



République Algérienne Démocratique et Populaire

Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la
Recherche Scientifique

Université El-wancharissi de Tissemsilt

Faculté des Sciences et de la Technologie

Département de Sciences et de la Technologie



Mémoire de fin d'études pour l'obtention du diplôme de Master
académique en

Filière : **Electronique**

Spécialité : **Instrumentation**

Présentée par : **NOUAOUR ABDERRAHMEN**

BENANI ABDERRAHMANE

Thème

***Simulation et optimisation de la distribution du
champ électrique le long des isolateurs
composites sous différentes conditions de
pollution.***

Soutenu le, ...06/07/2021.....

Devant le Jury :

HABEL Elhadj Président M.C.B. Univ-Tissemsilt

MARICH Mohamed Encadreur M.C.B. Univ-Tissemsilt

MEHARRAR Aoued Examineur M.C.A. Univ-Tissemsilt

Année universitaire : 2020-2021

بِسْمِ اللَّهِ الرَّحْمَنِ الرَّحِيمِ

إهداء

الحمد لله وكفى والصلاة والسلام على الحبيب المصطفى وأهله

ومن اقتدى أما بعد:

الحمد والشكر لله الذي وفقنا لثمين هذه الخطوة في مشوارنا

الدراسي بمذكرتنا هذه ثمرة الجهد والنجاح بفضلته تعالى مهداة

إلى الوالدين الكريمين حفظهما الله وأدامهما.

ولكل العائلة التي ساندتني ولا تزال وإلى جميع رفقاء المشوار

العلمي وجميع الأساتذة لتخصص ماستر إلكترونيك.

جامعة أحمد بن يحيى الونشريسي تيسمسيلت

كلية العلوم والتكنولوجيا

بناني عبد الرحمن

إهداء

الحمد لله وكفى والصلاة والسلام على النبي المصطفى وأهله ومن
وفي أما بعد:

الحمد لله الذي يسر لنا طريق العلم ووفقنا بفضلته لتتمين هذه
المذكرة التي اهديتها إلى روح والدي رحمه الله وإلى والدتي
أدامها الله تاجا فوق رؤوسنا.

وإلى كل العائلة وجميع الأصدقاء والأصحاب الذين ساندوني في
هذه الطريق وإلى أساتذة تخصص ماستر إلكترونيك.

جامعة أحمد بن يحيى الونشريسي تيسمسيلت

كلية العلوم والتكنولوجيا

نواور عبد الرحمن

Remerciements

*M*es remerciements Avant tout, louange à «ALLAH»
qui nous a donné la force, le courage et la patience
de mettre ce modeste travail.

*Nous tiens, avant tout, à exprimer notre profonde gratitude à notre
encadreur Monsieur MARICH Mohamed, qui a été à l'origine de ce
travail, pour sa confiance qu'il nous a témoignée,
ainsi que ses conseils précieux et ses encouragements qui nous ont
beaucoup aidés à mener à bien la réalisation de ces travaux. Qu'ils
trouvent ici notre profonde reconnaissance.*

*Nos remerciements vont aussi à tous les enseignants qui ont contribué à
notre formation Par ailleurs, Nos remerciements à tous les membres du
jury qui ont accepté de juger notre travail.*

*En fin, nous tenons à exprimer notre reconnaissance à tous nos amis et
collègues pour le soutien moral.*

*Que toutes les personnes qui ont contribué de près ou de loin à
l'aboutissement de ce travail soient assurées de mes plus sincères
remerciements.*

Résumé

Les isolateurs représentent relativement un faible pourcentage dans le prix des lignes aériennes, mais constituent un élément essentiel dans le bon fonctionnement de ces lignes.

Leur rôle est d'assurer l'isolement électrique entre les parties portées à la HT ou entre les parties HT et les parties mises à la terre. La pollution et le endommagement des isolateurs constituent des facteurs de plus importances 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 augmente le champ électrique et augmente la conductivité du surface et provoque le phénomène de contournement peut alors survenir alors endommagement des isolateurs.

Notre travail a porté sur l'étude la répartition de potentiel et de champ électrique autour d'un isolateur de haute tension de silicone(SIR.11KV) pour l'optimisation de profile géométrique de l'isolateur.

Pour ce faire, nous avons utilisé deux méthodes :

- La méthode des éléments finis (COMSOL Mutliphysics) : pour simuler en 2D la répartition du potentiel et du champ électrique, le long de la ligne de fuite d'isolateur de type (SIR.11KV) dans le cas propre sous tension alternative 11KV/50Hz.
- La méthode de réseau de neurone artificiel : pour la prédiction de la valeur de champ maximal autour de l'isolateur (SIR.11KV) pour l'optimisation de profile géométrique de ce isolateur.

Abstract

Insulators represent a relatively small proportion of the electrical grid, but they are an essential element in the proper functioning of these lines. Its role is to ensure electrical insulation between high voltage line and parts grounded. Pollution and damage to insulators are the most important factors in quality and reliability in energy transfer. In the case of rain or misty weather, the sediment that causes pollution on the insulating surfaces greatly and the electric field increase also the conductivity of the surface and can occur by flashover can then occur while the insulators are damaged.

Our work focused on the study of the distribution of potential and electric field around a high voltage silicone insulator (SIR.11KV) for the optimization of the geometric profile of the insulator.

To do this, we used two methods:

- The finite element method (COMSOL Mutliphysics): to simulate in 2D the distribution of the potential and the electric field, along the type insulator creepage line (SIR.11KV) in both clean cases under alternating voltage (11.KV/50Hz).
- The artificial neuron network method: for the prediction of the maximum field value around the isolator (SIR.11KVV) for the optimization of the geometric profile of this isolator.

ملخص:

- تمثل العوازل نسبة صغيرة من القيمة المادية في خطوط الشبكة الكهربائية, ولكنها تشكل عنصراً أساسياً في الأداء السليم لهذه الخطوط. يتمثل دورها في ضمان العزل الكهربائي بين خط التوتر العالي والعمود الكهربائي أو الأرض.

يعد التلوث والأضرار التي تلحق بالعوازل من العوامل المؤثرة في جودة وكفاءة نقل الطاقة، وفي حالة الطقس الممطر أو الضبابي فإن طبقة التلوث تترسب على الأسطح العازلة مما يؤدي إلى زيادة ناقلية السطح وارتفاع الحقل الكهربائي مما يمكن أن يؤدي إلى حدوث ظاهرة الالتفاف الكهربائي وهذا يؤدي إلى تلف العوازل.

يقوم عملنا على دراسة توزيع الجهد والمجال الكهربائي حول عازل السيليكون عالي الجهد (SIR.11KV) لتحسين الشكل الهندسي للعازل.

للقيام بذلك ، استخدمنا طريقتين:

• طريقة العناصر المحدودة (COMSOL Mutliphysics) : للمحاكاة ثنائية الأبعاد لتوزيع الجهد والمجال الكهربائي ، على طول خط السطح الخارجي للعازل (SIR.11KV) وذلك في الحالة النظيفة تحت الجهد المتناوب 50 هرتز.

• طريقة شبكة الخلايا العصبية الاصطناعية: للتنبؤ بأقصى قيمة للحقل حول العازل (SIR.11KV) وذلك لتحسين الشكل الهندسي لهذا العازل.

Sommaire

Sommaire

Résumé.....	6
Liste des abréviations et des symboles	12
Liste de Figure	13
Liste de Tableau.....	15
Introduction générale.....	17
Chapitre I : Généralités sur les isolateurs haute tension, pollution et phénomène de contournement des isolateurs pollués	20
I.1 Introduction	20
I.2 Isolateur de haute tension	20
I.2.1 Définition :.....	20
I.2.2 Le Rôle :.....	20
I.2.3 Constitution de l'isolateur et son fonctionnement :	21
I.2.4 Caractéristiques d'un isolateur :	21
I.2.5 Principaux types d'isolateurs :.....	22
I.2.6 Profil de l'isolateur :	24
I.2.7 Matériaux isolants utilisés pour la fabrication des isolateurs :.....	26
I.2.8 Choix des isolateurs.....	30
I.3 Pollution des isolateurs	31
I.3.1 Définition.....	31
I.3.2 Source de pollution	32
I.3.3 Influence des facteurs climatiques sur des dépôts polluants	33
I.3.4 Conséquences de la pollution	34
I.3.5 Techniques de lutte contre la pollution	35
I.4 Phénomène de contournement des isolateurs pollués	38
I.4.1 Contournement.....	38
I.4.2 Définition.....	38
I.4.3 Ligne de contournement.....	38
I.4.4 Déroulement du contournement.....	38
I.4.5 Facteur de forme d'un isolateur.....	41
I.5 Conclusion :	42
Chapitre II : Technique d'intelligence artificielle {Réseaux de neurones artificiels}	44
II.1 Introduction	44
II.2 Structure d'un neurone :.....	44

II.2.1	Neurone Biologique	44
II.2.2	Neurone Formel (artificiel).....	45
II.3	Définition de Réseaux de neurones artificiels:.....	48
II.4	Architecture des réseaux de neurones artificiels.....	49
II.4.1	Réseaux statiques.....	50
II.4.2	Réseaux dynamiques.....	50
II.4.3	Réseaux à architecture évolutive ou auto-organisée.....	50
II.5	Fonction de Combinaison.....	51
II.6	Propriétés des réseaux de neurones.....	51
II.7	Topologies	51
II.8	Différentes types de réseaux de neurones artificiels.....	52
II.8.1	Les réseaux proactifs	53
II.8.2	Réseaux récurrents.....	54
II.9	L'apprentissage de réseaux de neurones.....	55
II.9.1	Apprentissage supervisé (supervised learning).....	56
II.9.2	Apprentissage non supervisé (unsupervised learning)	57
II.9.3	Mode par renforcement.....	57
II.10	Modèles des réseaux de neurones et leurs apprentissages	57
II.10.1	Le réseau perceptron	58
II.10.2	Le modèle de Hopfield	58
II.10.3	Le Réseau multicouches	58
II.11	Méthode de la rétro propagation du gradient (RPG).....	59
II.11.1	Principe.....	59
II.11.2	Algorithme.....	60
II.12	Les étapes de la conception d'un réseau de neurone.	62
II.12.1	Choix des échantillons.....	62
II.12.2	Elaboration de la structure du réseau.....	62
II.13	Avantages des réseaux de neurones artificiels.	63
II.14	Programmation de réseau neurone artificiel en logiciel MATLAB.....	63
II.14.1	Définition de l'Optimisation :	63
II.14.2	Méthodologie et mise en œuvre.	63
II.14.3	Langage de programmation utilisé	64
II.15	Conclusion.	65
Chapitre III : Présentation de la méthode des éléments finis "Logiciel COMSOL" ..		67
III.1	Introduction.	67

III.2	La méthode des éléments Finis (M.E.F).	67
III.2.1	Définition.....	67
III.2.2	Principe.....	67
III.2.3	Etapas de la méthode des éléments finis.	69
III.2.4	Discrétisation géométrique.....	70
III.2.5	Avantages de la M.E.F :	71
III.2.6	Inconvénients de la M.E.F :	71
III.2.7	Utilisation d'un logiciel pour la méthode des éléments finis.....	72
III.3	Description du logiciel « COMSOL Multyphysics ».....	72
III.3.1	Méthodologie de conception avec COMSOL Multiphysics.	73
III.3.2	L'interface graphique de COMSOL :	73
III.4	Conclusion.	78
CHAPITRE IV: Calcul et optimisation de la répartition du potentiel et du champ électrique le long d'un isolateur(SIR.11KV)		80
IV.1	PARTIE I : Calcul la distribution de potentiel et du champ électrique autour d'un isolateur silicone par la méthode des éléments finis pour différents paramètres géométriques.....	80
IV.1.1	Simulation du modèle réel par COMSOL.....	80
IV.1.2	Modèle de l'isolateur étudié	80
IV.1.3	Identification des domaines de l'isolateur	81
IV.1.4	Conditions aux limites	81
IV.1.5	Maillage des domaines :.....	81
IV.1.6	Différentes modifications des paramètres géométriques étudiés :	82
IV.2	PARTIE II : Optimisation du profil des isolateurs silicones par la technique des réseaux de neurones artificiels.....	90
IV.2.1	Procédure de la modélisation neuronale.....	90
IV.2.2	Modèle de réseaux de neurones.....	92
IV.2.3	Visualisation des résultats et analyse	94
IV.3	Conclusion	98
Conclusion générale :		101
Bibliographie		103

Liste des abréviations et des symboles

2D	Deux dimensions
P	Le pas
Lf	La ligne de fuite
Lc	La ligne de contournement
MLP	Multi-layer perceptron
RNA	Réseau de neurones artificiel
HT	Haute tension
MEF	La méthode des Eléments Finis
R	Rotule
RBF	<i>Radial Basis Fonction</i>
IA	<i>Intelligence artificiel</i>

Liste de Figure

Chapitre I : Généralités sur les isolateurs haute tension, pollution et phénomène de contournement des isolateurs pollués

Figure I.1: Les caractéristiques d'un isolateur.	22
Figure I.2: Isolateur rigide.....	23
Figure I.3: Assemblage à rotule.	23
Figure I.4: Isolateur capot tige.....	24
Figure I.5: Isolateur à long fût.....	24
Figure I.6: Profil standard (6).....	25
Figure I.7: Profil antibrouillard (forme A) (6).....	25
Figure I.8: Profil antibrouillard (forme B) (6).....	26
Figure I.9: Profil sphérique (6).....	26
Figure I.10: Profil plat (6).....	26
Figure I.11: Comportement d'une surface hydrophile et hydrophobe (12).....	29
Figure I.12: Hydrophobicité d'une surface en silicone (9).....	30
Figure I.13: Assemblage à rotule.	31
Figure I.14: Sources de pollution (13).	33
Figure I.15: Décharge électrique (contournement).....	35
Figure I.16: Techniques de lutte contre la pollution (13).....	37
Figure I.17: Déroulement du contournement (6).	39
Figure I.18: dépôt et évolution de l'agent polluant.	39
Figure I.19: Humidification du dépôt polluant et création d'un courant de fuite.	40
Figure I.20: Arc et bande sèche.....	40
Figure I.21: Régime d'arcs sous pollution.....	41

Chapitre II : Technique d'intelligence artificiel {Réseau de neurone artificiel}

Figure II.1: Structure d'un neurone biologique.....	44
Figure II.2: Neurone Formel.	45
Figure II. 3: Fonction Heaviside.....	46
Figure II. 4: Fonction Signe :	47
Figure II. 5: Fonction Linéaire.	47
Figure II. 6: Fonction Linéaire à seuil.....	48
Figure II. 7: Fonction sigmoïde.....	48
Figure II. 8: Disposition en couche des neurones du réseau.....	49
Figure II. 9: Réseau statique.....	50
Figure II. 10: Réseau dynamique.	50
Figure II. 11: Topologies des Réseaux de Neurones Artificiels (24).....	52
Figure II. 12: Réseau proactif monocouche (Perceptron).....	53
Figure II. 13: Réseau proactif complètement connecté avec une seule couche cachée.	54
Figure II. 14: Réseau récurrent avec neurones cachés.....	55
Figure II. 15: Un exemple d'un apprentissage.....	56
Figure II. 16: Principe de l'apprentissage supervisé.....	57
Figure II. 17: Apprentissage non supervisé.....	57
Figure II. 18: Réseaux Neurones à une couche (perceptron).....	58
Figure II. 19: Réseau de Hopfield.	58
Figure II. 20: Structure générale d'un RN multicouche.	59

Figure II. 21:Exemple de réseau MLP à une couche cachée avec 5 entrées, 3 neurones dans la couche cachée, et 4 sorties.....	60
Figure II. 22:Méthodologie de développement du Réseau de neurones artificiels (RNA).....	64

Chapitre III : La méthode des éléments finies "Logiciel COMSOL"

