénomènes suivants :

- Décharge intrinsèque ;
- Décharge thermique ;
- Décharge partielle.

II.2.8.L'arc électrique

Un arc électrique (figure I.4) est un courant électrique visible dans un milieu isolant (gaz, air, vide ...). Le courant d'arc est principalement dû aux électrons issus de la cathode et non pas à ceux résultant de l'ionisation de l'isolant. La tension d'arc n'est que de quelques dizaines de Volts.

- La foudre est un arc électrique de grandes dimensions qui permet l'écoulement des charges électriques entre les nuages ou entre les nuages et la terre.
- Les lampes à décharge utilisent les propriétés des arcs électriques pour la production de lumière (éclairage public, projecteurs, etc.).
- La soudure électrique à l'arc produit une grande quantité de chaleur localisée engendrant la fusion des matériaux, ce qui réalise des liaisons résistantes après refroidissement.
- Les fours à arc sont utilisés en métallurgie pour la fusion des métaux.
- La coupure d'un courant, obtenue par séparation de contacts, peut entraîner la production d'un arc électrique plus ou moins important, de la petite étincelle à celle du four à arc électrique. L'extinction d'un arc peut être obtenue par refroidissement ou allongement, comme par exemple dans les disjoncteurs à haute tension, ou par d'autres méthodes.[4]

II.3. Les isolateurs

II.3.1. Définition :

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

L'isolateur (figure II.2) est formé par un isolant auquel sont fixés deux pièces métalliques M1 et M2. L'isolant peut être du verre, céramique ou matériaux synthétiques. La pièce M1 se fixe au pylône et la pièce M2 porte le conducteur.

L'isolateur possède un double rôle :

- Rôle mécanique : porte le conducteur
- Rôle électrique : isole le conducteur par rapport au pylône.

Les isolateurs sont des composants indispensables au transport et à la distribution de l'énergie électrique. Leur fonction est de réaliser une liaison entre des conducteurs HT et la terre. [2]

II.3.2. Fonctionnement et constitution d'un isolateur

Les isolateurs sont des éléments indispensables au transport et à la distribution d'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 (isolateur d'alignement ou d'ancrage), assurent la transition entre l'isolation interne (huile, SF₆) et l'isolation externe (Traversées de transformateurs, extrémités de câbles) et constituent également l'enveloppe de certains appareils (disjoncteurs, parafoudres,...). Les isolateurs sont conçus et dimensionnés pour résister aux contraintes introduites par l'environnement.[4]

II.4. Principaux types d'isolateurs

On peut distinguer deux principaux types d'isolateurs :

II.4.1. Isolateurs rigides

Ce type d'isolateur permet d'obtenir une liaison rigide entre le support et le câble. Il est constitué d'un ou plusieurs isolateurs encastrés et scellés entre eux, ils sont fixés aux pylônes par des ferrures de différentes formes (Figure II.1). Ils sont montés sur pylônes soit d'une

façon verticale, horizontale ou oblique (inclinée). Mais ce type d'isolateurs est utilisé pour les lignes aériennes qui ne dépassent pas le niveau de tension de **60 KV** [3]



Figure II.1 Isolateur rigide

La céramique et le verre sont les deux matériaux utilisés pour les isolateurs rigide.[5]

II.4.2. Chaîne d'isolateurs

Une chaîne d'isolateurs est constituée de plusieurs éléments de type capot et tige ou autres (figure II.2). Ces éléments sont soumis principalement à des efforts de traction. Ils sont généralement utilisés en suspension et forment des chaînes d'isolateurs soit verticales (alignement), soit horizontale (ancrage).[5]

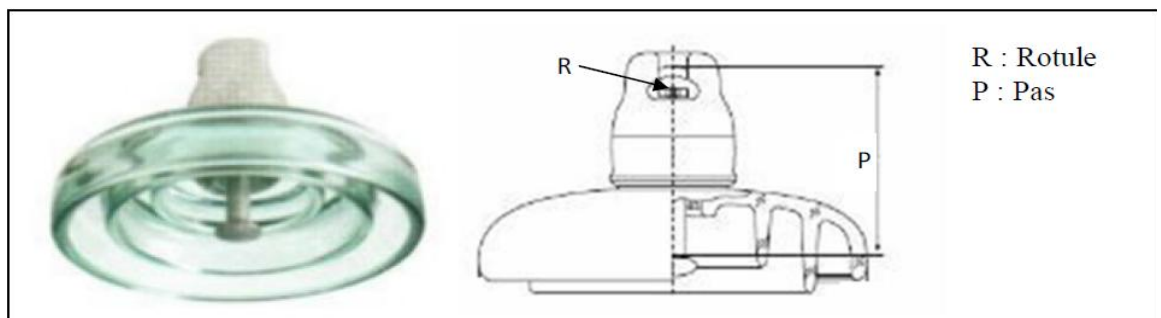


Figure II.2 Assemblage à rotule

II.4.2.1. Isolateurs 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.[6] La coupe de l'isolateur capot-tige est schématisée à la figure II.3

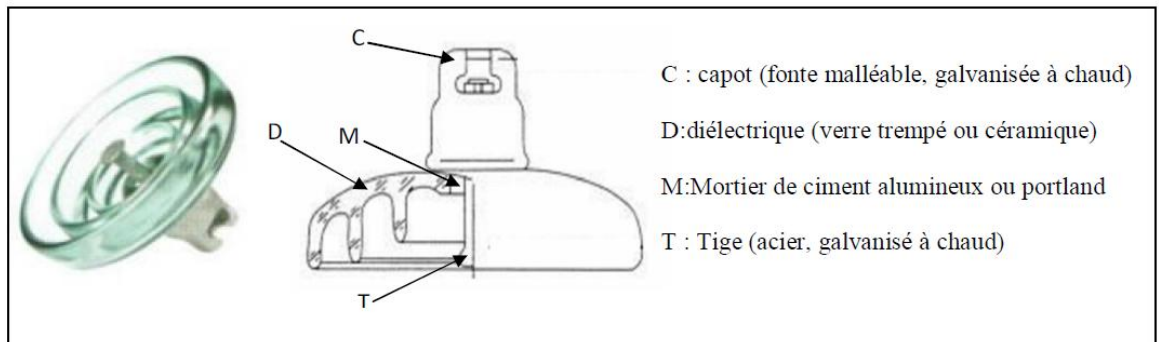


Figure II.3 Isolateur à capot et tige

Quelques profils des isolateurs à capot et tige

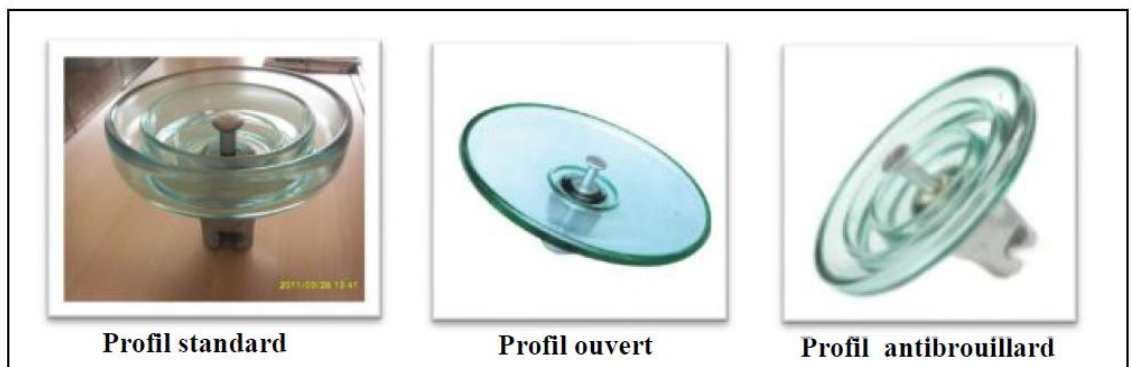


Figure II.4 Quelques profils des isolateurs à capot et tige

II.4.2.2. Isolateur à long fût

Ils sont constitués d'un cylindre plein en céramique, en porcelaine ou en matériaux synthétique, muni d'ailettes (figure II.5). A chaque extrémité est fixée une pièce métallique de liaison. Cette extrémité métallique peut se présenté sous deus formes distinctes soit en forme de tige scellée dans une cavité prévue à cet effet (figure II.5.a), elle enveloppe les extrémités tronconiques sur le cylindre (figure II.5.b), [3][7]

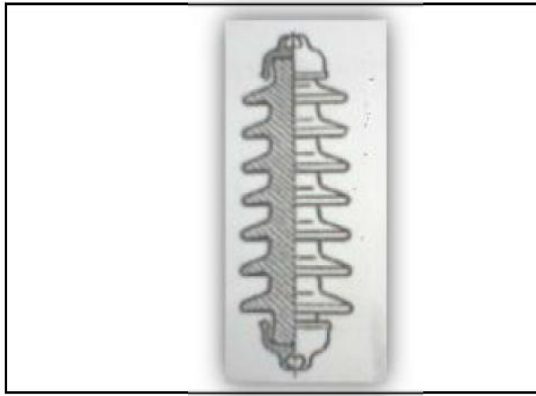


Figure II.5.a

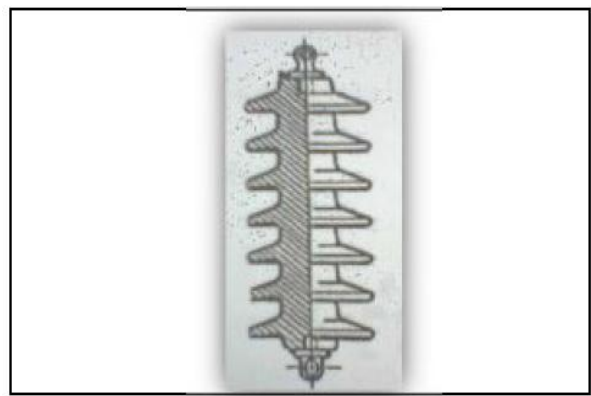


Figure II.5.b

Figure II.5 Isolateur long fut

II.5. La pollution

Le phénomène de pollution des isolateurs est un sujet d'actualité important; car il présente un sérieux problème pour l'exploitation des réseaux de transport et de distribution de l'énergie électrique. Une couche de pollution se forme sur les surfaces des isolateurs suite à une interaction entre l'air transportant des grains de poussières et ces dernières. Une fois cette couche est humidifiée, la tension de tenue diminue et provoque des incidents graves. Cela est dû à plusieurs facteurs dont les plus importants sont la nature de l'agent polluant, le profil de l'isolateur ainsi que les facteurs climatiques et météorologiques.[4]

II.6. Source de pollution

Les divers types de pollution atmosphérique les plus fréquemment observés peuvent être regroupés selon leurs origines et classés comme suit :

II.6.1. Pollution naturelle

La pollution naturelle provient:

- des sels marins dans les régions côtières.
- des poussières du sol (notamment lors de chantiers importants).
- des sables véhiculés par le vent en régions désertiques.

II.6.1.1. Pollution marine

Les installations situées en bord de mer sont exposées aux embruns portés par le vent et qui se déposent progressivement sur les isolateurs, formant une couche de pollution de sel qui devient conductrice lorsqu'elle est humidifiée par le brouillard ou simplement par condensation. Un courant de fuite s'établit alors à travers la couche superficielle et des arcs électriques peuvent prendre naissance.

II.6.1.2. Pollution désertique

La pollution désertique est caractérisée surtout par les dépôts de sable se formant à la surface des isolateurs après les vents de sable. Une fois humidifiés, ces dépôts deviennent plus ou moins conducteurs (en fonction des concentrations en sels solubles qu'ils contiennent) et engendrent la circulation d'un courant de fuite qui apparaît brusquement et qui est suivi par l'apparition d'arcs partiels qui peuvent conduire au contournement total de l'isolateur.

II.6.2. Pollution industrielle

Au voisinage de certaines zones industrielles, la pollution est engendrée par l'évacuation des fumées des usines (raffinerie, cimenterie, minerais etc.). La présence d'éléments conducteurs dans les couches, et/ou la dissolution des sels qu'elles contiennent engendrent la circulation d'un courant de fuite plus ou moins fort selon les concentrations des agents polluants. Les usines ne sont pas les seules responsables de ce genre de pollution ; les gaz d'échappement des véhicules et les engrais utilisés en agriculture contribuent aussi aux dépôts observés à la surface des isolateurs.

II.6.3. Pollution mixte

Ce type de pollution est en fait le plus fréquent et le plus sévère pour l'exploitation des ouvrages électriques. La pollution mixte résulte de la combinaison entre les différents types de pollution, comme par exemple les pollutions marine et industrielle lorsque des installations industrielles sont situées en bord de mer.[2]

II.7. Contournement :

Le résultat extrême de phénomène de pollution des lignes aériennes est le contournement. En effet, une fois la couche de dépôt polluant est humidifiée, une circulation de courant de fuite prend naissance. Cette circulation de courant de fuite sur les surfaces des isolateurs provoque un échauffement de la couche polluante conductrice. Ceci entraîne des assèchements locaux de la couche et l'apparition d'arcs partiels. Dans les conditions les plus défavorables, ces arcs peuvent se développer et provoquent ainsi le contournement total des isolateurs et la mise hors tension de l'installation [2]

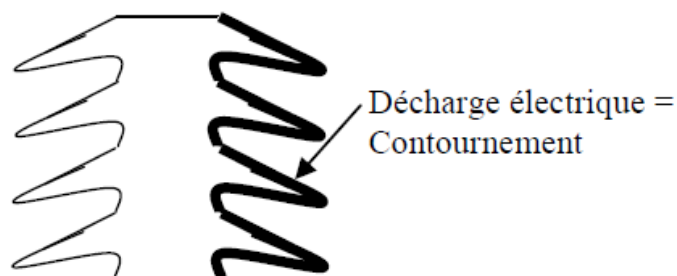


Figure II.6 Décharge électrique (contournement)

II.7.1. Définition

On dit que le contournement se produit sur la surface de l'isolateur lorsqu'une décharge électrique s'établit entre ses extrémités et contourne la surface de l'isolateur.

Le contournement provoque l'ouverture du disjoncteur, car il établit un court-circuit entre le conducteur et le pylône (défaut monophasé à la terre). Le contournement cause habituellement l'interruption momentanée de l'écoulement de l'énergie dans le réseau. De telles interruptions, bien qu'étant nocives, peuvent être tolérées dans des endroits ruraux. Dans des secteurs urbains avec les industries de pointe (domaines pharmaceutiques, production de véhicules...) les interruptions ne sont pas acceptables parce qu'elles mènent à d'énormes pertes financières de production, de machines bloquées et des pertes de contrôle du cycle du processus. Par exemple, aux USA une interruption de 0,25 s dans une usine à papier peut provoquer des pertes de 100 000 dollars.[2]

II.7.2. Déroulement du contournement

Phase 1 : dépôt de pollution

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

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 circulant sur la surface de l'isolateur (Fig.b).

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 (Fig.c).

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 \Rightarrow pas de contournement (Fig.d).
- Soit la décharge progresse sur la surface \Rightarrow contournement de l'isolateur (Fig.e).

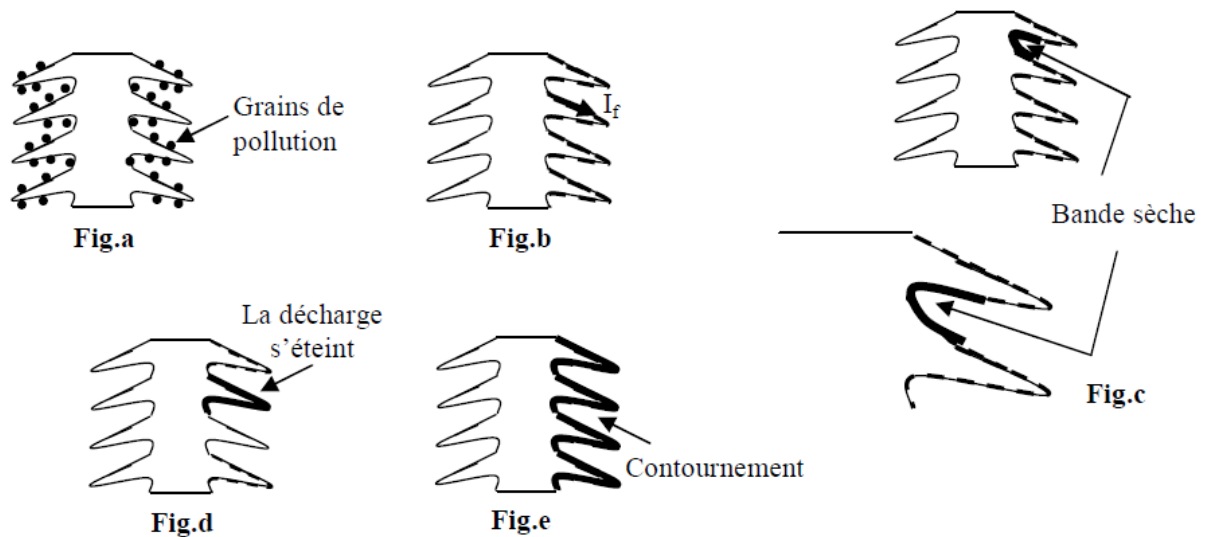


Figure II.7 Déroulement de contournement

II.8. APPROCHE MATHÉMATIQUE

II.8.1. Modèle expérimental

Comme la décharge et la couche de pollution sur la surface de l'isolateur sont en série, le modèle expérimental utilisé pour l'étude du contournement en laboratoire comprend :

- 1- Electrode HT
- 2- Electrode BT (reliée à la terre)
- 3- Canal d'épaisseur de quelques mm, rempli par un électrolyte (mélange eau distillée + grains de sels NaCl).
- 4- Décharge électrique.

Avec :

x : longueur de la décharge ; L : longueur de l'électrolyte.

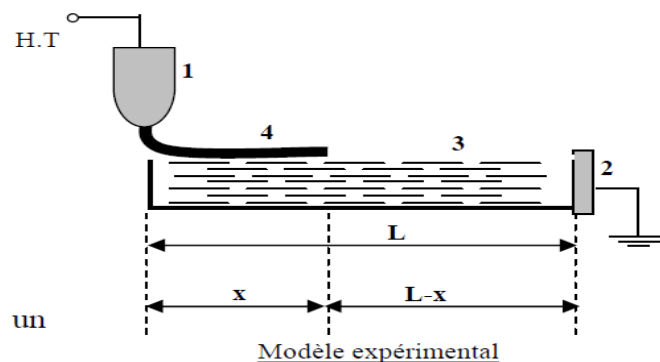


Figure II.8 Modèle expérimentale

II.8.2. Circuit électrique équivalent

L'équation électrique du circuit s'écrit :

$$U = U_d + U_p + U_e \dots \dots \dots (II.1)$$

U_d : tension de la décharge ;

U_p : chute de tension dans la couche de pollution

U_e : chute de tension dans les électrodes.

$$U_d = A \cdot x \cdot I^{-n} \dots \dots \dots (II.2)$$

$$U_p = RI = r(L - x)I \dots \dots \dots (II.3)$$

$$U_e = Cte \approx 850V$$

Avec :

A, n constantes qui dépendent des conditions expérimentales

R (kΩ): résistance de la couche de pollution

r (kΩ/cm) résistance par unité de longueur de la couche de pollution (R totale= rL)

L'équation du circuit devient :

$$U = AxI^{-n} + r(L - x)I + U_e \dots \dots \dots (II.4)$$

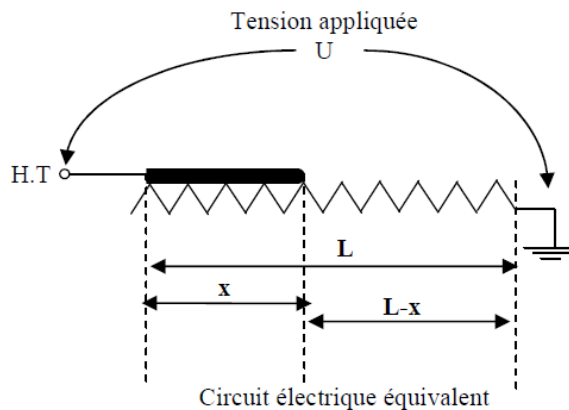


Figure II.9 Circuit électrique équivalent

II.8.3. Caractéristique « tension-courant »

Cette courbe est tracée selon l'équation (II.4), pour deux valeurs différentes du paramètre x.

U_{m1}, I_{m1} : Valeurs minimales de U et I (pour $x = x1$).

C (U_c, I_c) est le point critique de contournement : quand $U \geq U_c$ se produit le contournement.

U_c : tension critique de contournement

I_c : courant critique de contournement

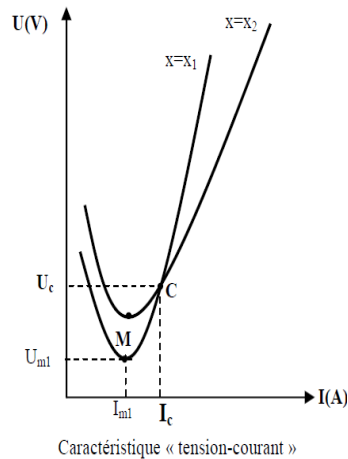


Figure II.10 Caractéristique tension-courant

II.9. Contournement sous tension alternative

L'étude mathématique précédente suppose une tension continue. 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): $U \geq \frac{800x}{\sqrt{I}}$

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

X : longueur de la décharge à réamorcer.[2]

II.10. Choix des isolateurs

Les isolateurs entrent pour un pourcentage très modeste de l'ordre de 7%, dans le prix d'une ligne aérienne. 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 polluant le moins élevé, c'est-à-dire les isolateurs qui possèdent les meilleures propriétés d'auto-nettoyage.

Même bien choisie, une isolation n'est jamais à l'abri d'un incident. La sévérité de la pollution d'un site peut changer. L'apparition d'une nouvelle usine à proximité d'un poste, la construction d'un ouvrage routier voisin ou plus simplement, un événement météorologique exceptionnel peuvent augmenter, durablement ou temporairement, la pollution d'un site, alors qu'un poste ou une ligne y sont déjà en exploitation. Le dimensionnement initialement correct

des isolateurs peut alors devenir insuffisant et il faut pouvoir protéger les installations existantes contre les nouvelles sources de pollution éventuelles.

II.11. Remèdes

II.11.1. Allongement de la ligne de fuite

Utiliser de longs isolateurs avec des lignes de fuite plus longues possibles (jusqu'à 10m pour les réseaux THT). Cette solution est très efficace et présente seulement des problèmes dans les régions à forte pollution.

II.11.2. Graissage

Une graisse chimique spéciale, imperméable et possédante d'une grande résistance superficielle, est appliquée sur la surface de l'isolateur. Son rôle est d'absorber les grains de pollution qui se déposent sur l'isolateur pour garder la surface propre. Le traitement par la graisse permet de rendre l'eau accumulée à la surface dispersée en gouttes, par conséquent le courant de fuite diminue sensiblement. Le grand inconvénient des enduits de graisse est le temps court de l'intervalle d'application (en général moins de 1 à 2 ans) entre deux applications successives pour empêcher toute panne d'électricité par contournement. En outre, l'enlèvement de la graisse saturée est un travail long et fatigant comportant l'utilisation d'agents de nettoyage à sec et suivie par le lavage à l'eau. Si on laisse trop longtemps la graisse à la surface de l'isolateur elle se sature et peut mener à une rupture qui peut causer la détérioration de l'isolateur de porcelaine. En outre, dans certains pays comme les Etats-Unis, l'utilisation de la graisse devient de plus en plus difficile à accepter pour la préservation de l'environnement.

Remarque : Dans des conditions de décharge à long terme (sur une période longue), la surface de l'isolateur enduit de graisse peut perdre son hydrophobicité dans ces régions soumises aux décharges. Cette perte hydrophobe est habituellement provisoire, et l'isolateur récupérera son hydrophobicité si la surface est sèche pour quelques heures. Cela est dû à la nature dynamique du polymère silicone qui permet à des chaînes de polymère d'émigrer vers les parties vides et enduire de nouveau la surface. [2]

II.11.3. Lavage périodique

Les isolateurs placés dans des sites à grande pollution sont régulièrement lavés avec de l'eau distillée. Le lavage s'effectue avec un fusil à jet d'eau puissant, généralement au mois de juin à cause de l'humidité. Actuellement les travaux de maintenance comme le lavage, s'effectuent sous tension (TST). Cependant, certains types de contaminants (par exemple, ciment, dépôts graisseux, certains engrais) qui adhèrent fortement à la surface de l'isolateur ne peuvent pas

être facilement enlevés par un jet d'eau à haute pression. Dans ces cas-ci, le nettoyage est effectué en employant des agents abrasifs secs. La limitation principale de cette méthode est qu'elle nécessite un travail long et cher. En outre, il n'y a aucune méthode fiable autre que l'expérience humaine de service pour déterminer quand le nettoyage de l'isolateur est nécessaire. Une attention particulière devrait être exercée pour le lavage des isolateurs composites parce que tous les matériaux ne peuvent être lavés à haute pression d'eau.

II.11.4. Anneaux de garde :

L'utilisation des anneaux de garde sur les chaînes d'isolateurs à leur extrémité est un moyen communément pratiqué pour réduire l'effet couronne. Quand les isolateurs composites sont employés, l'utilisation des anneaux de garde aux extrémités des isolateurs est une pratique courante pour des tensions au dessus de 230 kV.[2]

II.12 Classement de Degré de pollution

Niveau de pollution	Niveau d'isolement	Environnements caractéristiques	Ligne de fuite spécifique
I Faible	N1	Zone continentale -Faible densité d'habitations et sans industrie Faible densité d'industrie avec vent et pluie fréquents -régions agricoles et montagneuses.	16mm/KV
II moyen	N2	Zone continentale -industrie peu polluante et /ou de densité moyenne d'habitation ; -fort densité d'habitation et d'industrie mais avec pluie et vent fréquents.	20mm/KV
III fort	N3	-fort densité d'habitation et banlieues de grandes villes ; -zone bord de mer.	25mm/KV
IV Très fort	N4	-fort concentration de poussière et/ ou de fumées industrielles ; exposition directe aux vents forts et polluants venant de la mer	31mm/KV
V exceptionnel	N5	-forte pollution industrielle aggravée par pollution marine ; -forte pollution saharienne.	35mm/KV
	N6	Zones sahariennes exposées aux effets pollutions de l'industrie et des vents de sable et des vents venant de la mer.	40mm/KV


Tableau II.1 Classement de degré de pollution[11]

II.13.Conclusion :

Dans ce chapitre introductif, 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.[8]



Chapitre III
Les modèles de
contournement des
isolateurs

III.I. Introduction :

Plusieurs travaux expérimentaux et théoriques ont été consacrés pour expliquer le mécanisme conduisant au contournement des isolateurs pollués. Il s'agit en particulier de la forme des isolateurs, de la répartition des couches polluantes (homogènes ou non homogènes), de la résistivité des échanges thermiques, de la non uniformité du mouillage, de l'intensité des arcs au voisinage de la surface isolante, de la formation d'arcs multiples et de la détermination de la tension de contournement. Dans ce qui va suivre, nous allons exposer une recherche bibliographique des différents modèles statiques et dynamiques développés dans ce domaine. [9]

III.2. Modèles de contournement

III.2.1. Modèle d'Obenaus

Partant des observations de laboratoire sur les phénomènes d'arcs se produisant sur les surfaces isolantes planes, recouvertes d'une couche de pollution, sous tension continue, Obenaus, dans un travail de pionnier, a essayé de donner les analyses quantitatives en utilisant un circuit électrique équivalent. Son modèle (Figure.III.1) est constitué d'un arc de longueur x en série avec une résistance R_p représentant la résistance de la zone de pollution non encore court-circuitée par l'arc. [4]

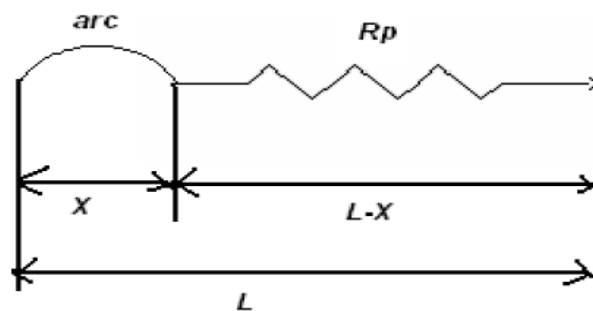


Figure.III.1 Circuit électrique équivalent d'après Obenaus

L'équation électrique est telle que :

$$V = V_e + V_{arc} + R_p(X)I \quad (\text{III.1})$$

Avec :

V : la tension appliquée ;

V_e : la chute de tension totale aux bornes des électrodes ;

X : longueur de l'arc ;

$R_p(X)$: la résistance de la couche polluante ;

I : le courant de fuite qui traverse la couche polluée.