Figure III.1 : Diagramme de différentes étapes de résolution dans Comsol.....	70
Figure III.2:Erreur de discrétisation géométrique.....	70
Figure III.3:Diagramme de différentes étapes de résolution dans COMSOL (39).	73
Figure III.4:Fenêtre de select space.....	74
Figure III.5:Fenêtre de « SELECT SPCAE ».....	74
Figure III.6: Fenêtre de « ADD PHYSICS(MODEL) ».....	75
Figure III.7: Fenêtre "SELECT STUDY TYPE".....	75
Figure III.8:Géomètre exemple de l'équivalent de l'isolateur.....	76
Figure III.9:Matériel exemple de l'équivalent de l'isolateur.....	76
Figure III.10:détermination de physiques.....	77
Figure III.11:Le maillage.....	77
Figure III.12:Résultats de simulation.....	78

CHAPITRE IV: Calcul et optimisation de la répartition du potentiel et du champ électrique le long d'un isolateur (SIR.11KV)

Figure IV.1:Géométrie et caractéristiques dimensionnelles de l'isolateur en silicone (SIR.11KV).....	80
Figure IV.2:Différentes domaines de l'isolateur (SIR.11KV).....	81
Figure IV.3: Maillage de l'isolateur (SIR.11KV).....	82
Figure IV.4: Différentes modifications géométriques étudiés.....	83
Figure IV.5:distribution de potentiel et de champ électrique autour de l'isolateur(SIR.11KV)....	84
Figure IV.6: Influence de rayon de cœur sur le potentiel et le champ électrique.....	85
Figure IV.7: Influence de rayon des ailettes (disque) sur le potentiel et le champ électrique.	86
Figure IV.8: Influence du rayon des congés de raccordement (inclinaison) sur le potentiel et le champ électrique.....	88
Figure IV.9: Influence de la distance entre l'extrémité métallique et l'ailette sur le potentiel et le champ électrique.....	89
Figure IV: 10: La structure du RNA adoptée.....	94
Figure IV.11:Comparaison des champs électrique calculées par COMSOL et celles données par le modèle de réseau neurone pour l'apprentissage.....	96
Figure IV.12: Evolution de l'erreur en fonction des indices des données d'isolateur.....	96
Figure IV.13: Evolution des différentes erreurs en fonction de nombre d'itération.....	97
Figure IV.14: Courbe de régression de champ électrique calculé par MEF avec le RNA.....	97
Figure IV.15: Comparaison des champs électrique calculées par COMSOL et celles données par le modèle de réseau neurone pour la validation.....	98

Liste de Tableau

Chapitre II : Technique d'intelligence artificiel {Réseau de neurone artificiel}

Tableau II.1: Analogie entre le neurone Biologie et le neurone Formel..... 46

CHAPITRE IV: Calcul et optimisation de la répartition du potentiel et du champ électrique le long d'un isolateur (SIR.11KV)

Tableau IV.1: propriétés électriques des matériaux..... 81

Tableau IV.2: base de données (données d'apprentissage /données de validation) 93

INTRODUCTION

GENERALE

Introduction générale

La production, le transport et la distribution de l'énergie électrique forment la colonne vertébrale de l'économie d'un état industriel moderne. Avec la progression de l'industrialisation, naissent des exigences de plus en plus élevées concernant la mise à disposition de cette énergie. Pour des raisons économiques, le transport et la distribution de l'énergie électrique s'effectuent généralement par des lignes aériennes. Leur fiabilité dépend donc considérablement du comportement mécanique, électrique et diélectrique des différents composants de ces lignes. Parmi ces composants, on note le rôle primordial que jouent les isolateurs. Leur choix est donc de la plus haute importance.

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, SIR.11KV) et des pièces métalliques ou en fibre de verre qui servent de liaison scellée sur le diélectrique.

Les isolateurs sont soumis à différentes contraintes environnementales, dont la plus importante est la pollution. Cette pollution peut avoir plusieurs origines industrielle, marine, désertique et peut être mixte. Une connaissance approfondie de la distribution du potentiel et du champ électrique le long des isolateurs, recouverts de couches polluantes, permettrait de déterminer les valeurs critiques de potentiel et de champ électrique donnant naissance à ces arcs partiels.

En effet, une perturbation de l'isolation électrique assurée par l'isolateur peut entraîner, dans certaines circonstances, son contournement et donc un risque majeur sur la fiabilité et le fonctionnement du système de transmission de l'énergie électrique par voies aériennes. Plusieurs causes sont à l'origine de contournement électrique comme les surtensions transitoires sur les réseaux électriques (foudres, enclenchement et ouvertures des lignes, les dépôts de pollution atmosphérique ou encore dans les régions froides, les précipitations atmosphériques givrantes). Les contournements électriques des isolateurs entraînent des répercussions graves sur les réseaux aériens de distribution de l'énergie électrique, car ils sont la cause de coupures électriques de durée plus ou moins longues. Depuis une cinquantaine d'années, plusieurs travaux ont été menés pour comprendre les mécanismes conduisant au

contournement des isolateurs pollués et se prémunir d'outils permettant la prédiction de ce phénomène.

Le présent travail porte sur l'étude de la répartition de potentiel et du champ électrique le long d'un isolateur composite (11KV) et la prédiction de la valeur de champ maximal autour de cet isolateur. Notre travail comporte quatre chapitres.

Dans le premier chapitre, nous allons parler sur les différents types d'isolateurs de haute tension utilisés dans le transport aérien d'énergie électrique et leurs utilisations et applications, la pollution et le phénomène de contournement.

Nous présenterons dans le deuxième chapitre, une généralité sur les réseaux de neurones artificiels (RNA), et leurs applications dans le domaine génie électrique.

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

Le dernier chapitre est consacré en premier temps, à la simulation de la répartition du potentiel et du champ électrique le long de la ligne de fuite d'isolateur (11KV) dans le cas propre en utilisant la méthode des éléments finis, en second temps, on applique la technique de RNA pour la prédiction de la valeur maximale du champ électrique le long de l'isolateur.

CHAPITRE I

*Généralités sur : les isolateurs haute tension ,
pollution et phénomène de contournement
des isolateurs pollués*

Chapitre I : Généralités sur les isolateurs haute tension, pollution et phénomène de contournement des isolateurs pollués

1.1 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. (1)

1.2 Isolateur de haute tension

1.2.1 Définition :

L'isolateur est un composant électrotechnique 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-circuits, les pertes de courant et les charges d'électrocution.

1.2.2 Le Rôle :

Les isolateurs des lignes aériennes ont deux fonctions principales :

- **Rôle électrique :** ils permettent d'isoler électriquement les lignes de transport d'énergie électrique des pylônes mis à la terre.
- **Rôle mécanique :** qui consiste à soutenir ces mêmes lignes et donc résister aux différentes contraintes mécaniques dues surtout au poids de la ligne, son mouvement en présence de vent. (2)

1.2.3 Constitution de l'isolateur et son fonctionnement :

Les isolateurs sont des composants indispensables au transport et à la distribution de l'énergie électrique. Leur importance est reliée directement au fait de :

- Réaliser une liaison mécanique entre des conducteurs portés à des potentiels différents accrochés aux pylônes des lignes aériennes.
- Maintenir les conducteurs dans la position spécifiée (isolateurs d'alignement et d'ancrage).
- Assurer la transition entre l'isolation interne (huile, SF6) et l'isolation externe (air atmosphérique).
- Raccorder les matériels électriques au réseau (traversées de transformateur, extrémités de câbles).
- Jouer le rôle d'une enveloppe de certains appareils (disjoncteurs, parafoudres, réducteurs de mesure).

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 deux électrodes dont l'intervalle comporte trois zones formant ainsi trois isolants en parallèle ayant des comportements différents. Ces trois zones sont les suivantes :

- 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). (3)

1.2.4 Caractéristiques d'un isolateur :

Le pas P: C'est la distance séparant deux parties homologues de deux isolateurs consécutifs dans une chaîne. La détermination de ce paramètre nous permet donc de connaître la longueur d'une chaîne ayant un nombre donné d'isolateurs.

La ligne de fuite L_f : C'est la plus courte distance, suivant les contours de la surface extérieure des parties isolantes, mesurée entre les parties métalliques.

La ligne de contournement L_c : C'est la distance la plus courte dans l'air entre deux parties conductrices.

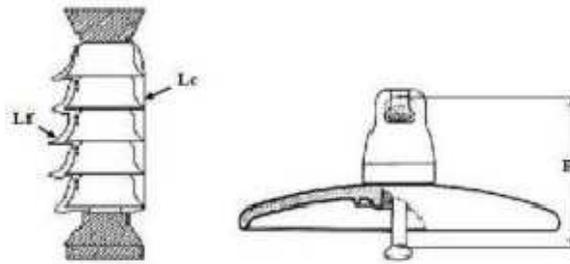


Figure I.1: Les caractéristiques d'un isolateur.

1.2.5 Principaux types d'isolateurs :

1.2.5.1 Isolateurs de type rigide :

Ce type d'isolateur permet d'obtenir une liaison rigide entre le support et le câble. Il est constitué d'une ou de plusieurs pièces isolantes encastrées et scellées les unes dans les autres.

Ces isolateurs sont fixés au pylône par des ferrures de forme diverses. Ils sont principalement utilisés dans les lignes aériennes pour des tensions ne dépassant pas généralement 60 kV. Les isolateurs rigides peuvent être placés en position horizontale, verticale ou oblique.

Il existe deux types principaux d'isolateurs rigides : les isolateurs rigides à tige et les isolateurs rigides à socle :

- **Isolateur rigide à socle** : Isolateur rigide qui comporte une ou plusieurs pièces en céramique ou en matériau synthétique, assemblées de façon permanente sur un socle métallique, et qui est destiné à être monté sur un support au moyen d'une tige centrale ou de boulons solidaires du socle.
- **Isolateur rigide à tige** : Isolateur rigide qui comporte une ou plusieurs pièces en céramique en forme de cloche, assemblées de façon permanente, et qui est destiné à être monté sur un support au moyen d'une tige à visser à l'intérieur de l'isolateur.



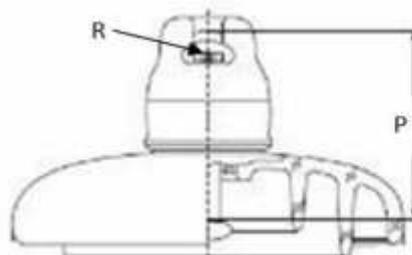
Figure I.2: Isolateur rigide.

1.2.5.2 Isolateurs suspendus ou éléments de chaîne :

Ils sont constitués par le matériau isolant et d'une pièce métallique qui sert à réaliser la liaison entre deux isolateurs et à donner une certaine flexibilité à la chaîne d'isolateurs. La chaîne d'isolateurs est montée sur le pylône en suspension soit verticalement (chaîne d'alignement), soit d'une façon horizontale (chaîne d'ancrage). (4)

Il existe deux types principaux d'éléments de chaîne :

- les isolateurs à long fût.
- les isolateurs à capot et tige.



R : Rotule
P : Pas

Figure I.3: Assemblage à rotule.

1.2.5.2.1 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. (5)

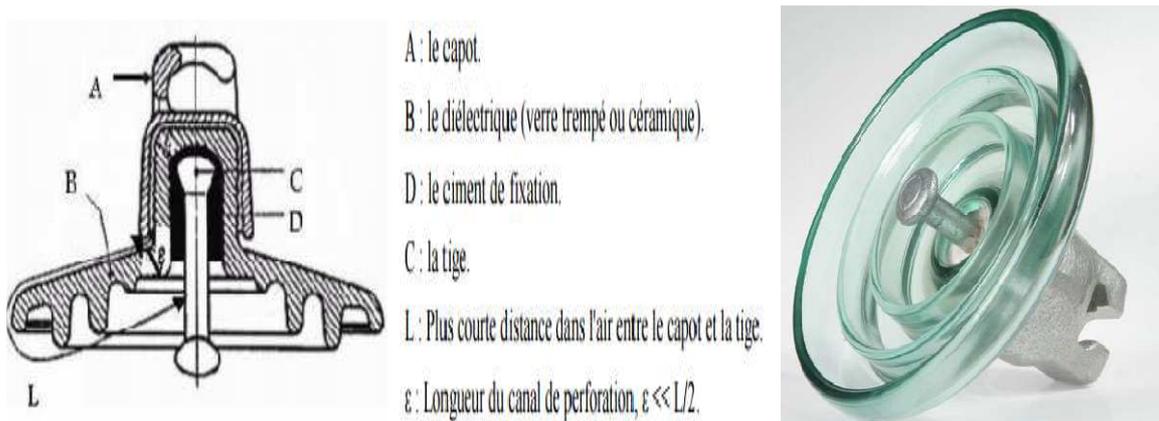


Figure I.4: Isolateur capot tige.

1.2.5.2.2 Isolateur à long fût :

Il est constitué d'un cylindre plein en céramique, en porcelaine ou en matériaux Synthétiques, muni d'ailettes. 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.

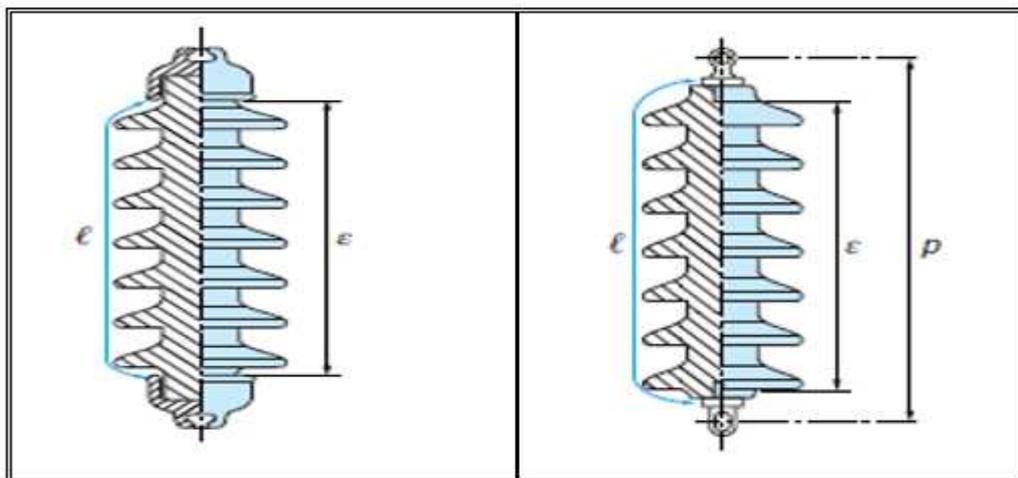


Figure I.5: Isolateur à long fût.

1.2.6 Profil de l'isolateur :

Pour assurer sa fonction, le profil de l'isolateur doit satisfaire les conditions suivantes:

1. Une longueur de fuite maximale
2. Un nombre optimum de nervures (pour une taille donnée de l'isolateur) qui permet d'avoir une tension de contournement plus élevée.
3. Une géométrie de l'isolateur permettant le nettoyage naturel de l'isolateur par le vent ou par la pluie (6).

4. Des diamètres de l'isolateur différents assurant une contamination non-uniforme et donc des tensions de contournement plus élevées.

➤ Dans la pratique on distingue différents types de profils

a) Profil standard

La faible profondeur, l'espacement entre les anneaux et la ligne de fuite moyenne permet l'utilisation de ce profil dans une zone de pollution modère.



Figure I.6:Profil standard (6).

b) Profil antibrouillard (forme A)

Il est de conception avec un diamètre plus grand que le type de profil standard muni de deux ou trois rainures à grande profondeur..

Cette conception permet également un lavage manuel facile si c'est nécessaire et empêche le claquage entre rainures voisines quand il y a une pollution sévère et tout le profil intérieur simplifie la maintenance...



Figure I.7:Profil antibrouillard (forme A) (6).

c) Profil antibrouillard (forme B)

Dans cette conception, l'épaisseur de la rainure extérieure agit comme une barrière contre l'action du brouillard et le dépôt des sels minéraux sur la surface de l'isolateur, empêchant alors la formation d'un électrolyte conducteur sur la surface.