V_{arc} : la tension d'arc donnée par :

$$V_{arc} = R_{arc}(X)I \quad (III.2)$$

R_{arc} est la résistance d'arc par unité de longueur.

La décharge est caractérisée par la présence d'un champ électrique longitudinal E_a :

$$E_a = \frac{V_{arc}}{X} = NI^{-n} \quad (III.3)$$

D'où l'équation:

$$V_{arc} = N \cdot X \cdot I^{-n} \quad (III.4)$$

Ainsi, on obtient l'équation de la tension totale appliquée au système:

$$V = V_e + N \cdot X \cdot I^{-n} + R_p(X) \cdot I \quad (III.5)$$

Les valeurs des paramètres n et N dépendent du milieu dans lequel brûle la décharge.

$$0,40 \leq n \leq 1 \text{ et } 3 \leq N \leq 500$$

Il est à noter que ce modèle a été modifié par d'autres chercheurs parmi lesquels :

- Neumarker qui suppose que la résistance par unité de longueur de la couche de pollution est uniforme;
- Rizk a décrit le phénomène d'entretien de l'arc et le mécanisme de rupture diélectrique. Il a mis en évidence l'expression de la rigidité de l'espace résiduel et établi une relation entre la tension minimale U_c nécessaire à l'entretien de l'arc ;
- Rao et Gopal ont constaté que l'équation de la tension donnée par Obenaus n'est valable que pour une décharge de type intermédiaire, entre la luminescence et l'arc. Dans le but de donner des explications entre les écarts des prédictions des modèles et les valeurs mesurées pendant le contournement, ils ont introduit une nouvelle équation exprimant le champ dans la colonne de la décharge.
- Comme les couches de pollution qui s'accumulent à la surface des isolateurs sont non homogènes, Obenaus et Boehme ont considéré que la résistance superficielle d'un isolateur à long fut pollué ne peut être uniforme le long de sa ligne de fuite. Elle est plutôt équivalente à deux couches résistantes en série, de résistance linéique r_{p1} et r_{p2} correspondant respectivement à la tige et aux ailettes.

III.2.2. Modèle d'Alston et Zoledziowski

En se basant sur le fait que la résistance de la couche de pollution est uniforme par unité de longueur les auteurs ont pu déterminer, en appliquant une tension de quelques kV, la condition de maintien de l'arc électrique, dans le cas d'un isolateur cylindrique de longueur L (Figure.III.2) ; [4] :

$$V_{cx} = (n + 1)(NX)^{\frac{1}{n+1}} \left(\frac{r(L-X)}{n} \right)^{\frac{n}{n+1}} \quad (\text{III.6})$$

X : est longueur d'arc.

A et n : les constantes empiriques qui caractérisent l'état statique de l'arc.

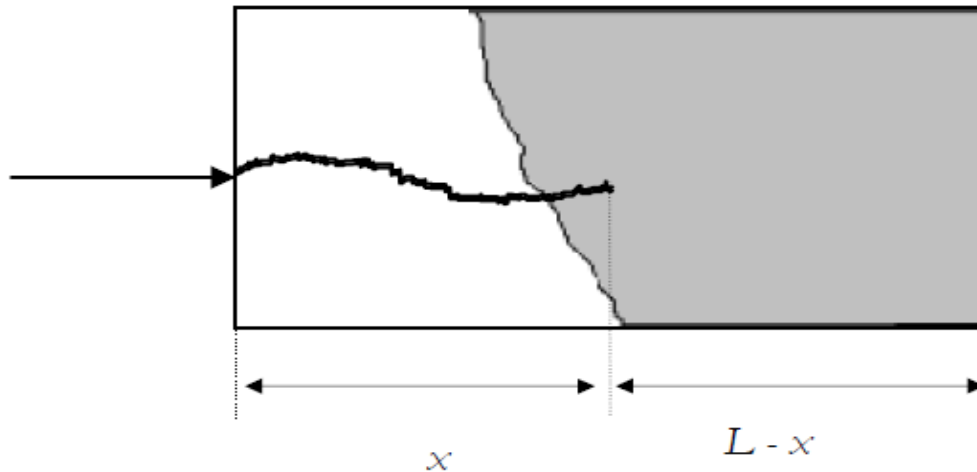


Figure.III.2 Modèle cylindrique d'Alston et Zoledziowski

III.2.3. Modèle de Danis

Se basant sur la reproduction de manière la plus proche possible de l'état de surface d'un isolateur en exploitation, Danis proposa alors un modèle de forme géométrique simple (plan ou cylindre) possédant plus d'une zone sèche (Figure.III.3). La rupture des zones sèches survient alors d'une manière aléatoire. Les arcs partiels apparaissent et se déplacent de façon imprévue, car ils dépendent de plusieurs facteurs dont on ne peut pas déterminer leurs effets instantanés. [4].

- L'arc se développe d'abord à travers la zone sèche, puis dans la zone humide (Figure III.3.b).
- L'arc peut se développer à n'importe quelle position le long de la zone sèche et aucune position n'est donc privilégiée par rapport à une autre (Figure III.3.c).
- Le contournement se fait à travers les chemins déjà préétablis par les différents arcs de chaque zone sèche (Figure III.3.d).
- Lorsque l'expérience est répétée, les positions des arcs développés sont différentes et le contournement se fera donc à travers un tout autre chemin.
- En considérant que la résistance de la couche polluante est linéaire comme pour Neumarker, une simulation numérique des observations expérimentales, utilisant des

photographies a grande vitesse (3000 images/seconde), a été développée pour déterminer la tension de contournement.

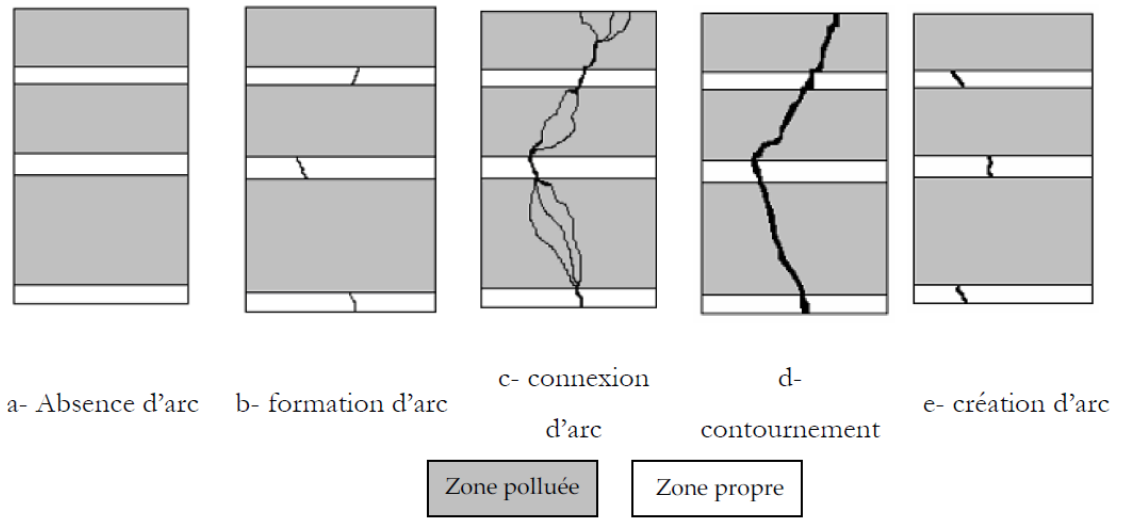


Figure III.3 Modèle de Danis

L'équation qui régit le modèle sous tension continue est :

$$V = K \cdot I^{-n} + r_p(L - X) \tag{III.7}$$

Avec : $n \leq 0,5$ et $200 \leq A \leq 400$,

r_p est la résistance linéique et L la longueur de fuite.

Le courant et la tension critiques déduits par l'auteur sont donnés par les expressions :

$$I_c = \left(\frac{K}{r_p}\right)^{\frac{1}{n+1}} \tag{3.8} \tag{III.8}$$

$$U_c = L(Kr_p)^{\frac{1}{n+1}} = KI_c^{-1} \tag{III.9}$$

III.2.4. Modèle de Nacke et Wilkins

Pour déterminer la résistance de la zone polluée, Nacke et Wilkins, considèrent que les racines de l'arc électrique prennent une forme de demi-cercles aux frontières des zones sèches (Figure III.4). Ainsi, la résistance de la pollution se compose d'une résistance R_i (interne) propre aux deux demi-cercles, et d'une résistance R_e (externe) pour le reste de la pollution.

Pour une largeur de bande étroite ($X_p/b \geq 2/\pi$; [4]) :

$$R_i(X) = \frac{1}{\pi\gamma} \tag{III.10}$$

$$R_e(X) = rx_p + \log\left(\frac{b}{2\pi r_d}\right) \tag{III.11}$$

R : est la résistance linéique de la pollution,

X_p : la longueur de la couche polluée (mouillée) dans les conditions critiques,

b : la largeur de la surface de l'isolateur,

r_d : le rayon de la base de l'arc.

Pour une bande large et pour un isolateur à ailette unique, la résistance externe est donnée par:

$$R_e(X) = \frac{2}{\pi\gamma} \left(0.68 + \ln \left(\frac{X_p}{r_d} \right) \right) \quad (\text{III.12})$$

Pour un isolateur a ailettes multiples :

$$R_e = \frac{2}{\pi\gamma} \left(0.3 + \ln \left(\frac{X_p}{r_d} \right) \right) \quad (\text{III.13})$$

Ainsi, la résistance de pollution totale sera :

$$R(X) = R_i(X) + R_e(X) \quad (\text{III.14})$$

Pour la même configuration (Figure 3.4b), dans le cas d'une bande étroite, Wilkins a obtenu :

$$R(X) = r(L - X) + \frac{1}{\pi\gamma} \ln \left(\frac{b}{2\pi r_d} \right) \quad (\text{III.15})$$

Et pour une bande large :

$$R(X) = \frac{1}{\pi\gamma} \left(\ln \left(\frac{2L}{\pi r_d} \right) - \ln \left(\tan \frac{\pi X}{L} \right) \right) \quad (\text{III.16})$$

X : la longueur d'arc,

L : la distance totale de fuite de l'isolateur.

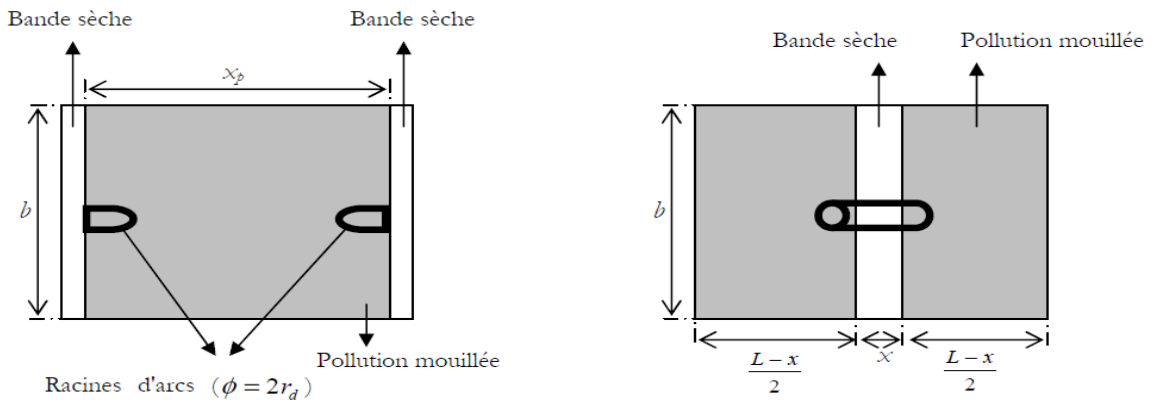


Figure III.4 Représentation schématique de la surface d'un isolateur Modèle de **Nacke et Wilkins**

III.2.5. Modèle de Tegar (pollution discontinue)

L'auteur a élaboré un algorithme qui permet d'obtenir les différentes caractéristiques des phénomènes de conduction sur les surfaces isolantes sous pollution discontinue. Les bandes propres et polluées sont représentées par des circuits électriques (Figure III.5). [4]

Les composants de ces circuits sont déterminés à partir des essais effectués sur la plaque propre et celle uniformément polluée. Le courant de fuite critique et la tension de

contournement sont calculés à partir de la connaissance de la tension de contournement obtenue expérimentalement dans le cas où les couches de la pollution discontinue sont remplacées par du papier aluminium. La figure ci-dessus représente le circuit électrique équivalent au modèle de laboratoire sous pollution discontinue. Dans ce circuit, chaque bande i ($i=1$ à 6) est constituée d'une résistance R_{0i} en parallèle avec une capacité C_{0i} . Pour chaque bande polluée i ($i=2, 4, 6$), ces circuits sont shuntés par une résistance R_i représentant la couche de pollution (peinture semi-conductrice à base de graphite). Le fait que les couches polluantes possèdent des formes rectangulaire et selon la recommandation de la CEI 60-1, l'expression de la résistance pour chaque bande polluée i peut être formulée par :

$$R_{pi} = R_{sp} \int_0^{L_i} \frac{dl}{b} = R_{sp} \frac{L_i}{b} = R_p f \frac{L_i}{b} \tag{III.17}$$

Avec $i=2, 4, 6$, R_{pi} la résistance de la couche de pollution, dl élément de longueur, L_i la longueur de la pollution, b la largeur de la couche de pollution et f le facteur de forme .