Ce type d'isolateur est efficace dans les zones côtières.



Figure I.8: Profil antibrouillard (forme B) (6).

d) Profil sphérique

La forme sphérique permet une longueur de fuite équivalente à celle d l'absence de rainures internes permet un lavage manuel facile et efficace.



Figure I.9: Profil sphérique (6).

e) Profil plat

L'élimination complète des rainures internes réduit grandement l'accumulation de pollution sur la surface basse, grâce au courant d'air.

Cette conception est particulièrement efficace dans les zones désertiques où l'auto lavage est peu fréquente par pluie...



Figure I.10: Profil plat (6).

1.2.7 Matériaux isolants utilisés pour la fabrication des isolateurs :

Un isolateur est constitué en général de deux parties : une partie isolante et des pièces métalliques de liaison, scellées sur cette partie isolante.

1.2.7.1 Partie isolante

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 poids des isolateurs et la difficulté de détection des amorçages.

Ces dernières années, on s'intéresse de plus en plus à l'utilisation des isolateurs en matériaux polymères. (7)

1.2.7.1.1 Céramique

Le développement de la fabrication des céramiques date depuis longtemps à cause de leurs performances. Pour les isolateurs qui vont être utilisés dans des lieux où il y a des contraintes mécaniques très importantes, on utilise de préférence des céramiques à grains très fins. Souvent on trouve la céramique dans les postes: isolateurs supports, couverture isolante des sectionneurs, des disjoncteurs, des transformateurs de potentiel, des bornes de traversées des transformateurs de puissance. (8)

1.2.7.1.2 Verre

En Algérie, les isolateurs utilisés dans les lignes de moyenne et 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. (7)

➤ le verre trempé

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

➤ 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 faibles et c'est pour cette raison qu'il n'est pas utilisé pour la fabrication des isolateurs de suspension.

1.2.7.1.3 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.

Ils ont de bonnes propriétés hydrophobes et peuvent être utilisés dans des conditions de pollution très sévères. (8)

L'inconvénient de ces isolateurs est le vieillissement sous l'effet des différentes contraintes auxquelles ils sont soumis (électriques, mécanique, atmosphériques...).

1.2.7.1.4 Silicone

Le silicone est une substance synthétique à base de silicium et d'oxygène formant une classe particulière de plastique. Les silicones, ou poly-siloxanes, sont des polymères inorganiques formés d'une chaîne silicium oxygène (...-Si-O-Si-O-Si-O- ...) sur laquelle des groupes se fixent sur les atomes de silicium. Certains groupes organiques peuvent être utilisés pour relier entre elles plusieurs de ces chaînes Si-O. le type le plus courant est le poly-diméthylsiloxane linéaire ou PDMS. Le silicium étant présent en proportion suffisante pour affecter les propriétés du produit de façon sensible. Les silicones sont des excellents isolants pour les applications haute et moyenne tension en raison de leur structure moléculaire. Par exemple, les isolateurs en silicone recouverts d'une couche de pollution présentent une résistance aux courants de cheminement plus élevée que les modèles en porcelaine, en verre ou en EPDM. Les décharges électriques sont évitées même dans des conditions de pollution extrêmes. Mais leurs avantages ne se limitent pas aux isolateurs. Aujourd'hui, on utilise les silicones isolants dans toutes les applications MT et HT exigeant une haute sécurité de fonctionnement et une grande longévité, par exemple. dans les transformateurs, sous forme d'huile, ou dans les extrémités de câbles haute tension. (9)

a) Propriétés du silicone

Les silicones se distinguent par quelques propriétés fondamentales : (10)

- Liaison Si-O 'forte' et grande inertie chimique.
- Bonne stabilité thermique (de - 80 à + 250 °C).
- Bonne stabilité chimique et tenue au vieillissement naturel.
- Propriétés modulables d'anti adhérence ou d'adhésion.
- Bonne tenue au feu sans dégagement de fumées toxiques.
- Isolation électrique.
- Bonne tenue aux UV par rapport aux autres polymères.

- Flexibilité à froid de la chaîne polymérique.
- Faible dépendance des propriétés mécaniques (viscosité,...).
- rigidité diélectrique 15 kV/mm.
- Permittivité relative à 25 °C et de 5,4.
- Facteur de dissipation diélectrique à 25 °C et 10 kHz ; $\text{tg } \delta = 4.10^{-3}$ à 5.10^{-3} .
- Conductivité thermique : 0,41 à 0,62 W/m.K.
- Température d'auto-inflammation est supérieure à 300 °C.
- Masse volumique de 2300 à 2800 kg/m³.

b) Grandes familles de silicones

Généralement on s'accorde à regrouper l'ensemble de ces produits en trois grandes familles: (11)

- les fluides
- les résines
- les élastomères

c) Propriété de la surface

La géométrie spécifique et la surface préférablement non mouillante (hydrophobe) de ces isolateurs composites (silicone) leur confèrent une fiabilité en service supérieure à celle des isolateurs conventionnels lorsqu'ils sont encrassés. Une « surface mouillante » est une surface sur laquelle l'eau a tendance s'étendre, les deux extrêmes de cette propriété sont représentés sur une surface hydrophile(a) et une surface hydrophobe(b). (12)

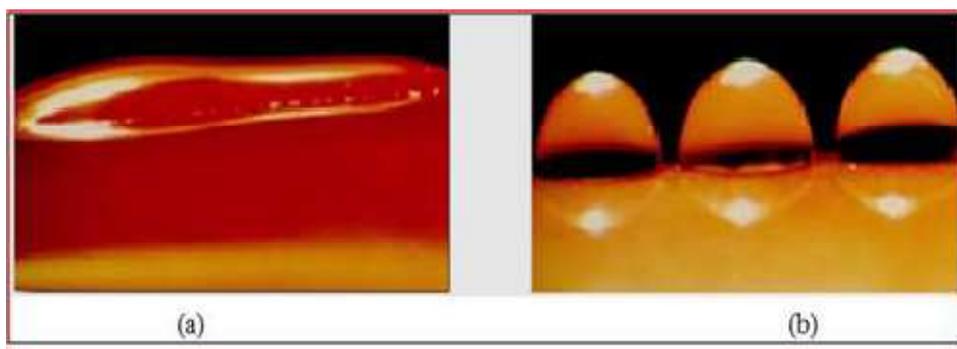


Figure I.11:Comportement d'une surface hydrophile et hydrophobe (12).

d) Hydrophobicité

Par rapport aux autres matériaux, les silicones se distinguent par un très haut pouvoir imperméabilisant à long terme, appelé hydrophobicité : l'eau ne pénètre pas dans les pièces d'isolation en élastomères silicones, mais perle à la surface même au bout de nombreuses années. Ils minimisent les courants de cheminement et évitent les

décharges dues au contournement électrique, même si la surface est fortement polluée, car ils transmettent leurs propriétés hydrophobes à la couche de dépôts par transfert d'hydrophobie.

L'application d'un revêtement silicone à posteriori sur les isolateurs en verre ou en porcelaine permet d'obtenir le même effet et supprime les opérations de nettoyage difficiles jusqu'à, présent nécessaires. (9)



Figure I.12: Hydrophobicité d'une surface en silicone (9).

e) Applications des élastomères silicones dans l'isolation électrique

Les caoutchoucs silicones sont utilisés pour l'isolation des conducteurs et des câbles. Ils servent à isoler divers composants haute tension (revêtement).

1.2.7.2 Pièces métalliques de liaison

Les parties isolantes constitutives de l'isolateur sont reliées entre elles ou au support par des pièces métalliques, réalisées par des métaux qui doivent répondre aux contraintes mécaniques et thermiques appliquées à l'isolateur au cours de son exploitation.

De la qualité du scellement et des différents assemblages dépendent, en grande partie la sécurité d'exploitation et la durée de vie de l'isolateur.

1.2.8 Choix des isolateurs

L'isolateur entre pour un pourcentage très modeste de l'ordre de 7%, dans le prix d'une ligne aérienne moyenne tension. Cependant, il est un élément essentiel dont dépendent la sécurité d'exploitation, la qualité et la continuité de service.

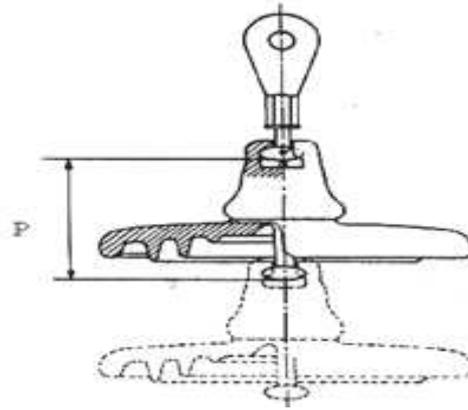


Figure I.13: Assemblage à rotule.

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. Le choix des isolateurs se fait en fonction de :

- La charge mécanique de rupture;
- La tension de tenue à fréquence industrielle à sec;
- La tension de tenue à fréquence industrielle sous pluie;
- La tension de tenue aux chocs de foudre;
- La tenue à la perforation;
- Le diamètre nominal de la partie isolante;
- Le pas nominal;
- La ligne de fuite nominale;
- Le poids approximatif.

1.3 Pollution des isolateurs

1.3.1 Définition

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 aux 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. (9)

Un isolateur placé à l'extérieur est exposé aux différents agents constituant l'atmosphère qui le contamine. Cette contamination d'un dépôt de pollution à sa surface. Son importance dépend de

- La géométrie et la position de l'isolateur ;
- Les conditions du milieu ;
- La durée d'exposition de l'isolateur.

1.3.2 Source de pollution

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

1.3.2.1 Pollution naturelle

La pollution naturelle provient :

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

1.3.2.2 Pollution marine

Ce type de pollution touche les installations électriques à proximité de la mer, constituées d'embruns marins qui se déposent sur la surface de l'isolateur et forment une couche de sels qui devient conductrice en présence de l'humidité. La particularité de cette pollution est qu'elle est exclusivement constituée de sels ioniques, notamment le NaCl, et de peu des matières insolubles. (10)

1.3.2.3 Pollution désertique

Ce genre de pollution est constitué par les particules de sable, terre, poussière, et est accentué surtout par les facteurs climatiques :

- Le vent en assurant le transport de ces particules arides et finit par les déposer sur l'isolateur en formant une couche qui recouvre toute la surface de l'isolateur.
- La température, par ses variations entre le jour et la nuit implique le phénomène de condensation donnant au dépôt une certaine conductivité. (11)

1.3.2.4 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.

1.3.2.5 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. (12)



a- Pollution marine	b- Pylône implante près du sol en l'argile (usine de briqueterie, Pollution désertique)
---------------------	---

Figure I.14: Sources de pollution (13).

1.3.3 Influence des facteurs climatiques sur des dépôts polluants

Parmi les facteurs climatiques et météorologiques essentiels on distingue: (14)

a) Le vent

Il constitue l'agent qui assure le transport des poussières et des sels marins ainsi que la distribution des dépôts polluants formes sur les surfaces des isolateurs.

D'autre part, il peut être considéré comme un agent d'auto nettoyage dans le cas où sa vitesse est grande.

b) La température

Pour les surfaces polluées, les hautes températures ont une influence positive, car elles séchent les dépôts et augmentent leur résistivité.

Cependant, la différence de température entre le jour et la nuit peut provoquer le phénomène de condensation et l'humidification de la couche de pollution.

c) L'humidité

Elle agit négativement sur la surface contaminée des isolateurs car elle engendre l'augmentation de la conductivité de la couche de pollution, surtout pendant les premières heures du matin, notamment pendant les périodes sèches.

d) La pluie

Les fines pluies humidifient les surfaces polluées, donc favorisent l'adhérence de pollution, ce qui augmente le risque de contournement. Cependant, les fortes pluies permettent le nettoyage des surfaces polluées.

1.3.4 Conséquences de la pollution

Lorsque l'isolateur est propre ou recouvert d'une couche de pollution sèche, un très faible courant capacitif circule à sa surface. Ceci est dû aux très faibles valeurs des conductivités volumiques de l'air, de l'isolant solide et de la couche de pollution.

On obtient ainsi une répartition électrostatique du potentiel électrique. Par contre, lorsque la couche de pollution est humidifiée, elle devient le siège d'un courant de conduction de valeur relativement importante et la répartition du potentiel électrique diffère de la répartition électrostatique.

La rupture diélectrique de l'air peut être atteinte entre deux points de la surface isolante entraînant l'amorçage d'un arc électrique qui court-circuite une partie de la ligne de fuite. Trois cas peuvent se présenter selon les contraintes auxquelles est soumis l'isolateur.

1.3.4.1 Arc non localisé

L'arc électrique s'éteint rapidement, puis se réamorçe aléatoirement à un autre endroit et ainsi de suite. Il y a apparition d'un courant de fuite intermittent entraînant une perte d'énergie relativement faible et généralement supportable par l'installation.

1.3.4.2 Arc permanent

L'arc électrique se fixe à la surface, soit en s'y maintenant (courant continu), soit en se réamorçant au même endroit (courant alternatif). Cet arc peut entraîner, par effet thermique, une dégradation du support isolant nécessitant le remplacement de l'élément défaillant. (5)

1.3.4.3 Contournement des isolateurs pollués (Court-circuit)

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. (1)

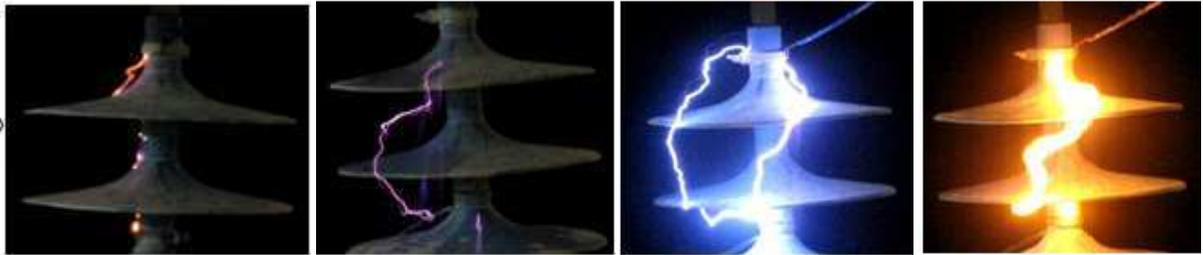


Figure I.15: Décharge électrique (contournement).

1.3.5 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. (15)

1.3.5.1 Allongement de la ligne de fuite

Cette méthode permet d'adapter le dimensionnement aux nouvelles conditions de pollution. On cite parmi les techniques utilisées : (16)

- 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.
- Prolonger de ligne de fuite par l'utilisation matériaux polymères, qui sont collés sur la surface des isolateurs existants.