Les résultats simulés concordent parfaitement avec ceux obtenus expérimentalement pour les grandes largeurs de couches polluantes. [4]

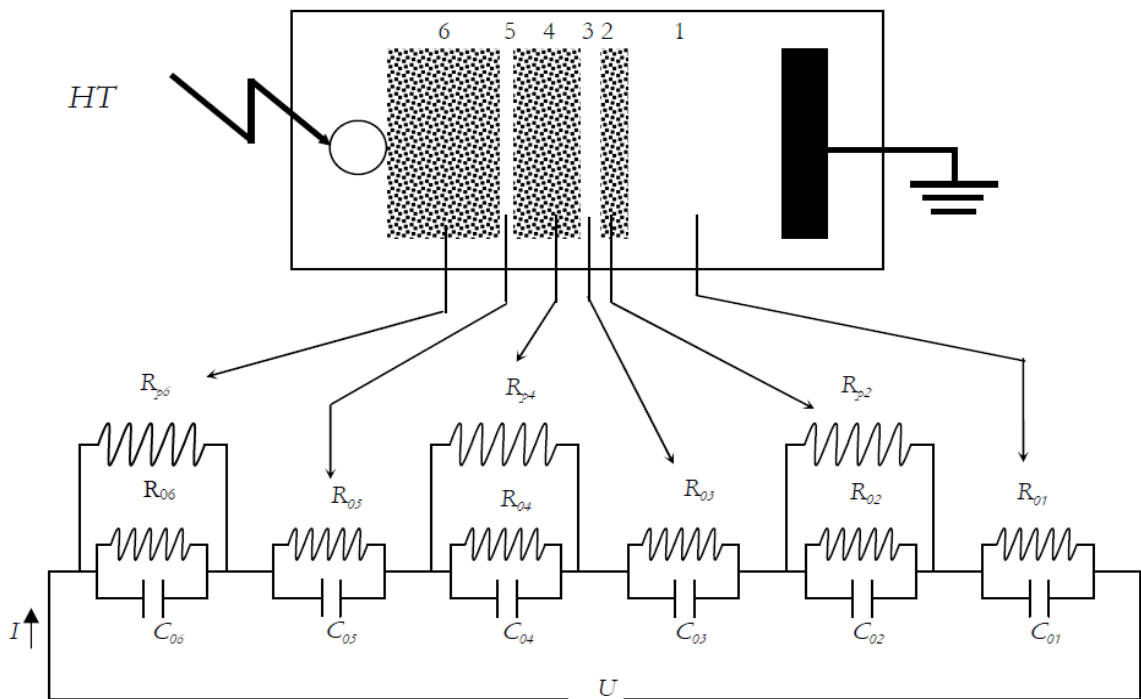


Figure III.5 Circuit électrique équivalent du modèle de laboratoire (**Modèle de Tegar**)

III.2.6. Modèle de Dhahbi et Beroual

Dans ce modèle, Dhahbi et Beroual considère que la décharge peut être représentée par un schéma électrique équivalent comme indique dans la figure 3.6. Ri, Ci, Li, et Uri sont respectivement la résistance, la capacité, l’inductance et la tension correspondant a chaque cellule nouvellement crée représentant un nouveau déplacement partiel de l’arc électrique. Ce modèle est base sur le critère d'impédance. Pour déterminer ces paramètres (R, L, C), ces auteurs ont utilises ; [4] :

- pour calculer la variation de la résistance, l'équation de Mayr;
- pour déterminer la capacité, une approximation sphérique;
- pour l'inductance du canal de la décharge, les simplifications proposées dans.

III.2.7 Modèle de Dhahbi, Beroual et Krahenbul

Ces auteurs ont proposes un nouveau critère analytique de propagation de la décharge en faisant intervenir l’impédance équivalente Zeq d’un circuit électrique, simulant un isolateur pollue sur lequel une décharge s’est produite (Figure III.7). En utilisant la condition nécessaire a la propagation de l’arc, donnée par ;[4] :

$$\frac{d|Z_{eq}|}{dx} \leq 0 \tag{III.18}$$

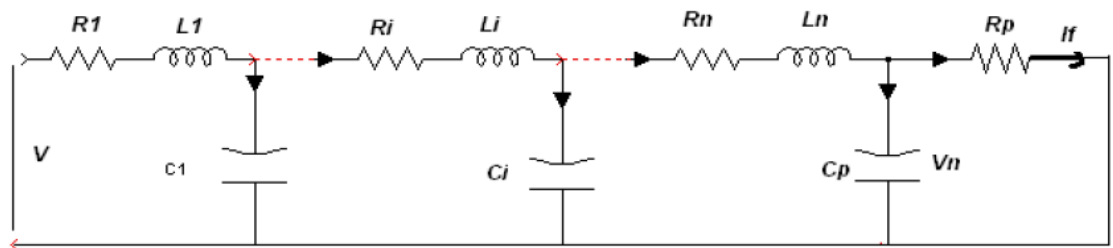


Figure III.6 Circuit électrique équivalent de la propagation de l’arc

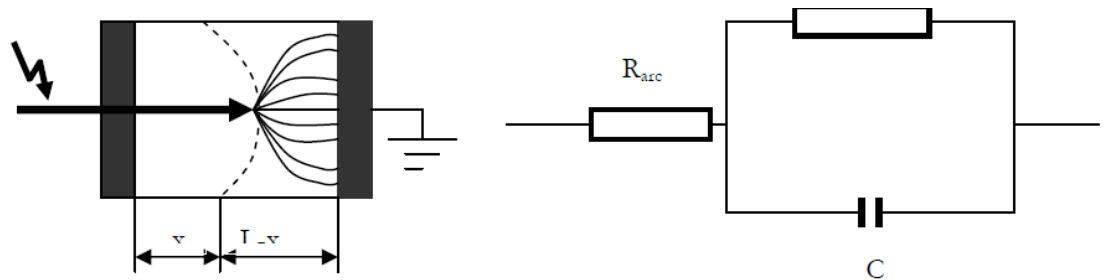


Figure III.7 Modèle d’un isolateur pollué et circuit équivalent correspondant Modèle de Dhahbi, Beroual et Krahenbul

Ces auteurs ont abouti à un critère qui est :

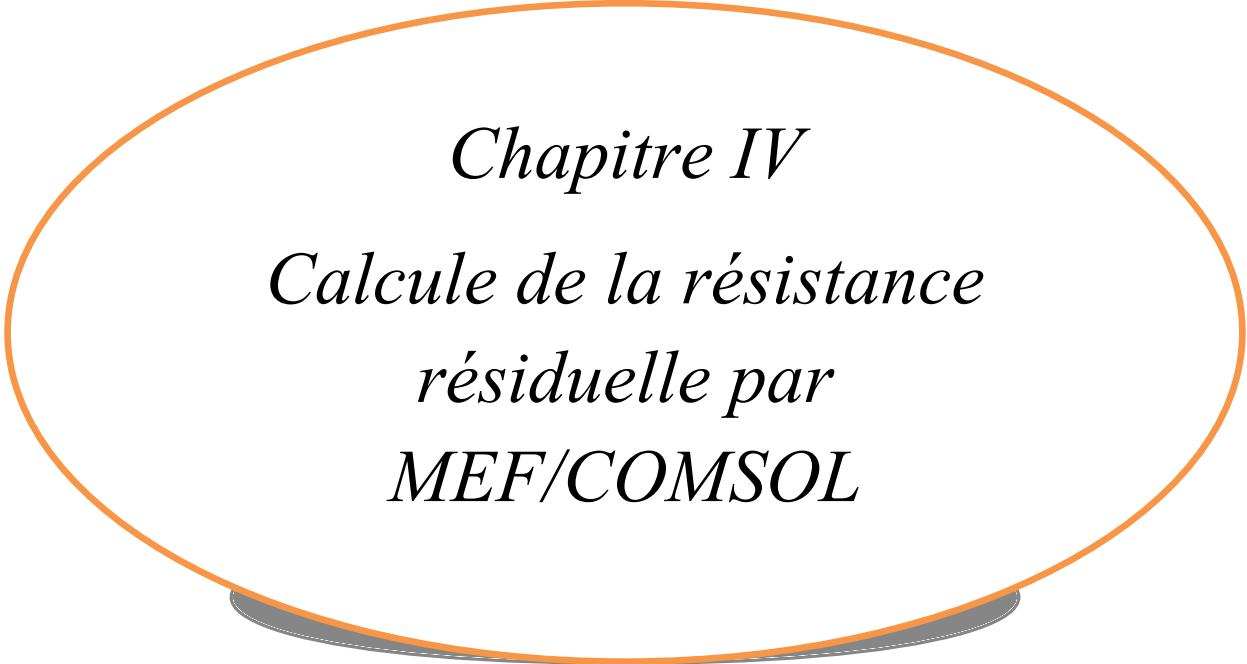
$$E_{arc} \geq \frac{E_p}{\sqrt{a}} \quad (\text{III.19})$$

Sous tension continue $a = 1$, car $a = 1 + \omega^2 \rho_p^2 \varepsilon^2$

Avec ω : la pulsation ρ_p : la resistivite de la pollution. et ε : la permittivite de la pollution.

III.3 Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons mené une recherche bibliographique qui nous a permis d'explorer les principaux modèles, La plupart des modèles traitent le problème de manière statique et reposent sur le modèle propose par Obenaus. Ils traitent le phénomène de contournement sous un aspect global en lui associant des critères d'extension se basant soit sur le champ électrique, soit sur l'énergie ou encore la puissance dissipée. Elle nous a permis, par ailleurs, d'étudier, de nouveaux modèles dynamiques. Ces modèles sont aussi disponibles dans la littérature. Ces modèles sont, cependant, insuffisants lors du passage a l'application pratique principalement a cause des hypothèses simplificatrices rendues nécessaires par les traitements mathématiques. Il est clair que lorsqu'il s'agit de comparer les performances de divers types d'isolateurs, l'étude expérimentale constitue en définitive le meilleur garant d'un jugement objectif.[4]



Chapitre IV
Calcul de la résistance
résiduelle par
MEF/COMSOL

IV.1 Introduction :

L'objectif principal de cette simulation est de déterminer la résistance résiduelle de la couche la couche de pollution lors de propagation de la décharge électrique. L'utilisation d'une méthode numérique par l'intermédiaire d'un logiciel (**COMSOL**) s'est avérée être une des meilleures solutions compte tenu de la difficulté des mesures expérimentales. À cet effet, la méthode des Éléments Finis était la mieux adaptée aux contraintes imposées par le problème. De plus, cette méthode numérique avait été appliquée avec succès dans le calcul du potentiel et du champ électrique autour des isolateurs.

IV.2.Principe

Le principe de cette méthode consiste à diviser le domaine d'étude en plusieurs éléments finis (appelé maillage). C'est une étape très importante puisque le maillage est primordial dans la précision des résultats obtenus. Il est donc nécessaire de trouver la forme et le degré d'approximation de celui-ci qui soient les plus adaptés à la géométrie du domaine d'étude.

IV.3.Démarche éléments finis

Voici les principales étapes de la construction d'un modèle éléments finis :

- discrétisation du milieu continu en sous domaines ;
- construction de l'approximation nodale par sous domaine ;
- calcul des matrices élémentaires correspondant à la forme intégrale du problème;
- assemblage des matrices élémentaires ;
- prise en compte des conditions aux limites ;
- résolution du système d'équations.

IV.4.Discrétisation géométrique

Cette opération consiste à procéder à un découpage du domaine continu en sous domaines :

Il faut donc pouvoir représenter au mieux la géométrie souvent complexe du domaine étudié par des éléments de forme géométrique simple. Il ne doit y avoir ni recouvrement ni trou entre deux éléments ayant une frontière commune.

Lorsque la frontière du domaine est complexe, une erreur de discrétisation géométrique est inévitable. Cette erreur doit être estimée, et éventuellement réduite en modifiant la forme ou

en diminuant la taille des éléments concernés comme proposé sur la figure (IV.1) Sur chaque élément nous allons chercher à définir une approximation de la fonction solution. [10]

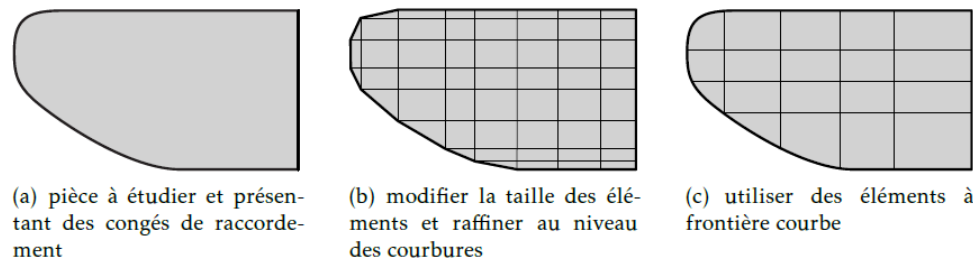


Figure IV.1 Erreur de discrétisation géométrique

IV.5.Utilisation d'un logiciel éléments finis

Un programme général de type industriel doit être capable de résoudre des problèmes variés de grandes tailles (de mille à quelques centaines de milliers de variables). Ces programmes complexes nécessitent un travail d'approche non négligeable avant d'espérer pouvoir traiter un problème réel de façon correcte. Citons à titre d'exemple quelques noms de logiciels : NASTRAN, ANSYS, ADINA, ABAQUS, CASTEM 2000, CESAR, SAMCEF, etc. et dans notre cas en utilisant logiciel **COMSOL**. Les possibilités offertes par de tels programmes sont nombreuses :

- analyse linéaire ou non d'un système physique continu;
- analyse statique ou dynamique ;
- prise en compte de lois de comportement complexes ;
- prise en compte de phénomènes divers (élasticité, thermiques, électromagnétiques, de plasticité, d'écoulement. . .) Pouvant être couplés ;
- problèmes d'optimisation, etc.

L'utilisation de tels programmes nécessite une formation de base minimale. [10]

IV.8.Description du logiciel « COMSOL Multyphysics »

La simulation numérique est une approche donnant la possibilité aux chercheurs d'analyser le comportement de plusieurs phénomènes qui, par leur complexité, échappent au calcul classique. La modélisation, quant à elle, est la mise en équations de ces phénomènes. Vue la large gamme de problèmes scientifiques basés sur des équations aux dérivées partielles, COMSOL Multyphysics@[12] peut servir d'une manière puissante et interactive à

les résoudre en se fondant sur la méthode des éléments finis ou encore interagir avec des logiciels de programmation tels que Matlab.

COMSOL Multiphysics est un outil très employé dans des secteurs divers de recherche, car il facilite amplement les étapes de modélisation et de simulation, soit : la définition de la géométrie, des propriétés physiques des matériaux présents et des conditions aux frontières, le maillage, la résolution et l'affichage des résultats. Par ailleurs, le logiciel ne demande pas de connaissances approfondies dans les mathématiques ou les analyses numériques. En effet, toutes les équations nécessaires à la résolution sont déjà prédéfinies, il suffit alors de préciser dans quel domaine (électromagnétisme, transfert de chaleur, acoustique...) et dans quel régime (stationnaire, temporel...) le modèle doit être construit selon ce choix, la modélisation est disponible en 1D, 2D, 2D axisymétrique ou encore en 3D.

À propos de cette étude, le logiciel COMSOL Multiphysics a été retenu pour modéliser la couche conductrice recouvrant l'isolateur. En sélectionnant l'option 'Module Electric currents' pour construire une géométrie surfacique et spécifier les conditions aux limites et les propriétés physiques de film d'eau, COMSOL procède à l'exécution des étapes résumées dans la section précédente. [13]

Ce programme, il est basé sur le modèle mathématique à l'aide des équations de **Maxwell** suivant :

$$\nabla \cdot J = Q_j \quad \text{IV.1}$$

$$J = \sigma E + J_e \quad \text{IV.2}$$

$$E = -\nabla V \quad \text{IV.3}$$

IV.9.L'interface graphique de COMSOL :

Au démarrage du logiciel, le navigateur de modèle apparaît. C'est lui que permettra de spécifier le ou les modèles physique 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. (Figure IV.2)

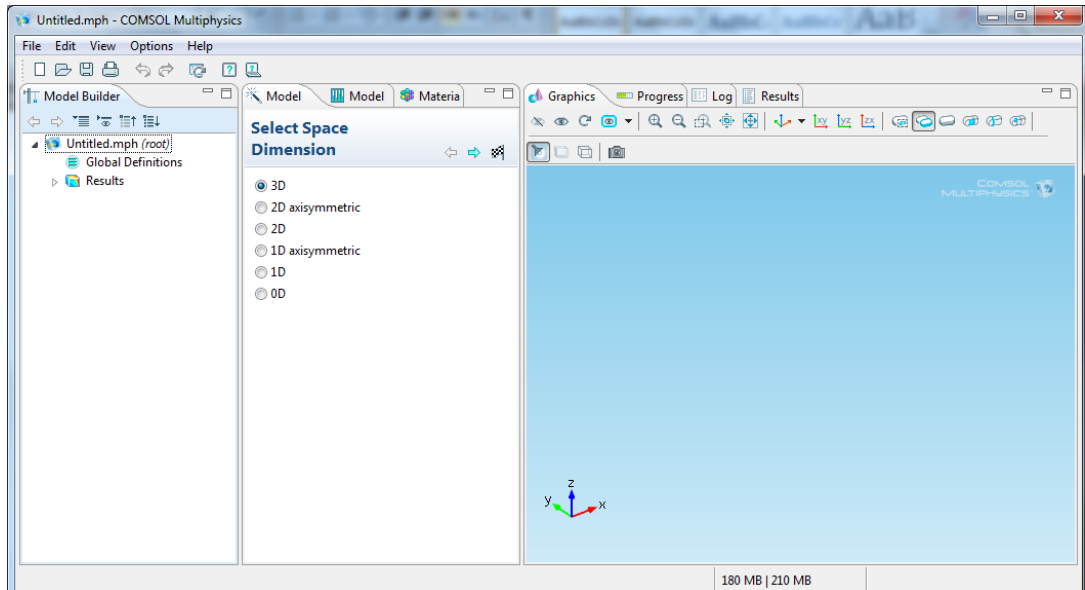


Figure IV.2 Fenêtre de select spcae

Après on choisi «select space » pour préciser les dimensions du travail (0D, 1D ,1D axisymétrique, 2D, 2D axisymétrique ou encore en 3D).

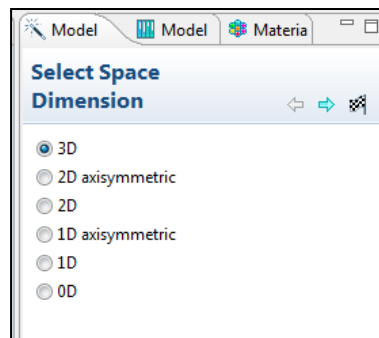


Figure IV.3 Fenêtre de « SELECT SPCAE »

Dans cette étape, on choisi le type de champs physique du modèle (PHYSICS). Pour notre cas on choisi « **ELECTRIC CURRENT** » (figure IV.4)

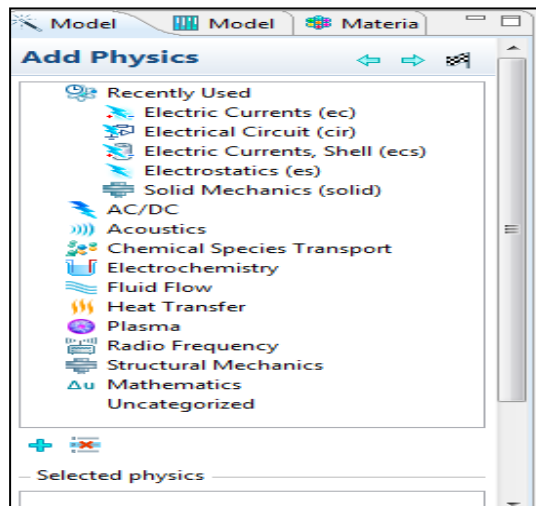


Figure IV.4 Fenêtre de « ADD PHYSICS(MODEL) »

La prochaine étape est de sélectionner le type d'étude qu'on doit appliquer « SELECT STUDY TYPE ». Dans cette étude on choisi le type « STATIONARY ».

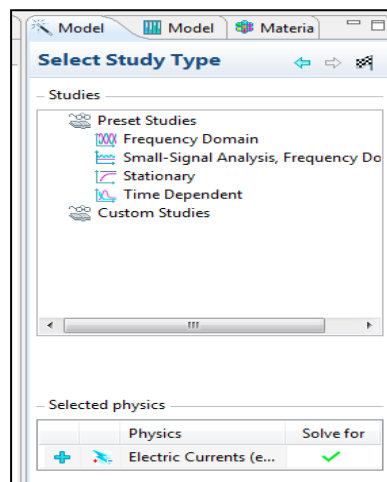


Figure IV.5 Fenêtre “SELECT STUDY TYPE”

En suite, on dessine la géométrie de l'élément à simuler à travers des outils de la rubrique « GEOMETRY ». Pour cela, on défini d'abor les unités de mesure (m, cm, mm ...), puis on construit la forme du modèle à partir de formes simples déjà disponibles (rectangle, cercle...) ou bien importer la forme d'un autre logiciel de dessin.

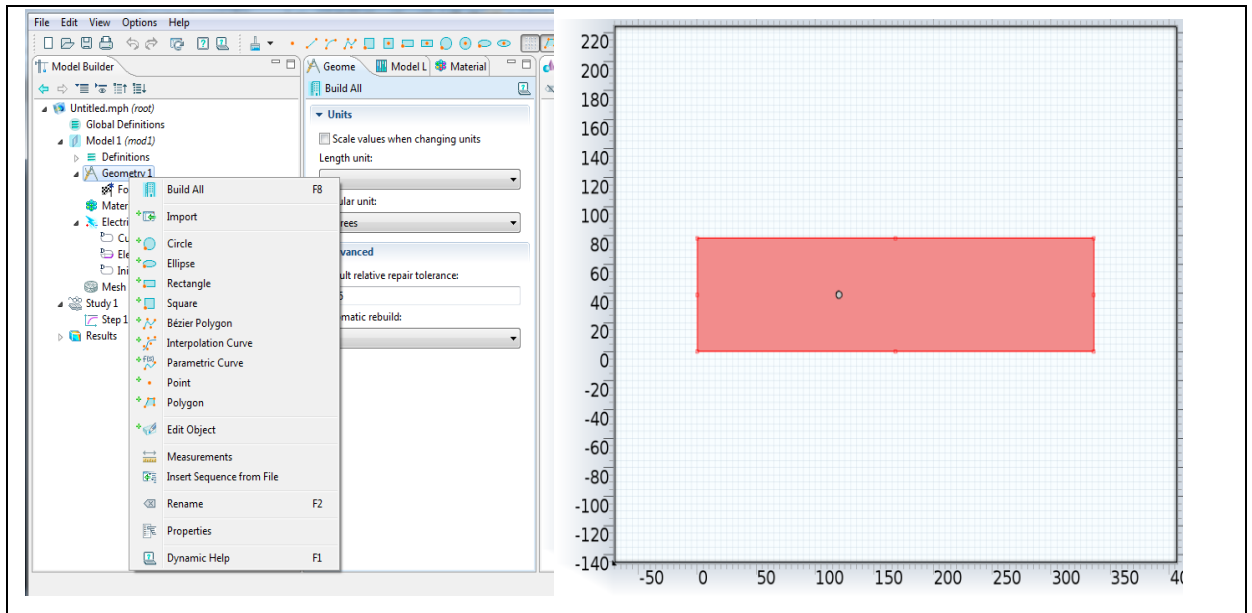


Figure IV.6 Géométre exemple de l'équivalent de l'isolateur U120

Par la suite, on définit les matériaux utilisés dans chaque domaine du modèle. Dans notre étude il y a trois différents types de matériaux (aluminium, sable, verre...)

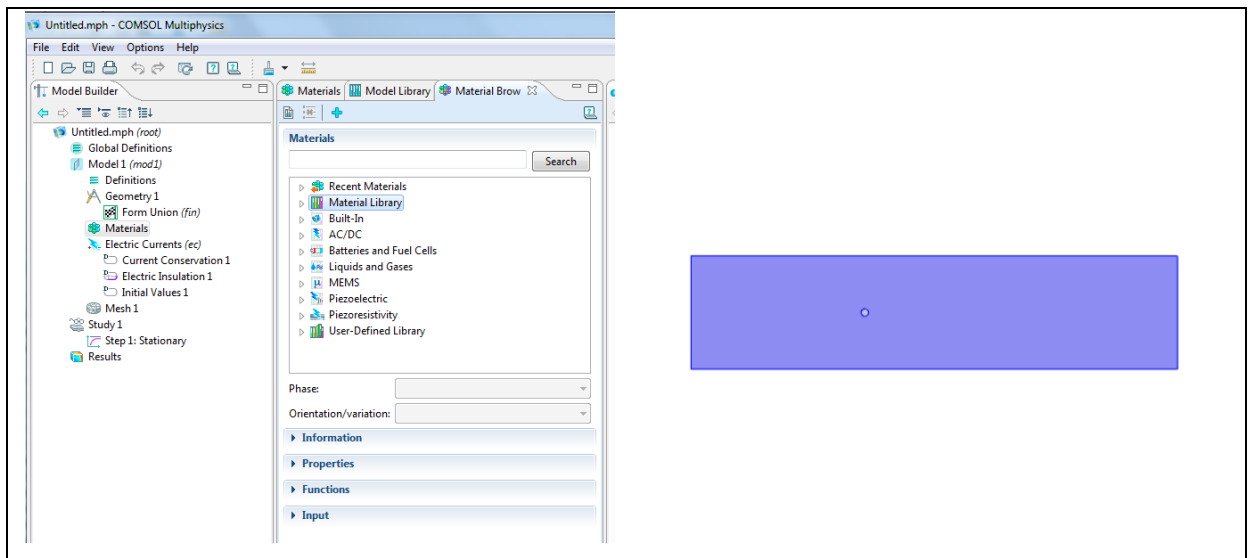


Figure IV.7 Matériel exemple de l'équivalent de l'isolateur U120

Après, on sélectionne le Type de champs physique à utiliser 'ELECTRICAL CURRENT'. Dans ce cas on doit préciser l'emplacement de la mise à terre 'GROUND', et le borne de tension « TERMINAL » où la tension est appliquée. Ainsi on précise l'épaisseur de la couche polluant 'THICKNESS'.

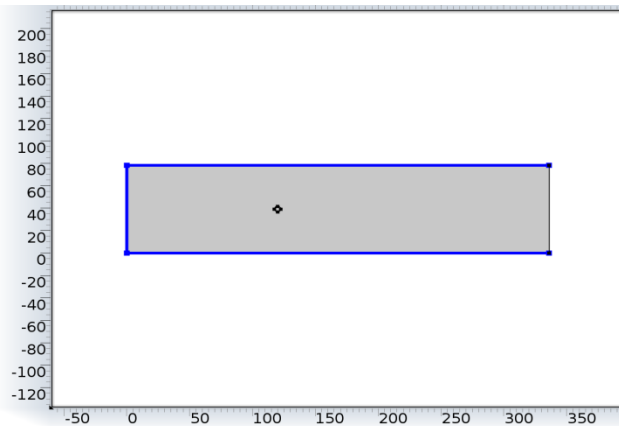


Figure IV.8 détermination de physics

- **Le maillage (mesh) :**

COMSOL propose un maillage adéquat qui est plus dense autour des formes de petite dimension et un maillage moins dense ailleurs. Les dimensions de maillage peuvent aussi être modifiées manuellement selon le choix de l'utilisateur.