1.3.5.2 Isolateurs sans nervures (plats) :

Ont la propriété d'accumuler moins de pollution que les isolateurs traditionnels et s'autonettoyant très bien sous l'effet du vent. (17)

1.3.5.3 Graissage périodique

Par mesure économique, seule les isolateurs de postes sont concernés. On utilise des graisses silicones. Grâce à ses propriétés hydrophobes, la graisse protège temporairement les isolateurs. (17)

1.3.5.4 Revêtement silicone

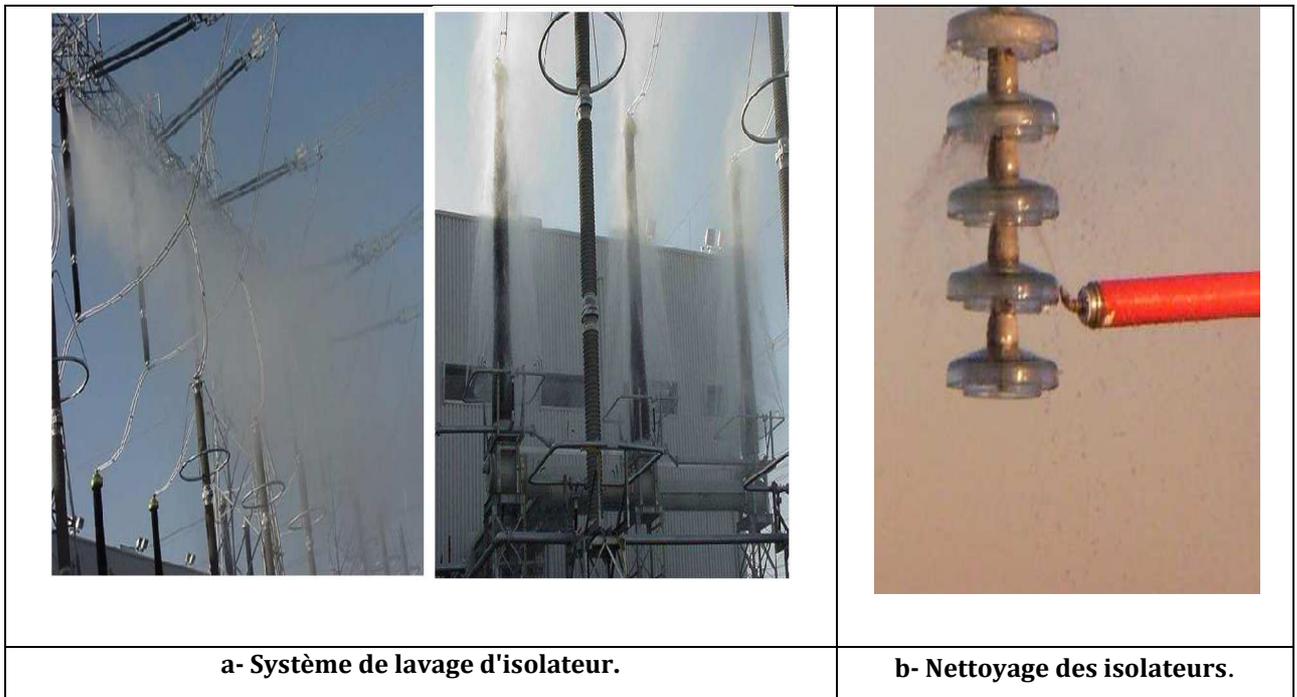
Cette méthode consiste à appliquer, par pulvérisation ou au pinceau, un caoutchouc silicone qui se vulcanise à température ambiante à la surface des isolateurs. Ce revêtement protège les isolateurs et améliore leurs tenues sous pollution. (18)

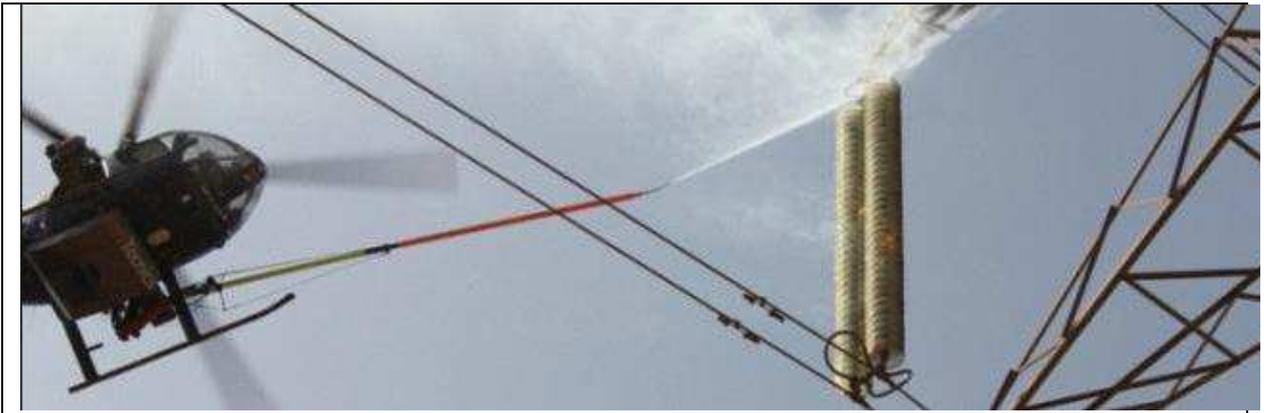
1.3.5.5 Les isolateurs composites

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. (18)

1.3.5.6 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 longs. 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.





c- L'utilisation d'hélicoptères pour le lavage des isolateurs électriques.



d- Isolateurs plats.

e- Isolateur anti-pollution.

f- Revêtement silicone.



g- Graissage périodique

Figure I.16: Techniques de lutte contre la pollution (13).

1.4 Phénomène de contournement des isolateurs pollués

1.4.1 Contournement

Le phénomène de pollution des lignes aériennes constitue 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 humidifiée, la tension de tenue peut diminuer considérablement, provoquant des incidents très graves. (19)

1.4.2 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. (19)

1.4.3 Ligne de contournement

La ligne de contournement (L_c) est la distance la plus courte dans l'air entre deux parties conductrices. (20)

1.4.4 Déroulement du contournement

L'accumulation du dépôt est continue et n'est modifiée que par la pluie et le vent. En position verticale, le nettoyage est plus efficace sur le dessus de l'isolateur que sur le dessous, d'où un dépôt plus important sur la surface inférieure des ailettes.

Le comportement des isolateurs sous pollution peut être décomposé en quatre étapes distinctes. Chacune de ces étapes a une importance sur le résultat final, donc le contournement de la chaîne isolante sous tension de service du réseau. (19)

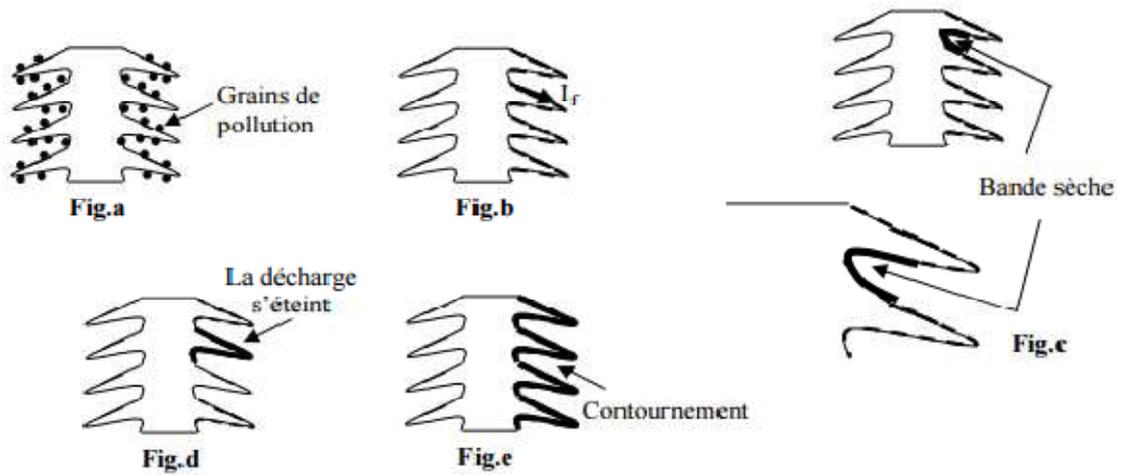


Figure I.17: Déroulement du contournement (6).

➤ **Etape 1 : Dépôt de la pollution**

Les particules du dépôt sont apportées par le vent (l'isolateur, par sa présence, modifie le régime laminaire du vent) et se concentrent entre les nervures ou autour du capot. (19)

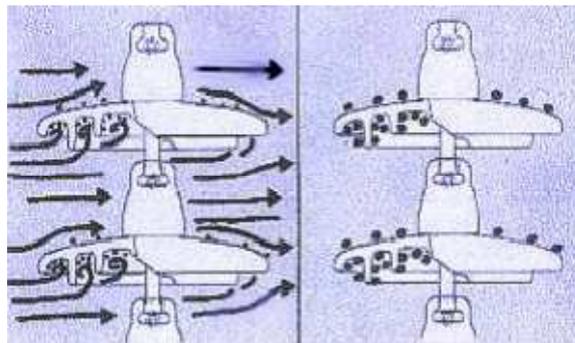


Figure I.18: dépôt et évolution de l'agent polluant.

Les facteurs d'accumulation sont les suivants :

- 1) la nature, le poids et la taille des particules
- 2) la distance de l'isolateur par rapport à la source de pollution et par rapport au sol d'provenir des poussières,
- 3) la vitesse du vent,
- 4) l'orientation de la chaîne, et surtout la forme de l'isolateur et son aptitude par les fortes pluies et vents.

➤ **Etape 2 : Humidification de la pollution**

Le brouillard, la condensation de la petite pluie modifient graduellement et pratiquement sans délavage la surface de l'isolateur pollué. Ces conditions cor dites critiques. Les sels contenus dans le dépôt se dissolvent et créent un électrolyte

conducteur sur la surface de l'isolateur. Un courant de fuite prend alors naissance dès qu'un film conducteur se forme sur la surface de l'isolateur

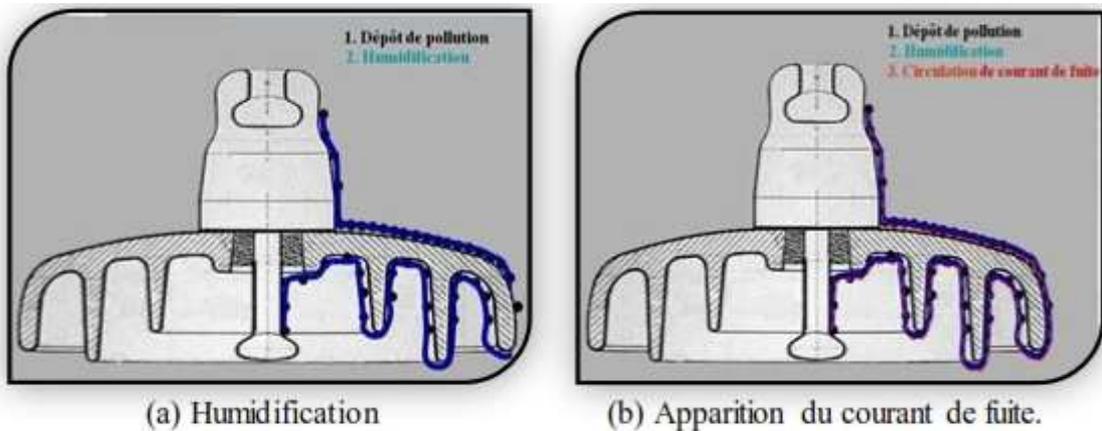


Figure I.19: Humidification du dépôt polluant et création d'un courant de fuite.

Pendant le cycle d'humidification, le courant de fuite augmente jusqu'à une valeur maximale, puis diminue s'il y a séchage. Le niveau de courant de fuite dépend du temps, de la nature et de la quantité des sels solubles et insolubles. Ces derniers maintiennent par absorption une certaine quantité d'eau à la surface de l'isolateur, entretenant ainsi l'humidification du dépôt. (19)

➤ **Etape 3 : Développement des zones sèches et apparition d'arcs**

La densité du courant de fuite est beaucoup plus importante près des ferrures de l'isolateur. Par effet Joule, la température s'élève, l'eau s'évapore et le dépôt devient moins conducteur. Le courant est alors très réduit en amplitude par la présence d'une «bande sèche». La répartition de potentiel sur l'isolateur est modifiée par cette bande sèche, car la plus grande portion du potentiel électrique se trouve reportée aux bornes de cette bande sèche.

Si la largeur de cette dernière est insuffisante pour supporter le potentiel correspondant, un arc se crée. (19)

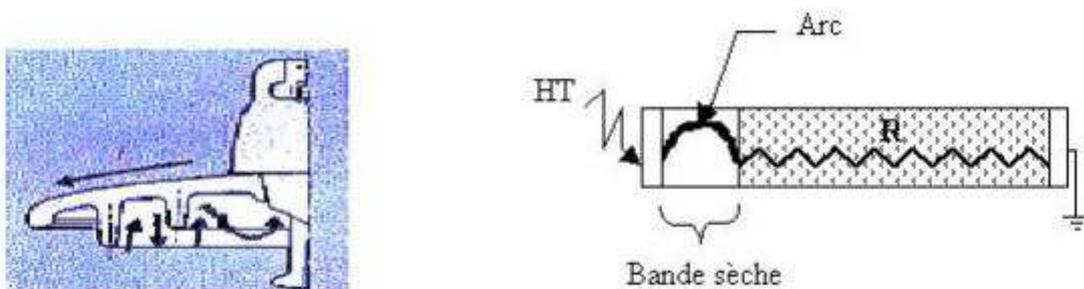


Figure I.20: Arc et bande sèche.

➤ **Etape 4: Comportement des arcs**

La résistance du dépôt humidifié R, en série avec l'arc, limite le courant et la longueur de l'arc. Si le courant est trop faible, l'arc s'éteindra, la bande sèche s'humidifiera à nouveau et le mécanisme se répétera encore. Tant que le courant de fuite n'excède pas ce que l'on appelle «courant critique » correspondant à une «longueur critique » de l'arc, cette situation reste stable (Figure I.26). Dans le cas contraire, le contournement de l'isolateur peut survenir. (19)

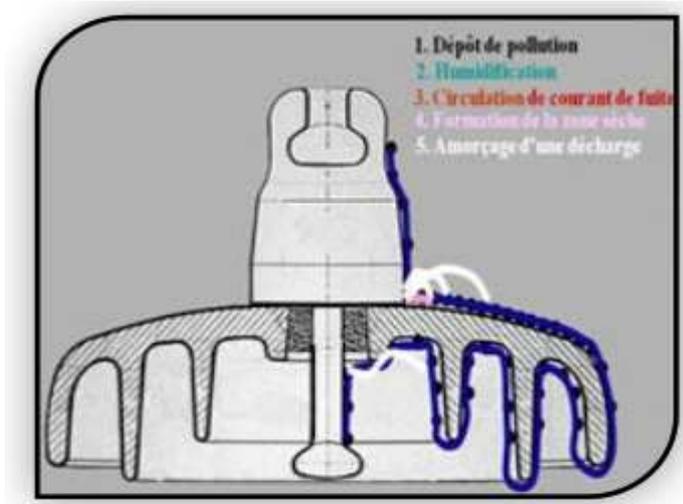


Figure I.21: Régime d'arcs sous pollution.

1.4.4.1 Tension de contournement

La tension de contournement est le niveau de tension le plus bas à partir duquel tous les arcs joignent les deux électrodes.

La tension de contournement dépend :

- de la résistivité volumique moyenne de la pollution.
- de la répartition de la couche de pollution.
- de la longueur de l'isolateur.
- du profil de l'isolateur.

1.4.5 Facteur de forme d'un isolateur

Le facteur de forme est déterminé par les dimensions de l'isolateur. Pour l'estimation graphique du facteur de forme, on trace la courbe de l'inverse de la circonférence ($1/p$) en fonction de la longueur de la ligne de fuite partielle l , calculée depuis une extrémité de l'isolateur jusqu'au point considéré. Il est donné par l'aire située sous la courbe et calculé selon la formule: (21)

$$F = \int_0^L \frac{dL}{p(L)} \quad (I.1)$$

- L : est la longueur partielle de l'isolateur considéré (m).
- dL : élément de la ligne de fuite.
- $p(L)$: le périmètre de l'isolateur.

1.5 Conclusion :

Nous avons pu voir au cours de ce chapitre la définition des isolateurs en précisant leur rôle, leurs différents types, leurs performances et les caractéristiques de l'isolateur en silicone.

Ainsi nous avons conclu que l'isolation à base des matériaux en silicone soit appropriée et demandée dans la haute et moyenne tension grâce à leurs multiples avantages ; leur caractéristique hydrophobe, ainsi que les sources et les conséquences de la pollution des isolateurs qui conduit à l'apparition de phénomène de contournement des isolateurs.

Les principales conclusions que l'on peut tirer de cette synthèse sont :

- Les isolateurs sont des éléments essentiels dont dépendent la sécurité d'exploitation, la qualité et la continuité de service. Les isolateurs les mieux adaptées à un environnement donné sont ceux qui possèdent les meilleures propriétés d'auto-nettoyage.
- La pollution des isolateurs est un facteur essentiel dont il faut tenir compte dans la conception des lignes électriques de haute tension et dans la qualité et la fiabilité du transport d'énergie électrique.
- Les couches polluantes qui s'accumulent à la surface des isolateurs provoquent une conductivité électrique superficielle. L'humidification des couches polluantes facilite en fait, la circulation d'un courant de fuite sur les surfaces isolantes provoquant le contournement des isolateurs pollués.
- Le contournement est dû au déplacement des charges libres accélérées par le champ électrique appliqué. Il se manifeste par un arc électrique dans l'air environnant entre deux pièces conductrices. L'endommagement est superficiel à cause de l'énergie thermique dégagée par l'arc.

CHAPITRE II:

Téchnique d'intelligence artificielle

{Réseaux de neurones artificiels}

Chapitre II : Technique d'intelligence artificielle {Réseaux de neurones artificiels}

II.1 Introduction

Les réseaux de neurones artificiels constituent l'une des approches d'intelligence artificielle dont le développement se fait à travers les méthodes par lesquelles l'homme essaye toujours d'imiter la nature et de reproduire des modes de raisonnement et de comportement qui lui sont propre. Nous présentons donc dans ce chapitre un état de l'art de ces réseaux de neurones.

Techniquement parlant, les réseaux de neurones artificiels (RNA) sont de Nature purement mathématique et statistique ; leurs applications se situent dans des domaines qui n'ont généralement aucun rapport avec la neurobiologie.

Le domaine de calcul par réseaux de neurones a mûri au cours de la dernière décennie et a trouvé de nombreuses applications industrielles. Les réseaux de neurones sont maintenant couramment utilisés dans les processus de contrôle, de fabrication, de contrôle de la qualité, de la conception du produit, d'analyse financière, de la détection des fraudes, de l'approbation du prêt, de la reconnaissance vocale et d'exploration de données.

II.2 Structure d'un neurone :

II.2.1 Neurone Biologique

Le cerveau humain est constitué d'un grand nombre de neurones, d'unités biologiques élémentaires, extrêmement interconnectés. Chacun reçoit et envoie des informations à plusieurs milliers de ses congénères. Le neurone biologique, qui est la cellule de base du système nerveux central, est constitué de trois parties essentielles: soma, axone, dendrite. (22)

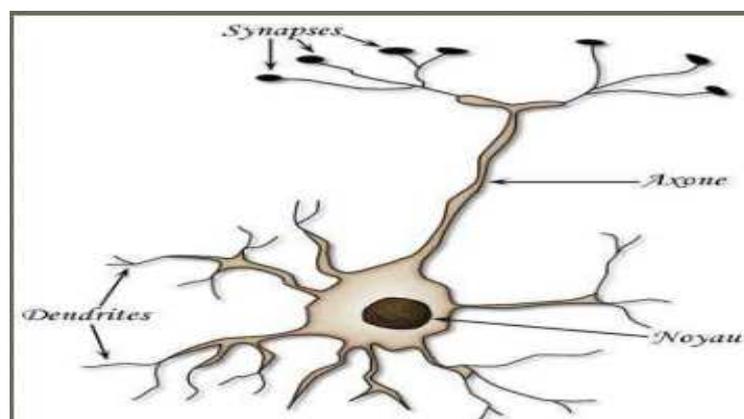


Figure II.1:Structure d'un neurone biologique.

- ✓ **Le corps cellulaire (ou soma):** C'est un corps cellulaire, de $20\mu\text{m}$ de diamètre et de forme variable. Il contient le noyau du neurone qui effectue la transformation biologique nécessaire à la synthèse des enzymes et d'autres molécules qui assure la vie du neurone. (22)
- ✓ **Les dendrites:** Chaque neurone possède une "chevelure" de dendrites qui entourent le corps cellulaire. Celles-ci se ramifient, pour former une espèce d'arborescence autour du corps cellulaire.
- ✓ **L'axone:** Est la fibre nerveuse qui sert à transporter les signaux émis par le neurone.
- ✓ **Synapses:** Les connexions entre les neurones se font dans des endroits appelés synapses, où ils sont séparés par un espace synaptique d'ordre de centième de micron.

II.2.2 Neurone Formel (artificiel)

Un neurone formel (artificiel) ou simplement neurone est un élément de traitement de l'information. Il réalise une fonction algébrique non linéaire, bornée. Sa valeur dépend des paramètres appelés coefficients synaptiques ou poids des connexions. Les variables de cette fonction sont, habituellement, appelées "entrées" du neurone. La valeur de la fonction est appelée sa "sortie". Il est caractérisé par une somme pondérée des entrées (x_j, w_{ij}) . Elle remplace l'intégration spatio-temporelle du neurone biologique, qui est difficile à intégrer dans un modèle simplifié. Le résultat obtenu représente l'activité du neurone notée net_j .

L'application d'une fonction discriminante dite d'activation, $\varphi (net_j)$, favorise la limitation de l'amplitude de la sortie du neurone O_j . (22)

Mathématiquement, ce modèle est décrit par l'équation :

$$net_j = \sum_{j=1}^n w_{ij}x_j + w_{in+1} \quad \text{et} \quad O_j = \varphi(net_j) \quad (II.1)$$

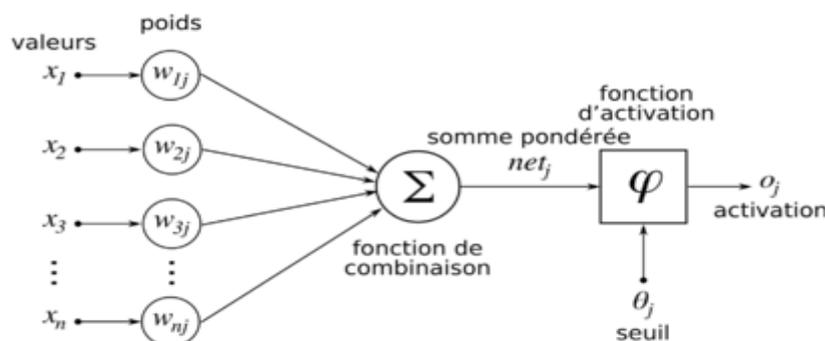


Figure II.2: Neurone Formel.

Donc, le neurone formel est une modélisation mathématique qui reprend les grands principes du fonctionnement d'un neurone biologique, et particulièrement la sommation

des entrées. Cette modélisation est représentée par le tableau suivant qui nous permet d'avoir clairement la transition entre le neurone biologique et le neurone formel. (6)

Neurone Formel	Neurone Biologique
Poids de Connexion (w_i)	Synapses
Signal de Sortie (y)	Axones
Signal d'Entrée (x_i)	Dendrite
Fonction d'Activation (f)	Corps cellulaire

Tableau II.1:Analogie entre le neurone Biologie et le neurone Formel.

II.2.2.1 Poids de connexion

Est un nombre réel W_{ij} associé à la connexion entre le neurone i et le neurone j .il est aussi appelé poids synaptique. (23)

II.2.2.2 Les entrées

Elles peuvent êtres :

- Booléennes.
- Binaires (0 1) ou Bipolaire (-1 1).
- Réelles.

II.2.2.3 Fonction d'activation:

Cette fonction permet de définir l'état interne du neurone en fonction de ces entrées. à titre d'exemple nous citons quelques fonctions souvent utilisées: (24)

a. Fonction Seuil

➤ Fonction Heaviside définie par :

$$f(x) = \begin{cases} 1, & x \geq 0 \\ 0, & \text{Si non} \end{cases} \quad (II.2)$$

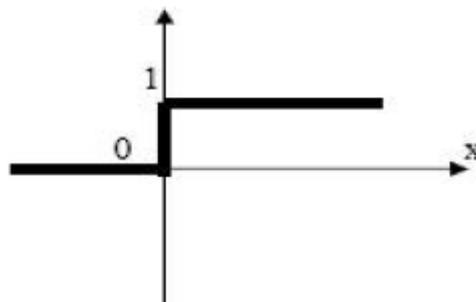


Figure II. 3:Fonction Heaviside.

➤ Fonction Signe définie par :

$$sgn(x) = \begin{cases} 1, & \text{Si } x \geq 0 \\ -1, & \text{Si non} \end{cases} \quad (II.3)$$

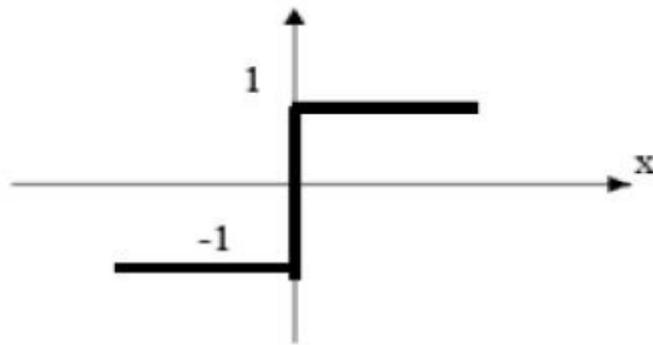


Figure II. 4:Fonction Signe :

Le seuil introduit un non linéarité dans le comportement du neurone, cependant il limite la gamme des réponses possibles à deux valeurs.

b. Fonction linéaire:

C'est l'une des fonctions d'activation les plus simples, elle est définie par:

$$F(x) = x$$

(II .4)

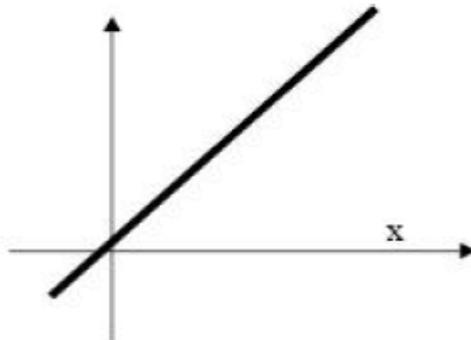


Figure II. 5:Fonction Linéaire.

c. Fonction Linéaire à seuil:

Cette fonction d'activation est définie comme suit :

$$F(x) = \begin{cases} x, & \text{Si } x \in [u \ v] \\ v, & \text{Si } x \geq v \\ u, & \text{Si } x \leq u \end{cases} \quad (II .5)$$

Elle représente un compromis entre la fonction linéaire et la fonction seuil, entre ses deux barres de saturation, elle confère au neurone une gamme de réponses possibles.

En modulant la pente de la linéarité, on affecte la plage de réponse du neurone.

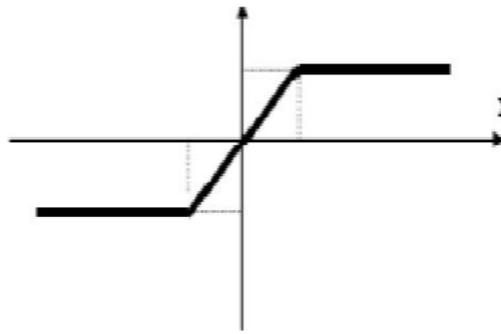


Figure II. 6:Fonction Linéaire à seuil.

d. Fonction sigmoïde:

Elle est l'équivalent continu de la fonction linéaire. Etant continu, elle est dérivable, d'autant que sa dérivée est simple à calculer. Cette fonction est définie par :

$$F(x) = \frac{1}{1 + e^{-x}} \quad (II.6)$$

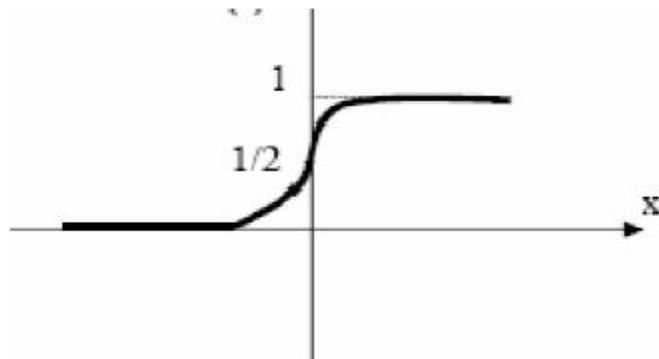


Figure II. 7:Fonction sigmoïde.

II.2.2.4 Fonction de sortie

Elle calcule la sortie d'un neurone en fonction de son état d'activation. En général cette fonction est considérée comme la fonction identité. Elle peut être, binaire ou réelle.

II.3 Définition de Réseaux de neurones artificiels:**➤ Définition 1 :**

Les réseaux de neurones artificiels ou bien par l'abréviation ANN (Artificiel Neural Network) sont des systèmes de traitement de l'information dont la structure s'inspire de celle du système nerveux.

Ils sont destinés à effectuer des tâches auxquelles les approximateurs traditionnels semblent moins adaptés. Les réseaux de neurones artificiels sont des réseaux fortement connectés de processeurs élémentaires fonctionnant en parallèle. Chaque processeur élémentaire calcule une sortie unique sur la base des informations qu'il reçoit. Toute structure hiérarchique de réseaux évidemment un réseau. (25)

➤ **Définition 2 :**

Les Réseaux de Neurones Artificiels sont des modèles statistiques adaptatifs, basés sur une analogie avec le cerveau humain. Leur adaptabilité revient du fait qu'ils peuvent apprendre à estimer les paramètres d'un ensemble de données en utilisant un nombre d'exemples. Dans sa structure de base, un Réseau de Neurones Artificiels est constitué d'un ensemble d'unités simples qui sont les neurones. Ces dernières sont interconnectées à l'aide d'un ensemble de connexions pondérées, chaque unité correspond à une caractéristique d'une forme à analyser. (23)

II.4 Architecture des réseaux de neurones artificiels

Un réseau de neurone est conçu pour remplir une tâche que le concepteur définit, donc il est nécessaire de communiquer au réseau des données, et de récupérer des résultats de calcul. Afin de réaliser cette tâche, les neurones constituant un réseau sont répartis en trois sous ensembles (couches) comme suit:

- Couche ou ensemble de neurones d'entrée : ils perçoivent les données du problème sous forme d'un vecteur codé nommé patron d'entrée.
- Couche cachée ou ensemble de neurones cachés : cette couche est d'un intérêt particulier pour le réseau, c'est elle qui détermine les performances et les limitations du réseau.
- Couche ou ensemble de neurones de sortie : l'activation de ces neurones sera interprétée comme la réponse du réseau. Elle est sous forme d'un vecteur codé nommé patron de sortie qui va être décodé pour interpréter les résultats.

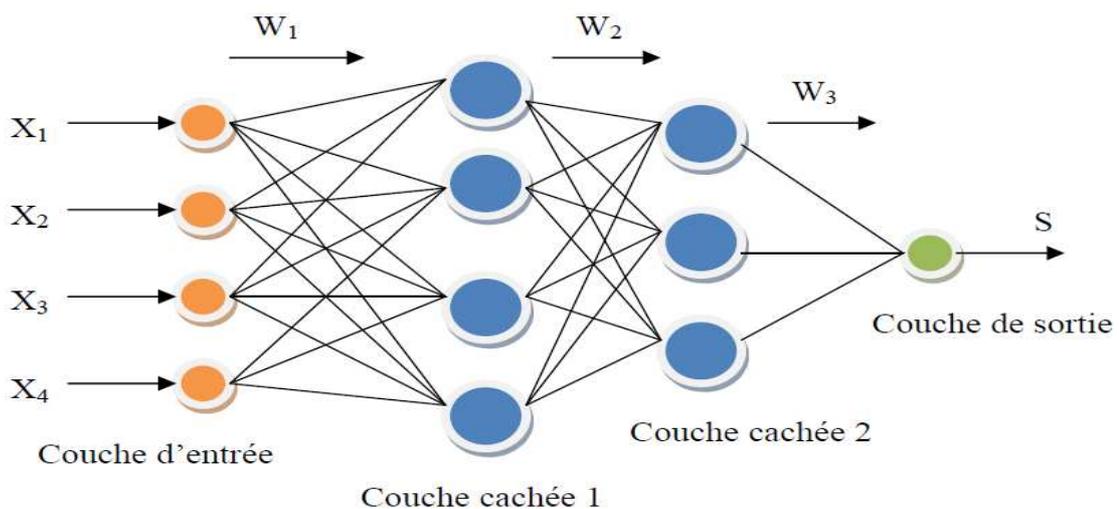


Figure II. 8:Disposition en couche des neurones du réseau.