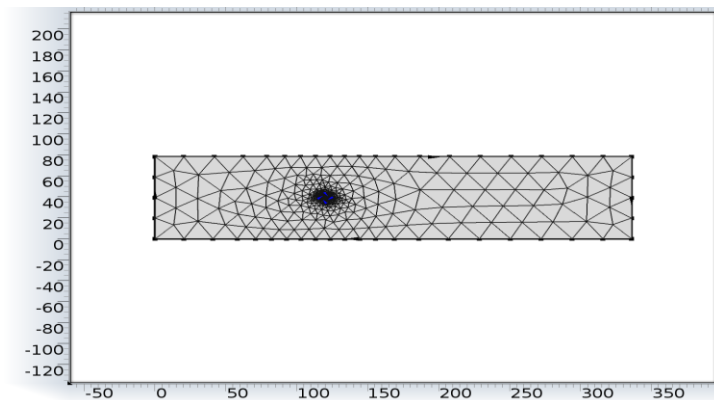


Figure IV.9 Le maillage U120

- **Résultats de simulation :**

Cette dernière étape lance le programme de calcul des propriétés physiques recherchés dans tous les points du maillage. Les résultats sont affichés comme illustré dans la figure IV.10

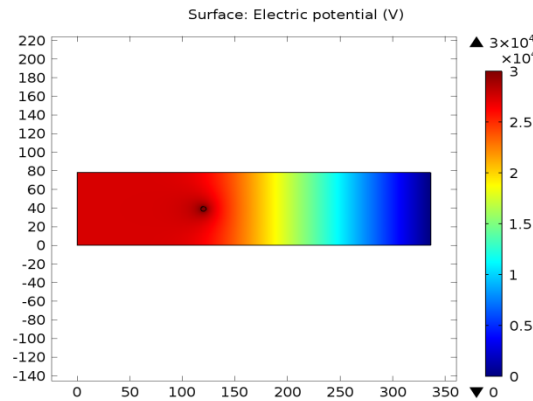


Figure IV.10 Résultats de simulation

IV.10 Simulation :

Cette étude de simulation est appliquée sur l'isolateur réel le U120. Nous commençons par dessiner le modèle ouvert de l'isolateur (figure IV.12). Ce modèle ouvert plan permet de passer de la géométrie tridimensionnelle (3D) à la géométrie bidimensionnelle (2D). Ce modèle est établi en associant à chaque point de la ligne de fuite une largeur égale à la circonférence de cercle que fait le rayon de la position du même point sur l'isolateur réel. L'utilisation de ce modèle ouvert est justifiée par le fait que la conduction de la couche de pollution est principalement surfacique. Par la suite, un modèle rectangulaire avec une largeur égale à la largeur moyenne est aussi construit afin de faire une comparaison.

Pour estimer la résistance résiduelle entre l'arc et la borne de mise à la terre, la surface de contact entre l'arc et la couche de pollution est considéré comme étant un cercle de rayon fixe. Deux valeurs extrêmes de rayon sont considérées. La valeur minimale correspondant à un courant de 1A et une valeur maximale correspondant à un courant de 15A.

IV.11.L'isolateur U120

L'isolateur en verre U120 est de type capot-tige utilisé dans les chaînes d'isolateurs des lignes aériennes de HT de la région de Ouargla. L'isolateur est remplacé donc par un modèle plan équivalent dont la largeur est variable selon la position du point sur la ligne de fuite. La formule de cette largeur est donnée en fonction de rayon de l'isolateur à la longueur x sur la ligne fuite par :

$$a(x) = 2 \cdot \pi \cdot r(x) \quad (IV, 3)$$

Pour schématiser l'isolateur d'une manière précise nous avons imprimé le dessin technique de l'isolateur sur un papier gradué. Puis nous avons déterminé les coordonnées de 30 points (y, r)

réparti sur la surface de l'isolateur en partant de la tige jusqu'au capot. Ces coordonnées sont introduit dans un feuille de calcul du tableur Excel qui permet de calculer tous les propriétés géométriques nécessaires de l'isolateur (Tableau IV.1). Parmi celle-ci : la longueur de fuite x , la circonférence à la position x et enfin le facteur de forme.

La feuille Excel permet entre autres de calculer la résistance résiduelle pour chaque position sur la ligne de fuite pour une résistivité unitaire. Il faut noter que le calcul de cette résistance se fait sans prise en compte de la concentration du courant autour de la tête de l'arc et les lignes équipotentielles sont des lignes parallèles.



Figure IV.11 L'isolateur capot-tige U120

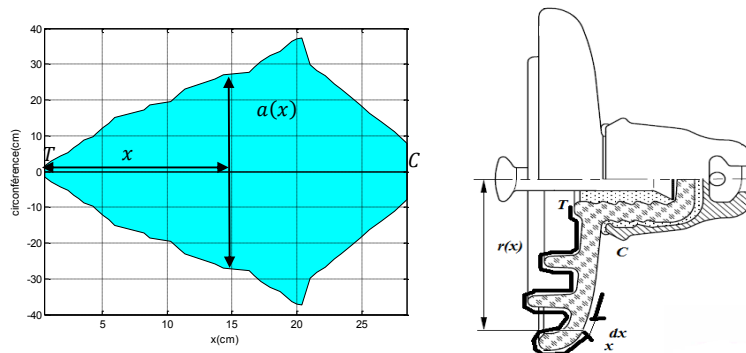


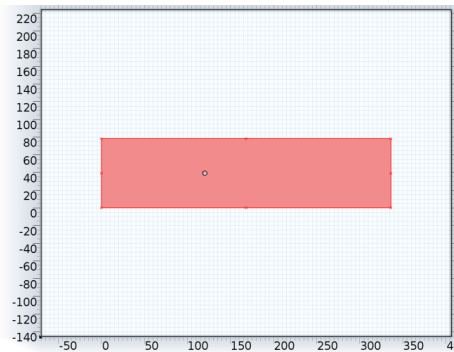
Figure IV.12 Plant équivalent de modèle du l'isolateur

Le modèle de simulation de l'isolateur U120 est donc donné par la figure IV.14. La résistance est ainsi calculer en changeant la position du cercle qui représente le contact avec l'arc par un pas de 3cm. La position initial est du coté tige. Cela est justifié par la forte concentration du courant à cet endroit et la forte probabilité d'apparition d'une bande sèche qui favorise l'amorçage d'un arc électrique.

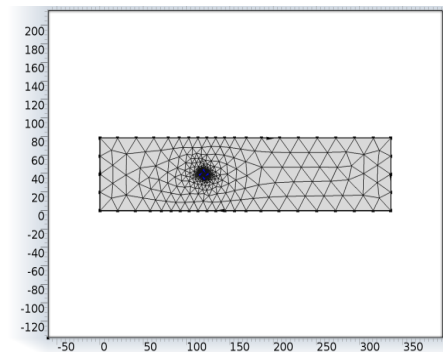
La simulation est faite deux configurations différentes. La premièrement pour le modèle ouvert à largeur variable, puis pour le modèle rectangulaire à largeur fixe.

Les étapes de suivie lors de notre simulation sont pour de:

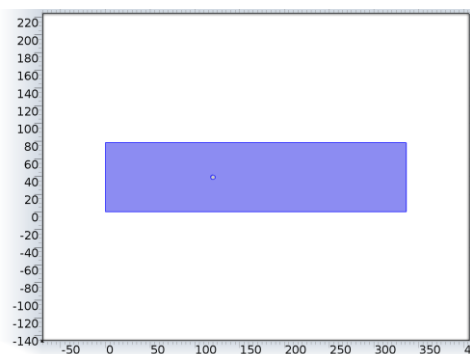
- Etape 1 : Dessiner le modèle équivalent de l'isolateur à l'aide des points géométriques obtenues de la feuille de calcul Excel.
- Etape 2 : définir les matériaux utilisés.
- Etape 3 : faire le maillage
- Etape 4 : lancer la simulation



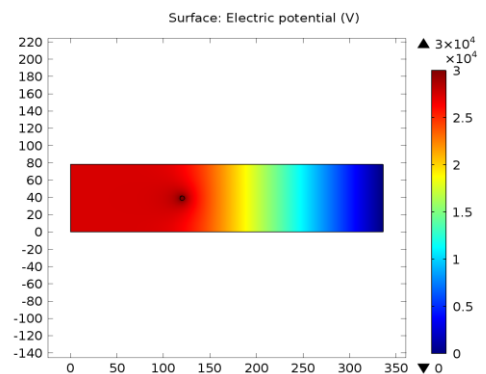
étape 1 : Introduire le schéma équivalent



étape 2 : Le maillage

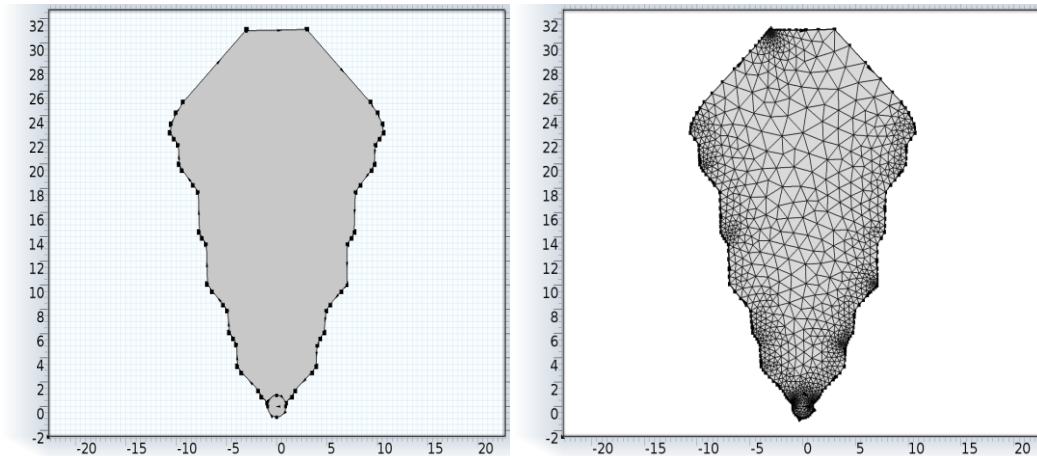


étape 3 définition des matériaux utilisés



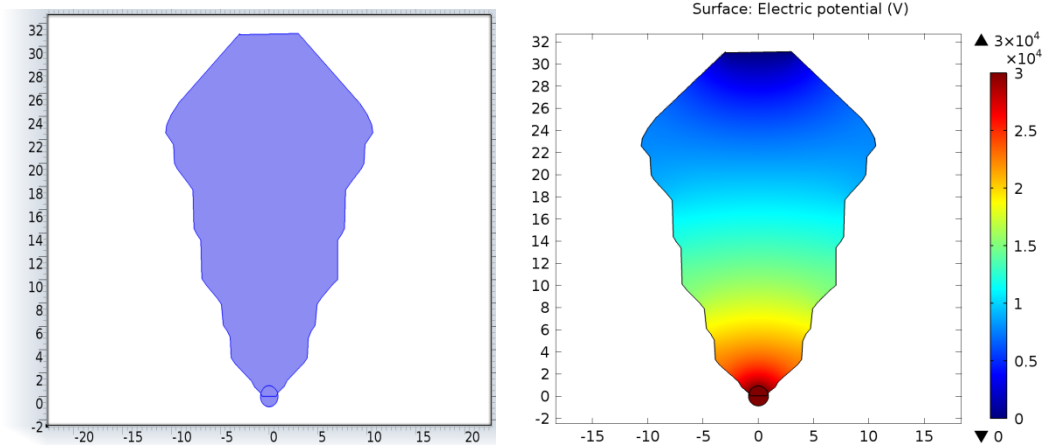
étape 4 lancer la simulation

Figure IV.13 Les différentes étapes utilisées pour la simulation pour l'équivalent rectangulaire de l'isolateur U120



étape 1 : Introduire le schéma équivalent

étape 2 : Le maillage



étape 3 définition des matériaux utilisés

étape 4 lancer la simulation

Figure IV.14 Les différentes étapes utilisées pour la simulation pour l'équivalent de plan ouvert de l'isolateur U120

Y	R	moy_r	2*pi*r	Δl	$\Delta l/moy-r$	résistance	X
40	9	11,5	72,22	5	0,43478261	0,43478261	5
40	14	17	106,76	7,81024968	0,45942645	0,89420906	12,8102497
45	20	27	169,56	14,1421356	0,5237828	1,41799186	26,9523853
43	34	36,5	229,22	7,07106781	0,19372789	1,61171975	34,0234531
38	39	39,5	248,06	20,0249844	0,50696163	2,11868138	54,0484375
18	40	42	263,76	5	0,11904762	2,237729	59,0484375
15	44	46	288,88	5	0,10869565	2,34642465	64,0484375
18	48	48,5	304,58	20,0249844	0,41288628	2,75931092	84,0734219
38	49	52	326,56	7,21110255	0,13867505	2,89798597	91,2845245
42	55	60	376,8	10,0498756	0,16749793	3,0654839	101,3344
41	65	67,5	423,9	7,07106781	0,10475656	3,17024046	108,405468
36	70	70,5	442,74	32,0156212	0,45412229	3,62436275	140,421089
4	71	73	458,44	5,65685425	0,07749115	3,7018539	146,077943
0	75	77	483,56	5,65685425	0,07346564	3,77531954	151,734798
4	79	79	496,12	32	0,40506329	4,18038283	183,734798
36	79	81,5	511,82	6,40312424	0,07856594	4,25894877	190,137922
40	84	90	565,2	12,3693169	0,13743685	4,39638563	202,507239
37	96	97	609,16	5,38516481	0,05551716	4,45190279	207,892403
32	98	99	621,72	18,1107703	0,18293707	4,63483986	226,003174
14	100	101,5	637,42	4,24264069	0,04179942	4,67663928	230,245814
11	103	104,5	656,26	4,24264069	0,04059943	4,71723871	234,488455
14	106	103	646,84	20,880613	0,2027244	4,91996311	255,369068
34	100	95	596,6	13,453624	0,1416171	5,06158021	268,822692
43	90	82,5	518,1	15,8113883	0,19165319	5,2532334	284,634081
48	75	67,5	423,9	15,132746	0,22418883	5,47742223	299,766826
50	60	50	314	20,0997512	0,40199502	5,87941725	319,866578
52	40	32	200,96	16,4924225	0,5153882	6,39480545	336,359
56	24	11,5	72,22	5	0,43478261	0,43478261	5
40	9	17	106,76	7,81024968	0,45942645	0,89420906	12,8102497
40	14	27	169,56	14,1421356	0,5237828	1,41799186	26,9523853
45	20						
				Facture de forme	6,39480545		