La façon dont sont connectées les différentes couches, ainsi que, les neurones de chaque couche, a permis de définir trois principaux types de réseau (statique, dynamique et évolutif ou auto organisé). (26)

II.4.1 Réseaux statiques

Dans ce type de réseaux chaque neurone reçoit ses entrées à partir des neurones de la couche précédente (connexion directe) sans qu'il y ait un retour d'information « feedback ».

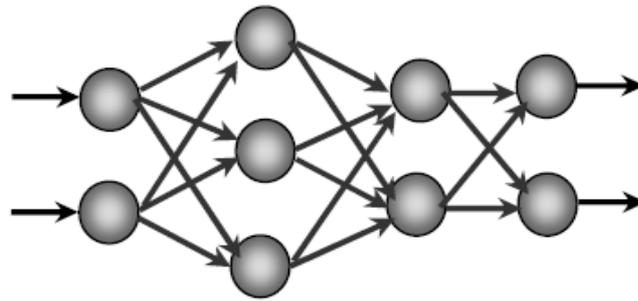


Figure II. 9:Réseau statique.

II.4.2 Réseaux dynamiques

L'introduction du retour d'information entre les neurones rend les réseaux dynamiques. L'étude de la stabilité de ces derniers devient alors nécessaire. (26)

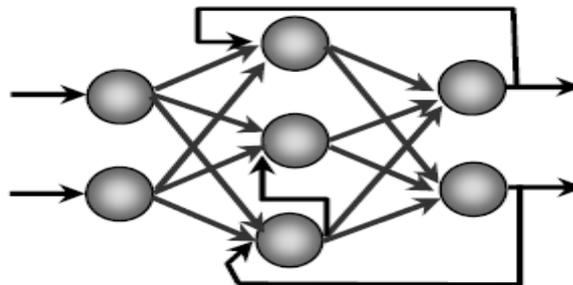


Figure II. 10:Réseau dynamique.

II.4.3 Réseaux à architecture évolutive ou auto-organisée

Les réseaux à architecture auto-organisée sont des réseaux de neurones qui changent leurs structures internes pendant l'utilisation. Ainsi, les neurones se regroupent topologiquement suivant la représentation des exemples issus de l'espace d'entrée.

Les réseaux sont dits évolutifs par leurs méthodes d'apprentissages. C'est la dimension du réseau qui change pendant l'entraînement. Ainsi, le nombre de neurones augmente ou diminue. La structure interne n'est cependant pas bouleversée par ce changement. (27)

II.5 Fonction de Combinaison

Considérons un neurone quelconque, il reçoit des neurones en amont un certain nombre de valeurs via ses connexions synaptiques, et il produit une certaine valeur en utilisant une **fonction de combinaison**. Cette fonction peut donc être formalisée comme étant une fonction vecteur-à-scalaire notamment :

- ❖ Les réseaux de type **MLP** (*multi-layer perceptron*) calculent une combinaison linéaire des entrées, c'est-à-dire que la fonction de combinaison renvoie le produit scalaire entre le vecteur des entrées et le vecteur des poids synaptiques.
- ❖ Les réseaux de type **RBF** (*Radial Basis Fonction*) calculent la distance entre les entrées, c'est-à-dire que la fonction de combinaison renvoie la norme euclidienne du vecteur issu de la différence vectorielle entre les vecteurs d'entrées. (22)

II.6 Propriétés des réseaux de neurones

Les réseaux de neurones artificiels possèdent une propriété fondamentale qui justifie l'intérêt croissant qui leur est accordé et que sont capable d'intervenir dans des domaines très divers, et qui les distingue des techniques classiques de traitement des données.

- ❖ **Les réseaux de neurones sont des approximateurs universels:** Cette propriété peut être énoncée comme suit: Toute fonction bornée suffisamment régulière peut être approchée uniformément, avec bonne précision, dans un domaine fini de l'espace de ses variables, par un réseau de neurones qui comporte une couche de neurones cachée en nombre fini, possédant tous la même fonction d'activation et un neurone de sortie linéaire. (28)
- ❖ **Parcimonie:** Lors de la modélisation d'un processus à partir de ses données, on cherche toujours à obtenir les résultats les plus satisfaisants possibles avec un nombre minimum de paramètres. On dit que l'on cherche l'approximation la plus parcimonieuse. Pour obtenir un modèle non linéaire de précision donnée, un RN a besoin de moins de paramètres ajustables que les méthodes de régression classiques (par exemple la régression polynomiale). Or le nombre de données nécessaires pour ajuster le modèle est directement lié au nombre de ses paramètres. (23)

II.7 Topologies

On appelle topologie des réseaux la façon dont les neurones sont connectés entre eux à travers les différentes couches. En général on peut distinguer deux grandes classes

de Réseaux de Neurones Artificiels selon leurs topologies: les réseaux à couches qui sont des réseaux de neurones dans lesquels l'information se propage couche par couche sans retour en arrière possible et les réseaux récurrents qui sont des réseaux de neurones dans lesquels il y a une liaison vers l'arrière. Les connexions de ces réseaux forment des boucles. Ainsi la fonction d'activation peut circuler le long de ces boucles et affecter le réseau pendant une période arbitrairement longue. Pour cette raison les comportements des réseaux récurrents sont potentiellement plus complexes que ceux des réseaux à couches. (24)

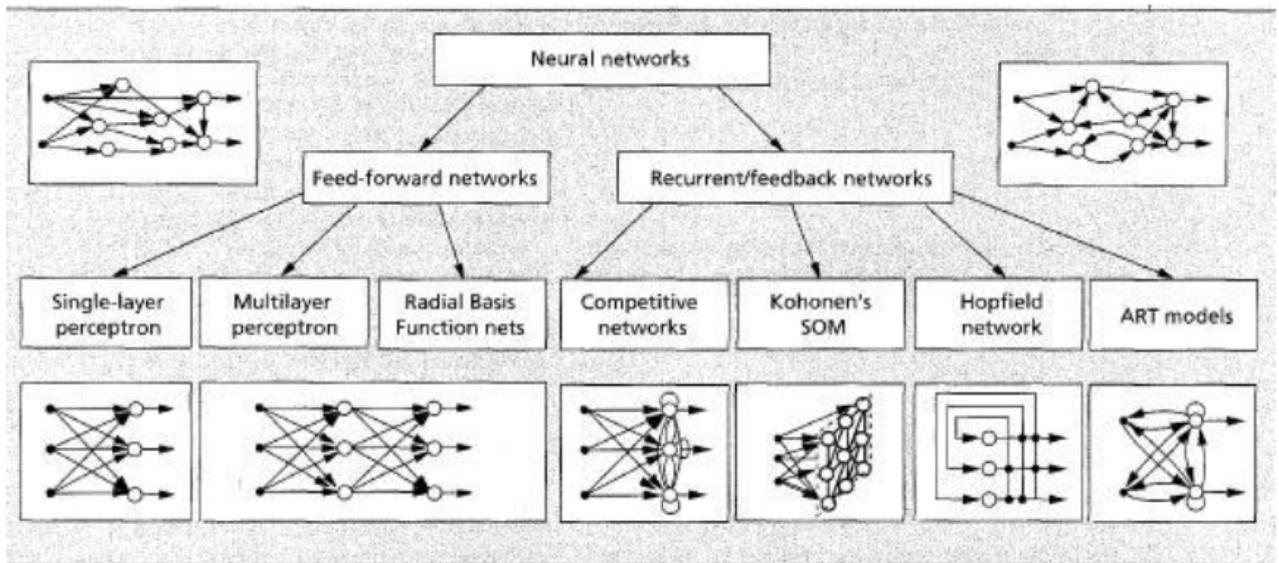


Figure II. 11: Topologies des Réseaux de Neurones Artificiels (24).

II.8 Différentes types de réseaux de neurones artificiels

Nous entendons par architecture ou topologie d'un réseau de neurones artificiels la manière selon laquelle les neurones sont organisés. Les structures qui peuvent être utilisées sont très variées mais beaucoup moins complexes que celles des réseaux de neurones biologiques.

D'une façon générale, l'architecture des réseaux de neurones artificiels peut aller d'une connectivité totale (chacun des neurones du réseau est relié à tous les autres neurones) à une connectivité locale où les neurones ne sont liés qu'à leurs plus proches voisins. (29)

Deux classes différentes d'architectures de réseaux de neurones peuvent être distinguées:

- 1- Les réseaux proactifs (feed-forward).
- 2- Les réseaux récurrents (feedback).

II.8.1 Les réseaux proactifs

Cette classe se distingue par l'absence de toute boucle de rétroaction de la sortie vers l'entrée, d'où l'appellation « feed-forward ». En d'autres termes, la propagation des signaux s'y fait uniquement dans le sens de l'entrée vers la sortie.

Ce type de réseaux comprend deux groupes d'architectures: les réseaux monocouches et les réseaux multicouches. Il diffèrent par l'existence ou non des neurones intermédiaires appelés neurones cachés entre les unités d'entrées et les unités de sorties appelées aussi nœuds d'entrées et nœuds de sorties respectivement. (6)

II.8.1.1 Les réseaux proactifs monocouches

Ce type de réseaux possède une couche d'entrée recevant les stimuli à traiter par l'intermédiaire des nœuds d'entrées. Cette couche se projette en une couche de sortie composée de neurones de calcul transmettant les résultats du traitement au milieu extérieur.

La (figure II.12) montre par exemple, un réseau proactif monocouche à quatre neurones d'entrée et trois neurones de sortie. La désignation monocouche est attribuée à la couche de sortie. La couche d'entrée n'est pas comptée dans ce sens vu qu'il n'y a pas de calcul qui se fait au niveau de ces nœuds, ils servent uniquement à recevoir les signaux d'entée et à les transmettre à la couche suivante. Un exemple classique de réseau monocouche est le perceptron. (29)

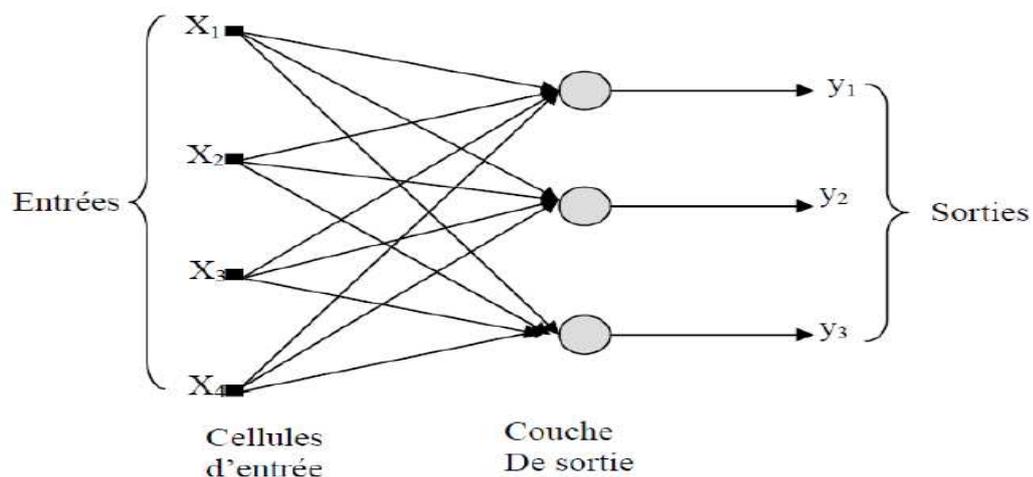


Figure II. 12:Réseau proactif monocouche (Perceptron).

II.8.1.2 Réseaux proactifs multicouches

Ce type de réseaux proactifs se caractérise par la présence d'une ou plusieurs couches cachées, où les nœuds de calcul correspondants s'appellent neurones cachés. Les couches cachées s'interposent entre l'entrée du réseau et sa sortie. (29)

Leur rôle est d'effectuer un prétraitement des signaux d'entrées, reçu par la couche d'entrée en provenance du milieu extérieur, et de transmettre les résultats correspondants à la couche de sortie où sera déterminée la réponse finale du réseau avant qu'elle soit transmise au milieu extérieur.

Ce rôle de prétraitement fait que, en ajoutant une ou plusieurs couches cachées, le réseau est capable d'extraire plus de propriétés statistiques que celles extraites d'un réseau similaire ayant moins de couches cachées. Ceci est utile pour réaliser des fonctions plus complexes que de simples séparations linéaires.

Dans ce type de réseaux, les entrées des neurones d'une couche particulière proviennent uniquement des sorties de la couche adjacente précédente. Les réseaux les plus fréquemment utilisés de cette catégorie sont les perceptrons multicouches (PMC). (6)

La figure (II.13) Montre un réseau à une seule couche cachée qui contient quatre neurones, huit entrées et une sortie à trois neurones (réseau 8-4-3). Ce réseau est dit complètement connecté où tous les neurones de la couche actuelle sont connectés à tous les neurones de la couche adjacente suivante. Le réseau est partiellement connecté si des connexions manquaient entre des neurones de deux couches voisines.

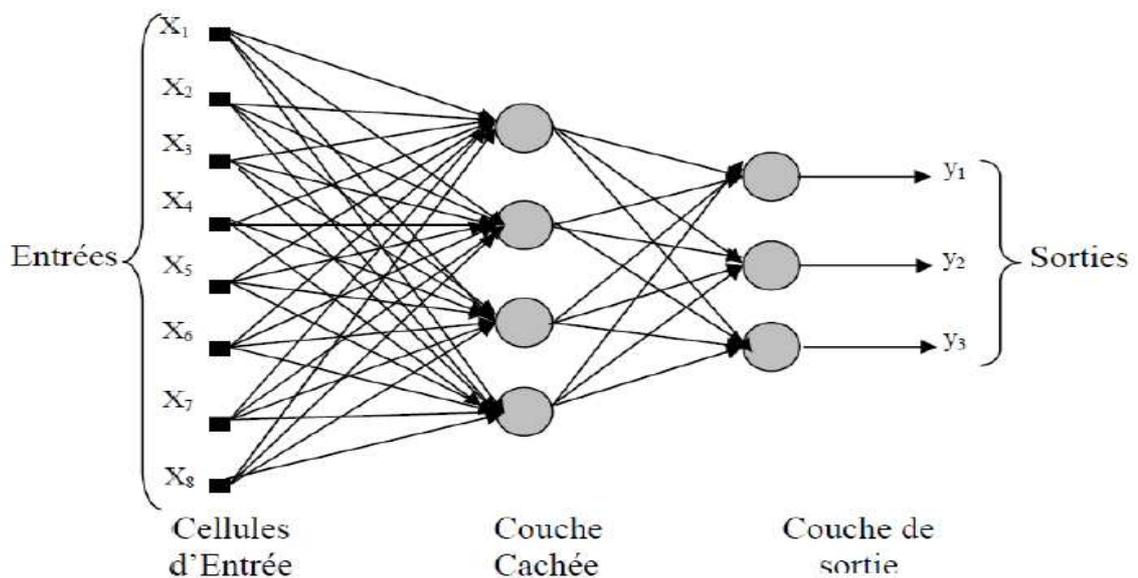


Figure II. 13:Réseau proactif complètement connecté avec une seule couche cachée.

II.8.2 Réseaux récurrents

Les réseaux récurrents se distinguent des réseaux proactifs par le fait qu'ils contiennent au moins une boucle de contre-réaction des neurones de sortie vers les entrées ou au moins d'une couche vers une couche précédente, adjacente ou non. (29)

La figure (II.14) Présente un exemple d'un réseau de neurone récurrent qui à deux entrés, trois neurones dans la couche cachée et deux neurones dans la couche de sortie. Les connexions de rétroaction de ce réseau proviennent aussi bien des neurones de la couche cachée que des neurones de la couche de sortie.

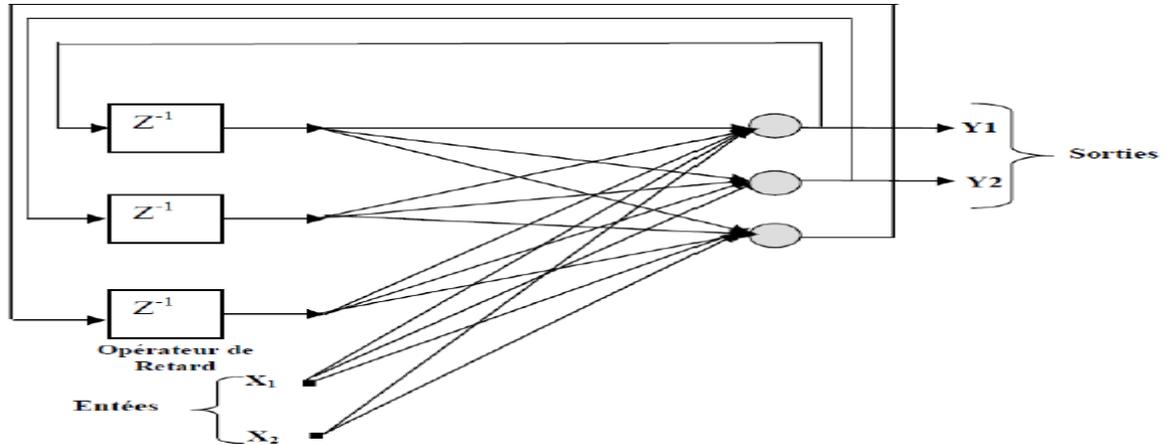


Figure II. 14:Réseau récurrent avec neurones cachés.

II.9 L'apprentissage de réseaux de neurones

L'apprentissage est la caractéristique principale des réseaux de neurones ; c'est le processus d'adaptation des paramètres d'un système pour remplir au mieux la tâche pour laquelle le réseau est destiné. Le type d'apprentissage est déterminé par la manière dont les paramètres sont adaptés, et il existe plusieurs méthodes et algorithmes pour adapter ces paramètres. (28)

Après la création d'un réseau de neurone, il faut lui faire apprendre quelque chose. Pour mieux comprendre cela, nous prendrons l'exemple de la reconnaissance de caractères: on présente des caractères au réseau et il a pour objectif de reconnaître ce caractère. Par exemple, si on lui montre la lettre " a " dessinée, il doit nous répondre que cela est un " a ". Figure (II.15) (22).

Comment réaliser cela ? La méthode est en quelque sorte une imitation du cerveau: si la réponse est correcte, c'est bien, mais s'il y a une *erreur*, il faut *modifier* le réseau afin de ne pas réitérer l'erreur.

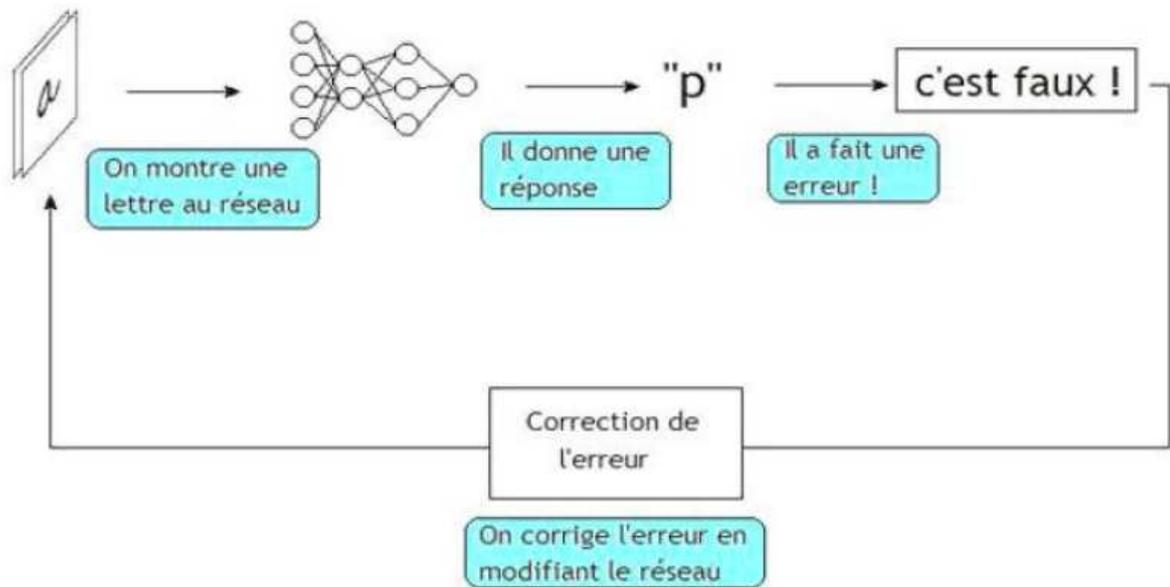


Figure II. 15:Un exemple d'un apprentissage.

On recommence plusieurs centaines de fois l'opération, jusqu'à ce que le réseau ait bien appris sa leçon.

Le principe est donc relativement simple. On fait l'éducation du réseau comme on éduquerait un enfant: il faut lui répéter plusieurs fois qu'il a fait une erreur, et à la fin, il a compris.

On entend généralement par apprentissage la modification automatique des poids des connexions ou plus rarement du nombre et de l'organisation des neurones, afin d'adapter le traitement effectué par le réseau à une tâche particulière. (22)

On distingue trois grandes classes d'algorithmes d'apprentissage :

- L'apprentissage supervisé.
- L'apprentissage non supervisé.
- Mode par renforcement.

II.9.1 Apprentissage supervisé (*supervised learning*)

Pour les réseaux à apprentissage supervisé, on présente au réseau des entrées, et au même temps les sorties désirées pour cette entrée. Le réseau doit ajuster ses poids de façon à réduire l'écart entre la réponse désirée et la sortie du réseau.

Cette procédure est répétée jusqu'à ce qu'un critère de performance soit satisfait. L'algorithme le plus utilisé est celui de la rétro propagation de l'erreur. (28)

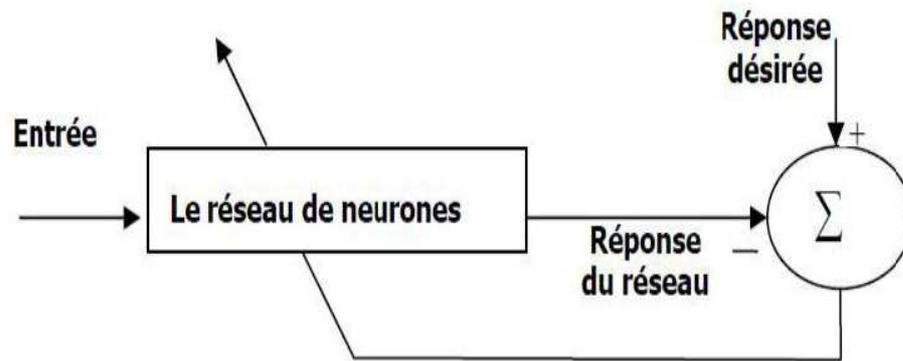


Figure II. 16:Principe de l'apprentissage supervisé.

II.9.2 Apprentissage non supervisé (*unsupervised learning*)

Pour les réseaux à apprentissage non supervisé, aucune information sur la réponse désirée n'est fournie au réseau. (28)

On présente une entrée au réseau et on le laisse évoluer librement jusqu'à ce qu'il se stabilise. Ce comportement est connu sous le nom "auto organisation."

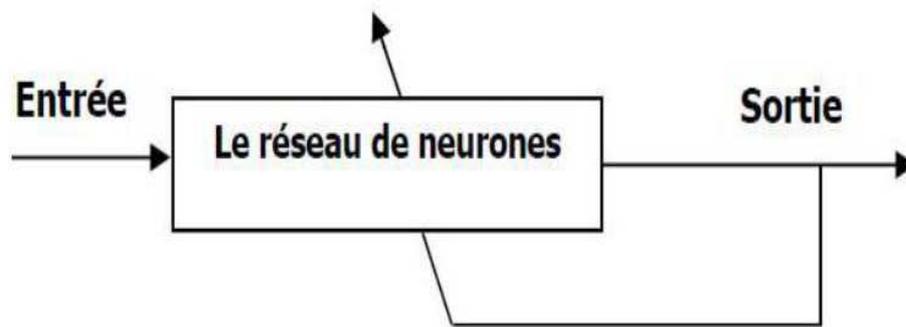


Figure II. 17:Apprentissage non supervisé.

II.9.3 Mode par renforcement

Le renforcement est en fait une sorte d'apprentissage supervisé et certains auteurs le classe d'ailleurs, dans la catégorie des modes supervisés. A la différence que dans cette approche, le réseau doit apprendre la corrélation entrée/sortie via une estimation de son erreur, c'est-à-dire du rapport échec/succès. Le réseau va donc tendre à maximiser un index de performance qui lui est fourni, appelé signal de renforcement.

Le système étant capable ici, de savoir si la réponse qu'il fournit est correcte ou non, mais il ne connaît pas la bonne réponse. (26)

II.10 Modèles des réseaux de neurones et leurs apprentissages

Jusqu'à ce jour, les informaticiens passionnés n'ont pas cessé d'inventer de nouveaux types de réseaux toujours mieux adaptés à la recherche de solutions à des problèmes particuliers. Parmi ces réseaux, ils existent trois les plus utilisés, à savoir :

II.10.1 Le réseau perceptron

Les réseaux connexionnistes à une couche calculent l'activation des neurones de sortie directement à partir des entrées du réseau via le poids des connexions qui les relient (Figure II.18). Minsky et Paper (1969) ont montré que les réseaux à une couche n'étaient capables de résoudre que des problèmes linéairement séparables. (30)

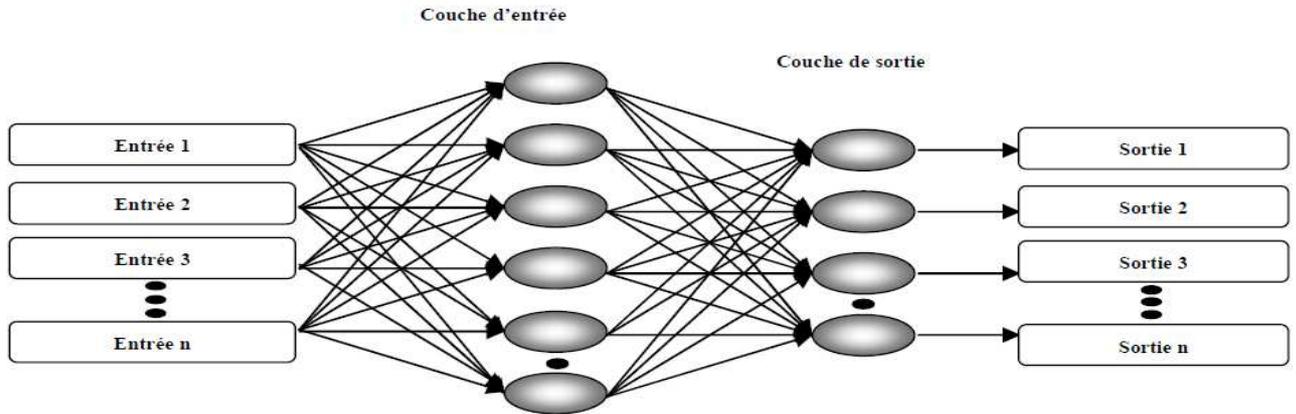


Figure II. 18:Réseaux Neurones à une couche (perceptron).

II.10.2 Le modèle de Hopfield

Ce modèle utilise l'architecture des réseaux entièrement connectés. Son apprentissage est non supervisé. Le modèle de Hopfield peut être utilisé pour restituer une donnée à partir d'une entrée particulièrement bruitée ou incomplète (Figure II.19). (30)

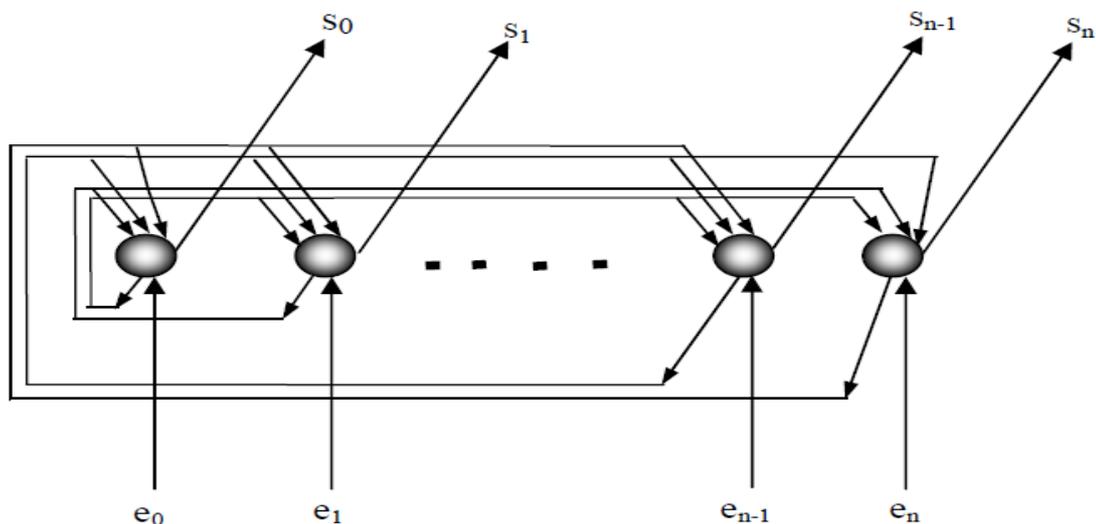


Figure II. 19:Réseau de Hopfield.

II.10.3 Le Réseau multicouches

Il est nécessaire de pouvoir communiquer avec le RN, de lui fournir des données, et de récupérer les résultats de ses calculs. Dans ce contexte presque tous les RN partagent

la propriété d'avoir une structure soit disant « aveugle », en répartissant leurs neurones en trois ensembles (Figure II.20): (31)

- ❖ L'ensemble E des neurones d'entrée, qui reçoivent les données d'entrée sous forme d'un vecteur d'entrée. Ces valeurs sont communiquées aux réseaux par l'entremise de leurs valeurs d'entrées extérieures. Elles influencent donc l'activation de ces derniers, et par extension, le comportement du réseau entier.

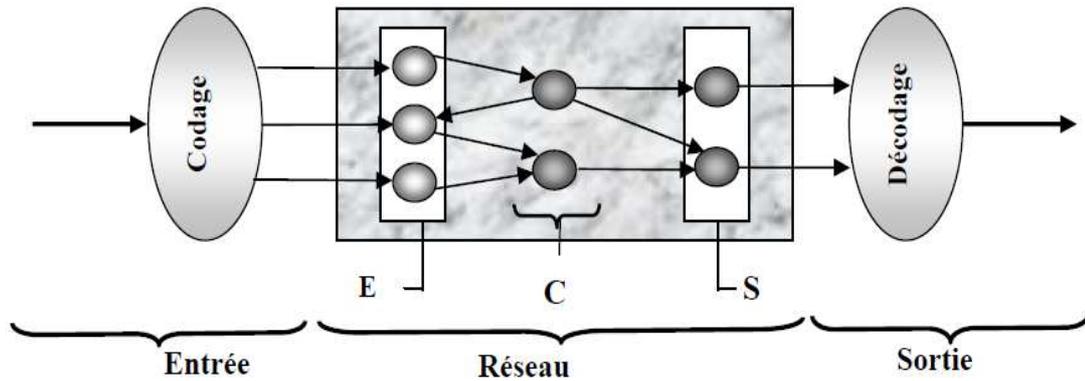


Figure II. 20:Structure générale d'un RN multicouche.