Tableau IV.1 : Grandeurs géométriques l'isolateur U120

IV.12. Résultats et Interprétations :

Sur cette simulation on a pris différentes positions de l'arc électrique 'x'; d'après le tableau 1 et l'équivalent de l'isolateur U120 on obtient les courbes suivants :

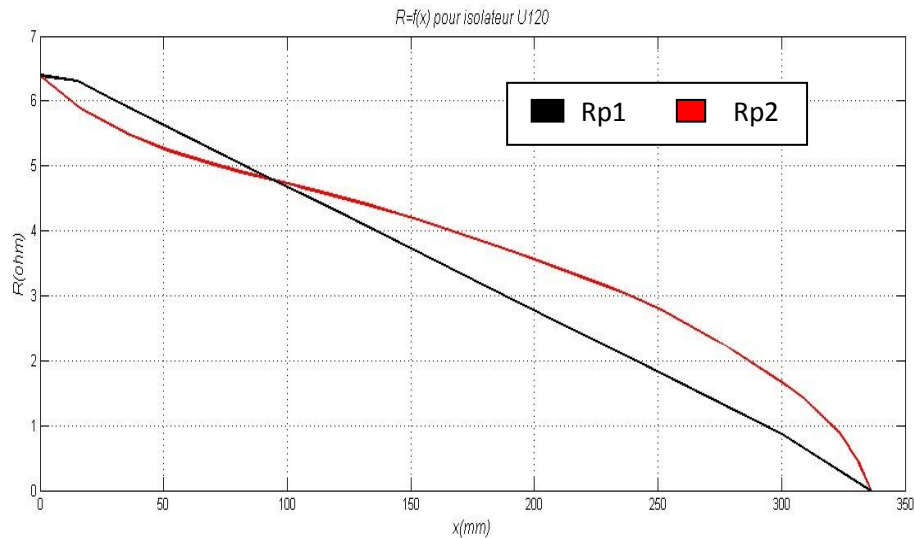


Figure IV.15 Courbes de résistance du modèle rectangulaire et la résistance résiduelle de (tableau IV.1) de type U120 represent la longueur de l'arc

Sur la figure IV.15 on observe qu'il y a une nette différence entre la courbe de Rp1 qui représente la résistance pour le modèle équivalent rectangulaire en noir et la courbe Rp2 qui représente la résistance obtenue à partir du tableau IV.1 en rouge

- Les deux courbes Rp1 et Rp2 se coïncident à un point autre que le début et la fin de la ligne fuite à une distance égale à 90 mm de la tige ce qui représente 26,8% de la ligne de fuite.
- Sur l'intervalle de $x \in [0\text{mm}, 90\text{mm}]$ la courbe Rp1 est supérieure à de la courbe Rp2.
- Sur l'intervalle de $x \in]90\text{mm}, 336\text{mm}]$ la courbe Rp1 est inférieure à de la courbe Rp2

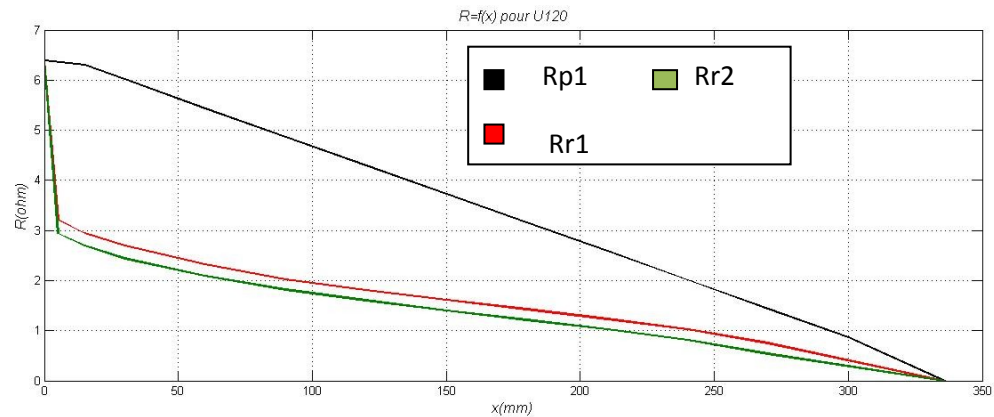


Figure IV.16 Courbes de résistance résiduelle du modèle rectangulaire et celle du modèle ouvert à largeur variable de l'isolateur U120 represent la longueur de l'arc

Pour le modèle ouvert avec largeur variable qui constitue un forme plus proche de l'état réel de l'isolateur, nous apercevons une différence considérable pour les faibles valeurs de la longueur d'arc. Cette différence diminue au fur est à mesure que la longueur d'arc augmente.

- La courbe de R_{p1} de la résistance résiduelle du modèle rectangulaire est supérieur aux deux courbes R_{r1} et R_{r2} , qui représentent respectivement la résistance du modèle ouvert avec un rayon d'arc $r_1=0,25\text{cm}$ et la résistance résiduelle du modèle ouvert avec un rayon d'arc $r_2=0,9\text{cm}$.
- La courbe R_{r1} avec un rayon d'arc faible est légèrement supérieure à la courbe R_{r2} avec un rayon d'arc plus grand.
- L'effet du rayon de l'arc n'a qu'un infime impact sur la valeur de la résistance. Cette différence est autour de 6%.

IV.13.Algorithme de calcul des valeurs critiques :

Nous avons développé un algorithme de calcul des valeurs critiques qui nous a permis de déduire la tension de contournements, le courant critique et la longueur critique. Cet algorithme repose sur le modèle d'Obenaus et l'équation statique d'Aryton. Son principe est de déduire la valeur minimale de la tension qui peut entretenir chaque longueur d'arc données. Puis, à partir des ces valeurs minimales, extraire la valeur maximale qui correspondant à la l'état critique. A ce point la tension, le courant et la longueur critiques sont donc obtenus.

Cet algorithme nécessite d'avoir la valeur de la résistance pour toute valeur de la longueur d'arc. Pour générer ces valeurs de la résistance on utilise une fonction d'interpolation des points déduits grâce à la MEF. Les étapes de sont illustré dans l'organigramme suivant :

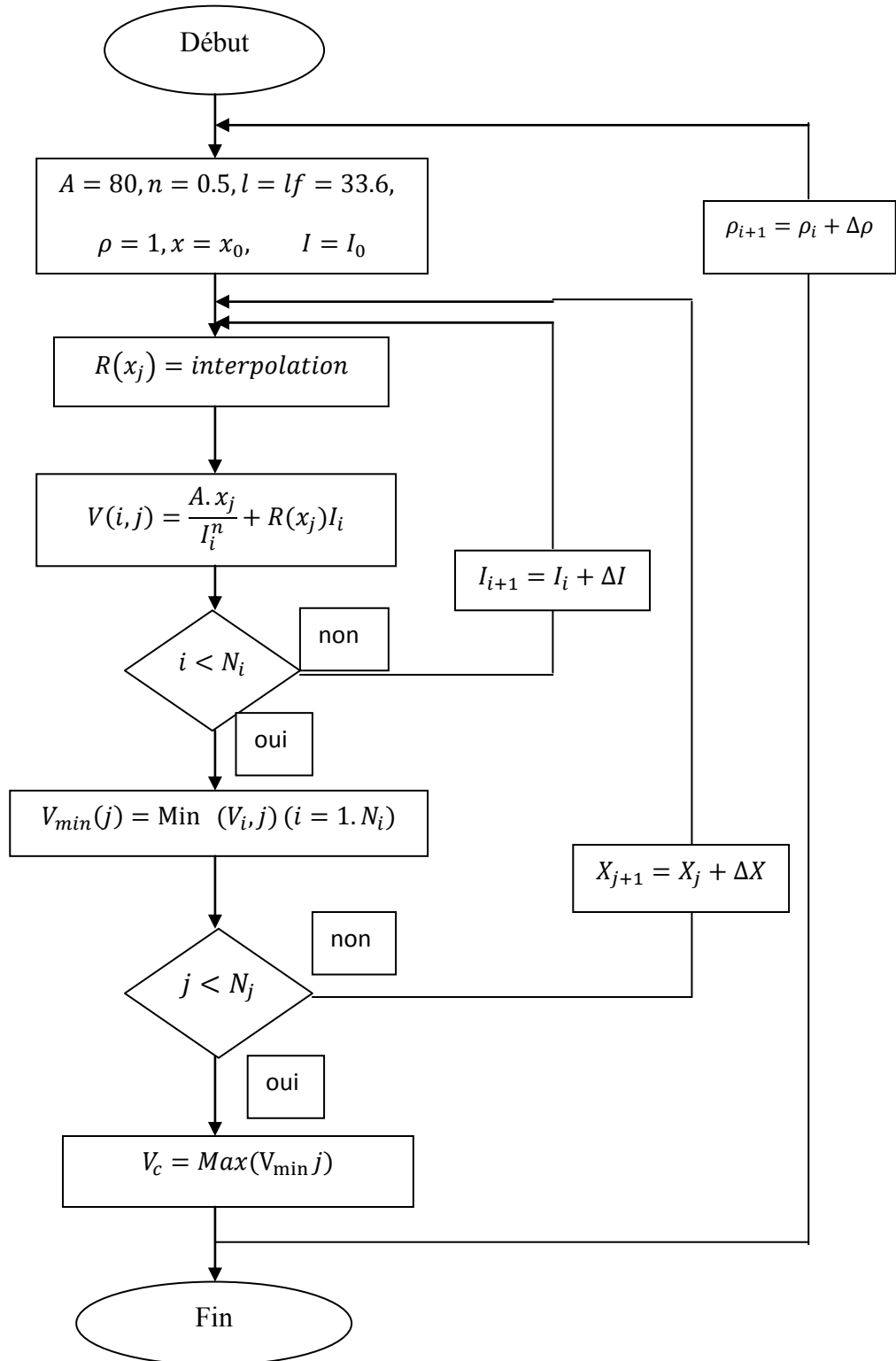


Figure IV.17 Organigramme de calcul des valeurs critiques

$l = lf$: longueur de fuite ; A : constant de l'arc; ρ : conductivité superficiel

X nombre de point ; I : courant, R : résistance ; V_c : tension critique ; V : tension appliqué

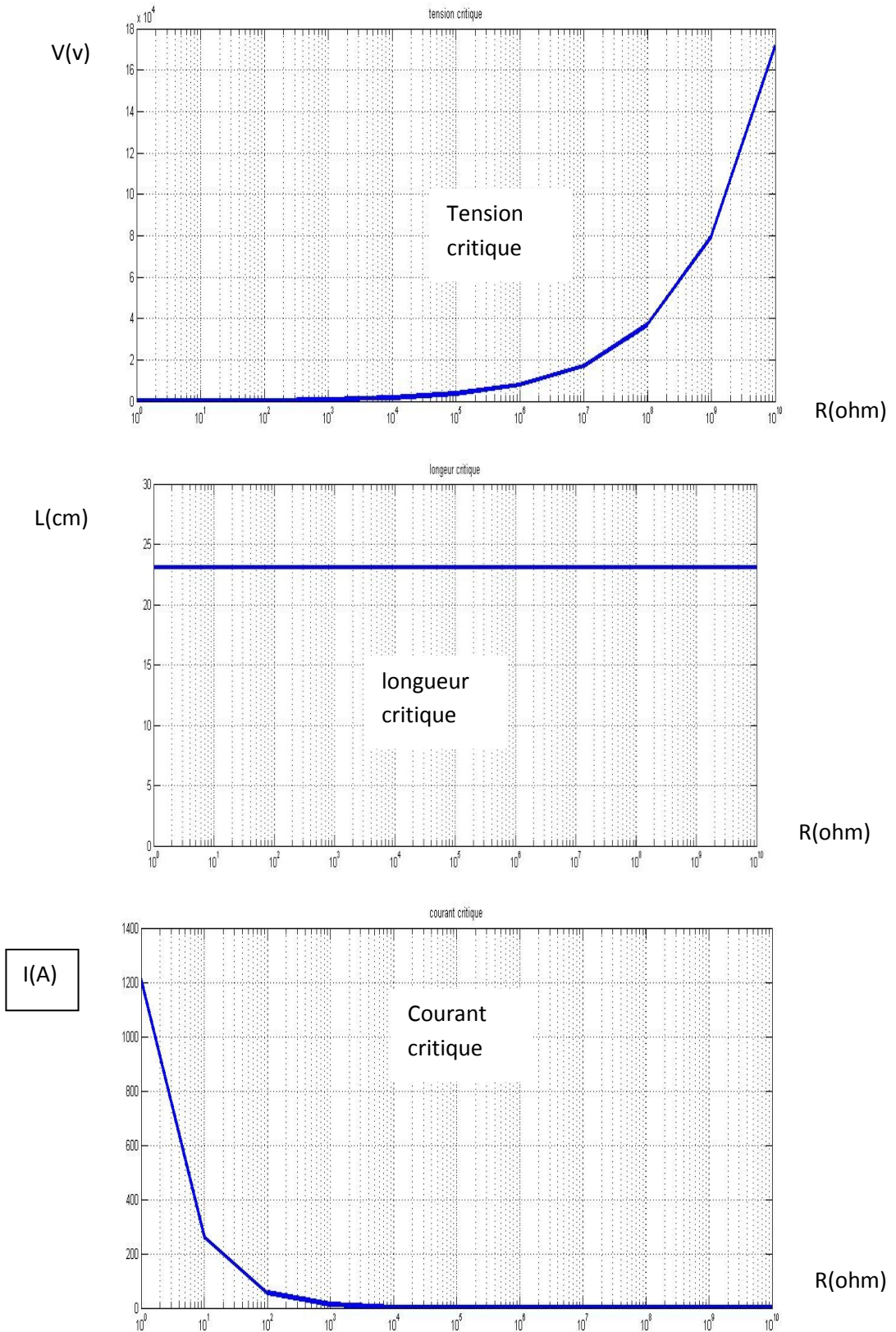


Figure IV.18 Les valeur critique du modèle rectangulaire de l'isolateur U120

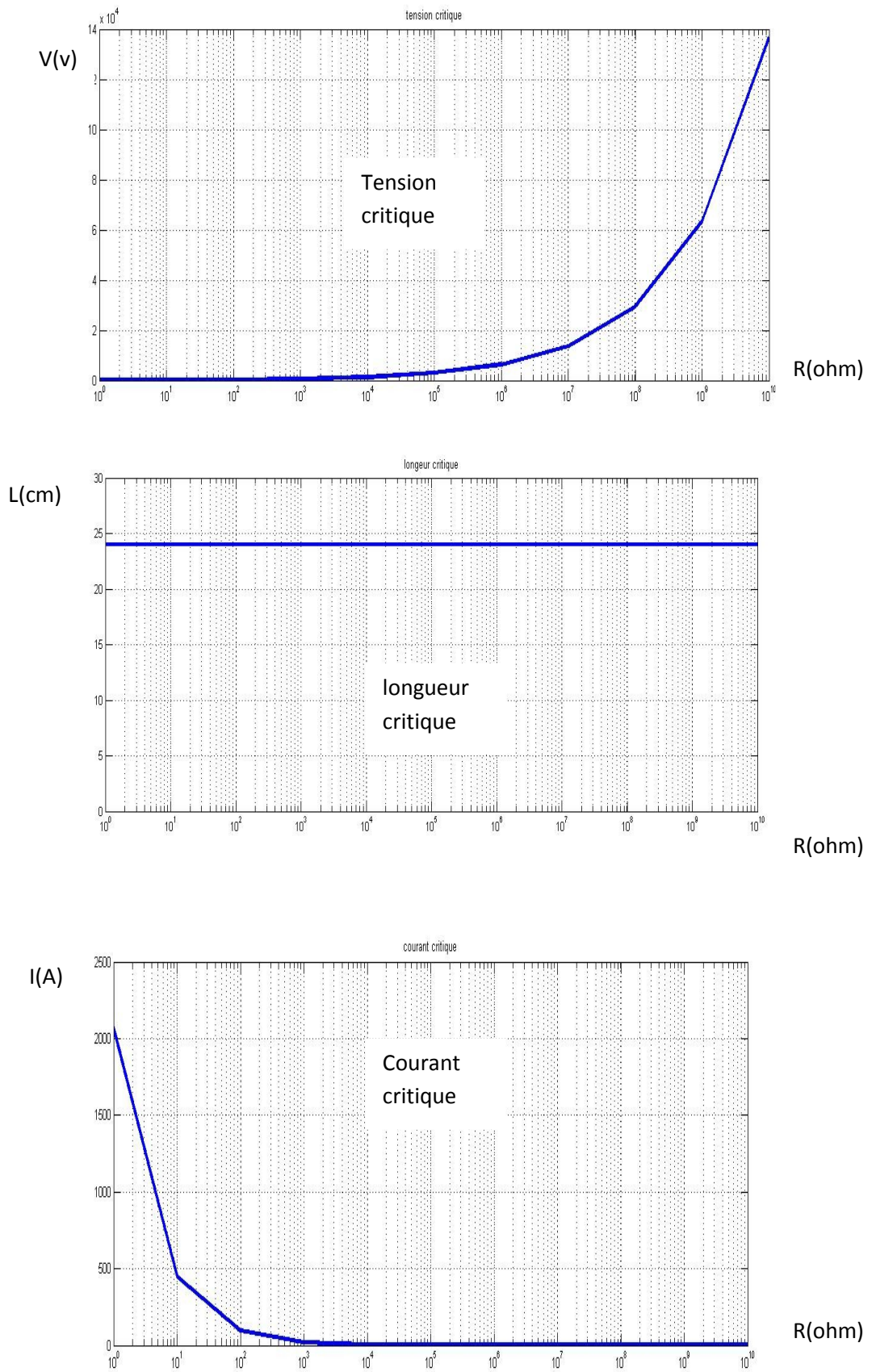


Figure IV.19 Les valeur critique du modèle ouvert de l'isolateur U120

D'après les figures (IV.18.19) On aperçoit que la tension de contournement est très sensible à la forme qui décrit l'évolution de la résistance résiduelle de la couche de pollution en fonction de la longueur d'arc x . cette différence est nettement notable au-delà d'une résistivité superficielle supérieur à 10^7 Ohm.

La tension de contournement du modèle ouvert de l'isolateur est inférieure au modèle rectangulaire.

Par contre, la longueur critique reste constante est égale à 25,7cm qui représente 76% de la ligne de fuite

En revanche, le courant critique à un comportement inverse à celle de la tension critique les valeurs du courant pour le modèle ouvert sont supérieures à celle du modèle rectangulaire. La différence est notable pour les valeurs faibles de la résistivité superficielle.


IV.14.Conclusion :

D'après ces résultats nous constatons que la détermination la résistance totale de la couche de pollution entre les deux électrodes capot et tige ne suffit pas pour prédire les valeurs critiques d'un système d'isolation d'une ligne aérienne de haute tension. L'approximation à l'aide d'un modèle plan rectangulaire, qui est une méthode adaptée par la majorité des travaux antérieurs, n'est valable que pour des valeurs faibles de la résistivité superficielle.

La tension critique du modèle rectangulaire est supérieure à celle calculée par le modèle ouvert surtout pour les grandes valeurs de la résistivité superficielle.

L'utilisation du logiciel comsol a permis d'estimer avec une grande précision la résistance de la couche de pollution en tenant compte de la géométrie de l'isolateur et aussi à la constriction du courant à la tête de l'arc électrique.

L'erreur du rayon de l'arc n'a qu'un infime impact sur les valeurs critiques calculer.



Conclusion générale

Conclusion générale

Cette étude nous a permis, dans un premier temps, d'approfondir la compréhension des phénomènes de conduction et de développement des décharges électriques sur des surfaces isolantes polluées. Au début, nous avons rappelé, dans une synthèse bibliographique, les principaux travaux examinant l'effet de la pollution sur des isolateurs réels ou sur des modèles de laboratoire. Nous avons cité également les principaux modèles statiques et dynamiques de contournement.

Par la suite, nous avons contribué à la modélisation des isolateurs pollués par la Méthode des Eléments Finis en vue de prédéterminer leur tenue au contournement, afin d'éviter la mise hors service de l'ensemble d'une installation électrique.

La majorité des modèles statiques et dynamiques prédictifs actuels reposent sur une modélisation linéaire de la variation de la résistance résiduelle de la couche de pollution en fonction de longueur de la décharge. A cet effet, le but de cette étude était de développer une nouvelle modélisation en utilisant la MEF qui prend en considération à la fois la géométrie de l'isolateur et la concentration du courant à la tête de la décharge électrique.

Pour cela, nous avons pris l'isolateur réel U120 qui est le plus répandu dans les lignes de Haute Tension en Algérie. Dans une première étape, nous commençons par dessiner le modèle ouvert correspondant de l'isolateur. Ce modèle ouvert permet d'associer à chaque point de la ligne de fuite une largeur égale à la circonférence du cercle que fait le rayon de la position du même point sur l'isolateur réel. Par la suite, un modèle rectangulaire avec une largeur égale à la largeur moyenne est aussi construit afin de faire une comparaison.

La méthode des éléments fini par le biais de logiciel Comsol est ainsi appliquée premièrement sur le modèle ouvert avec une largeur variable. Puis, appliquée sur le modèle rectangulaire équivalent. L'utilisation de la MEF a permis de tracer la caractéristique de la variation de la résistance résiduelle en fonction de la longueur d'arc pour différentes valeur du rayon de la décharge. Ces caractéristiques montrent que pour le modèle ouvert avec largeur variable la résistance est loin d'être linéaire. Par contre, pour le modèle rectangulaire équivalent la variation est très proche à la variation linéaire.

Un algorithme de calcul des valeurs critiques nous a permis de déduire la tension de contournements, le courant critique et la longueur critique. Cet algorithme repose sur le modèle d'Obenaus et l'équation statique d'Aryton. Son principe est de déduire la valeur minimale de la tension qui peut entretenir chaque longueur d'arc données. Puis, à partir des ces valeurs minimales, extraire la valeur maximale qui correspondant à la l'état critique. A ce point la tension, le courant et la longueur critiques sont donc obtenus.

Cet algorithme nécessite d'avoir la valeur de la résistance pour toute valeur de la longueur d'arc. Pour générer ces valeurs de la résistance on utilise une fonction d'interpolation des points déduits garce à la MEF.

Les résultats de simulation obtenus montre que la détermination la résistance totale de la couche de pollution entres les deux électrodes capot et tige ne suffit pas pour prédire les valeurs critiques d'un système d'isolation. Ainsi, l'approximation linéaire ou même à l'aide d'un modèle plan rectangulaire, adaptée par la majorité des travaux antérieurs, n'est valable que pour des valeurs faibles de la résistivité superficielle.

La tension critique du modèle rectangulaire demeure supérieure à celle calculée pour un modèle ouvert surtout pour les grandes valeurs de la résistivité superficielle.

L'utilisation du logiciel comsol a permis d'estimer avec une grande précision la résistance de la couche de pollution en tenant compte de la géométrie de l'isolateur et aussi à la constriction du courant à la tête de l'arc électrique. Ces résultats sont impossibles à avoir avec les méthodes analytiques classiques.

Il est donc très économique d'utiliser la méthode des éléments finis dans différents domaines et en particulier dans le domaine de la pollution des isolateurs. En effet, les essais sont non seulement très coûteux mais aussi très longs à réaliser. La méthode des éléments finis permettent de diminuer le travail expérimental en faisant une prédiction des valeurs de la caractéristique, d'où un gain de temps considérable.



Bibliographie

- [1] **Adel ABIMOULOUD**, « *Comportement d'une Surface Isolante Partiellement Polluée sous tension Alternative 50Hz* » thèse de magister en Génie Electrique, Ecole Nationale Polytechnique Alger Décembre 1999.
- [2] **Cours d'A.Tilamtine** « *cours techniques de la haute tension* », université DJILLALI LIABES.
- [3] **M.Terkmani, M .Bouamer**, "*Contournement des isolateurs des lignes de haut tension*", PFE, USTO, Juin 2005.
- [4] **Mlle SATTA Samia**, « *contribution a l'étude de l'influence de la pollution discontinue sur le comportement des isolateurs : expérimentation et simulation* », thèse de magister en Génie Electrique, Faculté de technologie, Université Ferhat Abbas- Stif
- [5] **D.Dumora**, "*Matériaux isolant céramique en électrotechnique*", Technique de l'ingénieur D275.
- [6] **F.Amidi, K.Ouerdane**, "*Les effets de la pollution sur les ouvrages électriques à 30 kV en régions littorales* ", Projet de fin d'Etude, Département d'électrotechnique, Université des Sciences et Technologies Houari Boumediene, Bab Ezzouar, juin 1998.
- [7] **L.Arrabiy**, "*Visualisation et Traitement de Signal de Courant de Fuite sur une Surface Isolante Polluée*" PFE, Département de Génie Electrique, Ecole Nationale Polytechnique d'Alger (E.N.P), 1999
- [8] **BOUDJAMAA Med Abdelhakim, SEBTI Redaoun**, « *modélisation des phénomènes de pollution des isolateurs d'haute tension* », thèse de master en Génie Electrique, Département de Génie Electrique, Université Kasdi Merbah–Ouargla, 2012
- [9] **BELHOUCHE Khaled**, « *Estimation des paramètres de l'arc de contournement des isolateurs pollués en utilisant l'approche génétique* », thèse de magister en Génie Electrique, Faculté de technologie, Université Ferhat Abbas- Stif,
- [10] **Hervé Oudin**, « *Introduction à la méthode des éléments finis* » version 3
- [11] **Spécification technique one st n° c64 – I64 isolateurs en verre**, Office national de l'électricité, Maroc édition décembre 2003
- [12] **COMSOL Multiphysics User's Guide**, version 3.5a, [logiciel], Burlington, Ma. : COMSOL, Inc., novembre 2008.

- [13] **Nisrine Mhaguen**, « *Développement de modèles dynamiques de prédiction de la tension critique de contournement des isolateurs recouverts de glace basés sur la méthode des éléments finis* », thèse de ingénierie, Université de Québec à Chicoutimi, 2011

Résumé

Ce travail s'est intéressé à l'étude de l'influence la pollution sur les performances des isolateurs en porcelaine, Pour ce faire, utilisant le logiciel de la méthode des éléments finis (COMSOL) ; à la simulation, nous avons effectué une série d'essais sur un isolateur en porcelaine U120 et leur équivalent rectangulaire pour la comparaison entre eux. Puis en nous avons déterminé la résistance et la distribution du l'arc électrique sur le long d'isolateur U120 pollue.

Nous avons montré et discuter, à travers ce mémoire, les résultats obtenus de cette investigation.

Mots clé :

pollution, isolateurs en porcelaine, pollution, méthode des éléments finis, COMSOL, simulation, comparaison, résistance, équivalent, distribution, arc électrique.

Abstract

The aim of this work is to study and analyze the effect pollution on porcelain insulators. For this purpose. For that we use finite element method via logceil COMOSL Multyphysics; a set of experimental tests on porcelain insulator U120 and on his rectangular equivalent for set deference between themes. We have determined the resistance and the distribution of the electrical arc along insulator under the pollution conditions. Obtained results were presented and discussed.

Key words:

Pollution, insulator, finite element method, COMSOL, porcelain insulator U120, resistance, equivalent, distribution, electrical arc.