- ❖ L'ensemble S des neurones de sortie, dont les activations constituent le vecteur de sortie et sont collectivement interprétées comme le résultat de calcul du réseau. Un même neurone peut être à la fois à l'entrée et à la sortie du réseau, ainsi, E et S ne sont pas nécessairement disjoints.
- ❖ L'ensemble C des neurones cachés, qui n'appartiennent pas aux ensembles E et S. En général, la présence des neurones cachés dans un réseau démultiplie sa puissance de calcul, et lui permet d'aborder des problèmes plus difficiles. (31)

Le principe d'apprentissage d'un réseau multicouche consiste en une adaptation des poids d'après un nombre d'exemples prédéfinis introduits en entrée. En d'autres termes, nous reconnaissons à chaque fois la sortie désirée. Un superviseur qui connaît parfaitement la classification attendue guide le réseau en lui rappelant à chaque étape le bon résultat.

II.11 Méthode de la rétro propagation du gradient (RPG)

II.11.1 Principe

La rétro propagation du gradient consiste à propager « à l'envers » (de la couche de sortie vers la couche d'entrée) l'erreur obtenue sur les exemples de la base d'apprentissage. On utilise pour cela l'erreur quadratique « le carré de la différence entre ce qu'on obtient et ce qu'on désire ».

Si on calcule la dérivée partielle de l'erreur quadratique par rapport aux poids des connexions (gradient), il est possible de déterminer la contribution des poids à l'erreur générale, et de corriger ces poids de manière à se rapprocher du résultat souhaité. La correction par itération on corrige plus ou moins fortement les poids par l'intermédiaire d'un coefficient η . (29)

Après un certain nombre d'itérations, où on est satisfait du classement des exemples de notre base d'apprentissage, on fixe les poids qui constituent aussi des frontières entre les classes.

II.11.2 Algorithme

II.11.2.1 Définition du réseau

Soit un réseau multicouche définit par:

- Une couche d'entrée à m cellules d'entrées. Ces cellules ne sont pas des neurones mais simplement des entrées $X_i = e_i$ du réseau.
- Une couche cachée qui contient n neurones qui ont une fonction d'activation y_j
- Une couche de sortie à p neurones qui ont une fonction d'activation. Z_k
- $n \times m$ connexions entre la couche d'entrée et la couche cachée, chacune pondérée par V_{ji}
- $m \times p$ connexions entre la couche cachée et la couche de sortie, chacune pondérée par W_{kj}

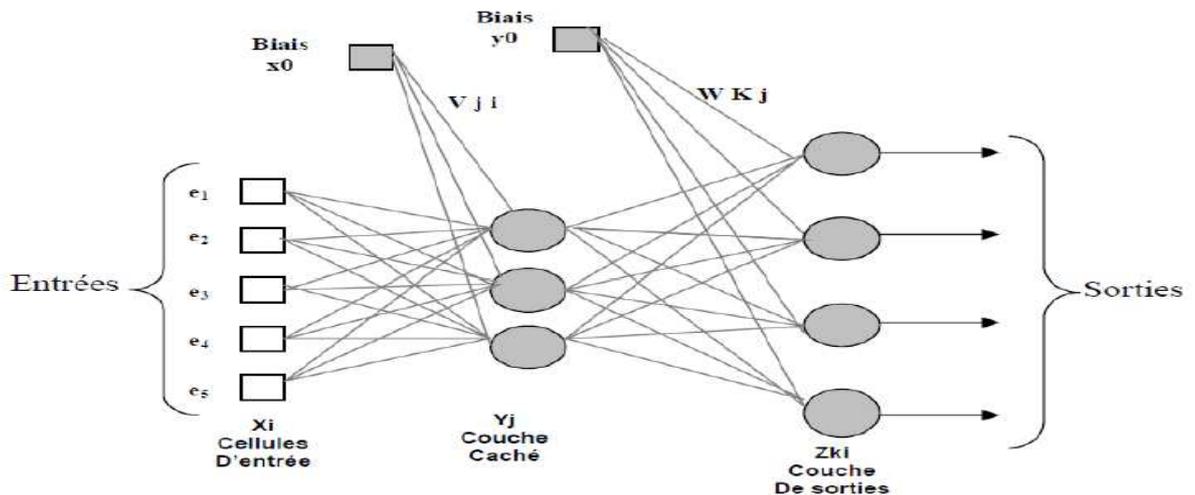


Figure II. 21:Exemple de réseau MLP à une couche cachée avec 5 entrées, 3 neurones dans la couche cachée, et 4 sorties.

II.11.2.2 Les Etapes de l'algorithme

- ✓ **ETAPE 1** : Initialisation au hasard ou aléatoire des poids des connexions V_{ji} et W_{kj}
- ✓ **ETAPE 2** : Propagation des entrées $X_i = e_i$
 - On propage vers la couche cachée :

$$y_i = f \left(\sum_{i=1}^m x_i v_{ij} + x_0 \right) \quad (II.7)$$

- Puis de la couche cachée vers la couche de sortie :

$$Z_k = f \left(\sum_{j=1}^n y w_{jk} + x_0 \right) \quad (II.8)$$

Les valeurs x_0 et y_0 sont des Biais, est la fonction d'activation qu'on a choisie où on a définit notre réseau **MLP**.

✓ **ETAPE 3:** rétro propagation de l'erreur pour chaque neurone de la couche de sortie, on calcule l'erreur, c'est-à-dire la différence entre la sortie désirée S_k et la sortie réelle (obtenu) Z_k .

On propage cette erreur sur la couche cachée ; l'erreur de chaque neurone de la couche cachée est donnée par :

$$F_k = y_j(1 - y_j) \sum_{k=1}^p (w_{kj} E_k) \quad (II.9)$$

- ✓ **ETAPE 4 :** Correction des poids des connexions, Il reste maintenant la modification des poids des connexions et aussi les biais.

- Entre la couche d'entrée et la couche cachée :

$$\begin{cases} \Delta v_{ji} = \eta y_i F_j \\ \Delta x_0 = \eta F_j \end{cases} \quad (II.10)$$

- Entre la couche cachée et la couche de sortie :

$$\begin{cases} \Delta w_{kj} = \eta z_k E_k \\ \Delta y_0 = \eta E_k \end{cases} \quad (II.11)$$

η Etant un paramètre qu'il reste à déterminer

- ✓ **BOUCLER AL'ETAPE 2:** jusqu'à un critère d'arrêt à définir. (6)

II.11.2.3 *Sommaire de l'algorithme Rétro propagation de l'erreur .*

1. Initialisation au hasard ou aléatoire des poids des connexions entre les couches (Entrée - Cachée) et (Cachée - Sortie). (23)
2. Propagation des entrées $x_i = e_i$ de la couche d'entrée vers la couche de sortie en passant par la couche cachée.
3. rétro propagation de l'erreur des neurones de la couche de sortie vers la couche cachée puis vers la couche d'entrée.
4. Correction des poids des connexions entre la couche d'entrée et la couche cachée ; la couche cachée et la couche de sortie.

5. Boucler à 2 jusqu'à un critère d'arrêt à définir.

II.12 Les étapes de la conception d'un réseau de neurone.

Pour construire un réseau de neurones, la première chose à faire n'est pas de choisir le type de réseau mais de bien choisir ses données d'apprentissage et le test de validation. Ce n'est qu'ensuite que le choix du type de réseau interviendra. La construction d'un réseau de neurones passe par quatre étapes importantes. (26)

II.12.1 Choix des échantillons.

Le processus d'élaboration d'un réseau de neurones commence toujours par le choix des échantillons. Cette étape est cruciale et va aider le concepteur à déterminer le type de réseau le plus approprié pour résoudre son problème. La façon dont se présente l'échantillon conditionne le type de réseau, le nombre de cellules d'entrée, le nombre de cellules de sortie et la façon dont il faudra mener l'apprentissage et le test de validation.

II.12.2 Elaboration de la structure du réseau.

La structure du réseau dépend étroitement du type des échantillons. Il faut d'abord choisir le type de réseau. Dans le cas du réseau multicouche par exemple, il faudra aussi choisir le nombre de neurones dans la couche cachée. Plusieurs méthodes existent et on peut par exemple prendre une moyenne du nombre de neurones d'entrée et de sortie, mais il est préférable de tester toutes les possibilités et de choisir celle qui offre les meilleurs résultats. (26)

II.12.2.1 Apprentissage.

L'apprentissage est l'avant dernière phase d'élaboration d'un réseau de neurones. Elle consiste tout d'abord à calculer les pondérations optimales des différentes liaisons, en utilisant un échantillon. La méthode la plus utilisée est la «*Levenberg-Marquardt*» : on donne des valeurs à l'entrée et en fonction de l'erreur obtenue à la sortie, on corrige les poids accordés aux pondérations. C'est un cycle qui est répété jusqu'à ce que l'erreur du réseau soit minime (il faut bien prendre garde à ne pas surentraîner un réseau de neurones qui se spécialise).

II.12.2.2 Validation.

Une fois le réseau est appris, il faut procéder à des tests pour vérifier que le réseau réagit bien comme on le souhaite, c'est la validation.

II.13 Avantages des réseaux de neurones artificiels.

Les RNA fonctionnent sans programme, n'exécutent pas d'instructions, et ne manipulent pas de nombres. La destruction d'une partie de ces circuits n'empêche pas le réseau de fonctionner. Ces principales propriétés sont :

- ❖ Parallélisme : c'est l'exécution de plusieurs tâches (données numériques et non pas symboliques) en même temps, ce qui explique la grande rapidité de calcul des RNA.
- ❖ Capacité d'apprentissage : elle permet aux réseaux de tenir compte des contraintes et des données provenant de l'extérieur. Elle se caractérise dans certains réseaux par leur capacité d'auto-organisation qui assure leur stabilité.
- ❖ Généralisation : elle permet au réseau de trouver une solution généralisée applicable à tous les exemples du problème, même s'ils contiennent des erreurs ou sont inachevés ou ne sont pas présentés pendant l'apprentissage.
- ❖ Mémoire distribuée : la mémoire est répartie sur plusieurs entités et sur tout le réseau.

II.14 Programmation de réseau neurone artificiel en logiciel MATLAB.

II.14.1 Définition de l'Optimisation :

Un problème d'optimisation se définit comme la recherche du minimum ou du maximum (de l'optimum) d'une fonction donnée. On peut aussi trouver des problèmes d'optimisation pour lesquelles les variables de la fonction à optimiser sont contraintes d'évoluer dans une certaine partie de l'espace de recherche. Dans ce cas, on a une forme particulière de ce que l'on appelle un problème d'optimisation sous contraintes.

II.14.2 Méthodologie et mise en œuvre.

La première étape consiste à identifier les paramètres à employer pour les modèles de prévision. Les données sont divisées en trois parties. 70% des données sont employées pour l'apprentissage, 15% pour la phase de test et 15% pour la validation. La mise en œuvre d'un modèle RNA inclut ces trois phases : l'apprentissage, le test et la validation.

La phase d'apprentissage ou d'entraînement a pour but de déterminer les paramètres de connexion du réseau à l'aide de la technique d'optimisation. La phase de test consiste à vérifier le réseau déterminé lors de la phase d'apprentissage sur des données non utilisées lors de cette dernière, et à examiner la capacité du réseau à

généraliser les exemples d'apprentissage (en comparant la sortie réelle du réseau avec la sortie désirée). La phase de validation est effectuée sur la dernière partie des données

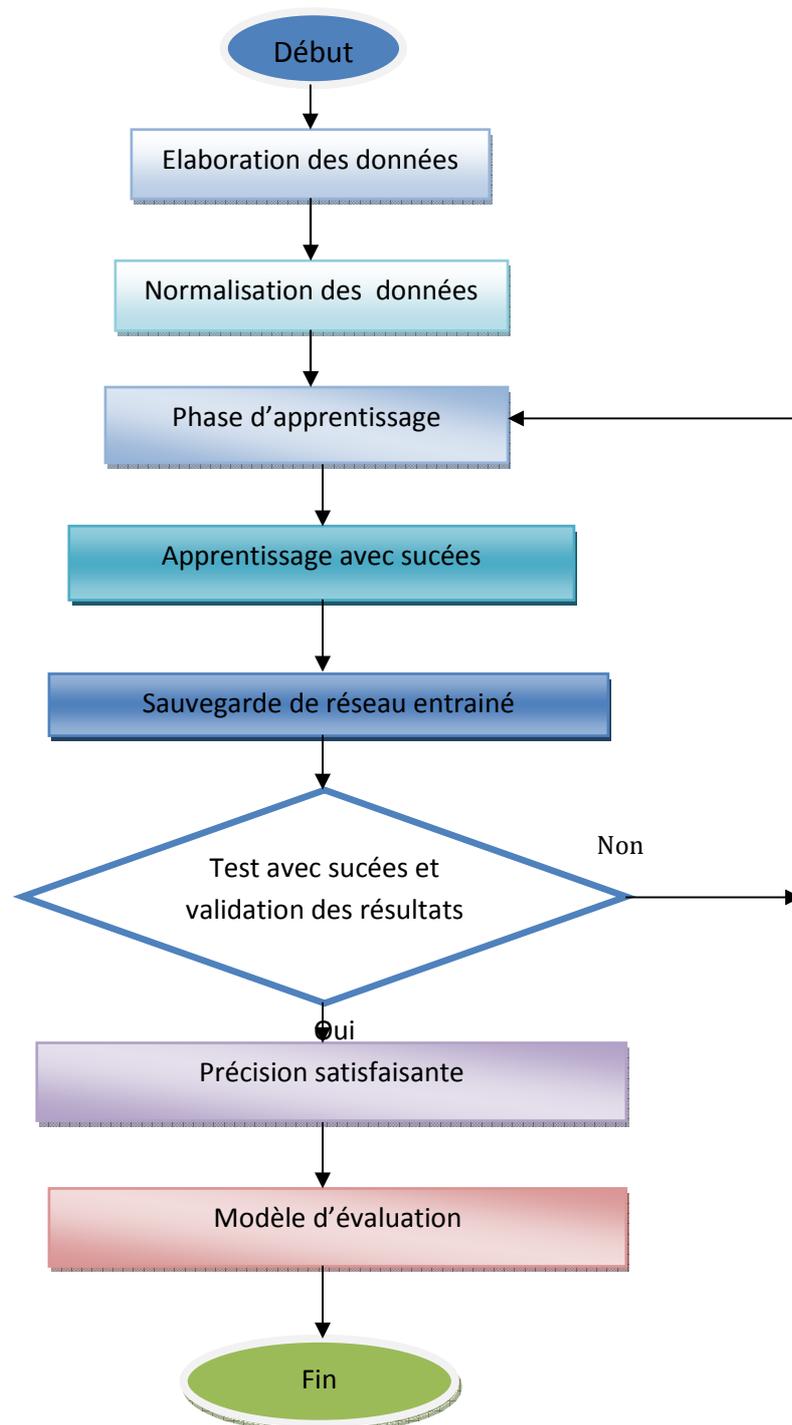


Figure II. 22: Méthodologie de développement du Réseau de neurones artificiels (RNA).

II.14.3 Langage de programmation utilisé

Différents programmes de simulation par réseaux de neurones sont disponibles et commercialisés (Neurone Solution, Brain Maker, Matlab ToolBoxes, Statistica Neural Network, etc.). Le choix du simulateur se fait sur la base des avantages et des

inconvenients de chacun d'eux. Le coût, la flexibilité d'utilisation, le type de plate forme et l'ergonomie de l'interface sont les principaux critères pour évaluer chaque simulateur. Pour des raisons économiques, nous avons choisi le logiciel MATLAB.

Langage de haut niveau et un environnement interactif qui vous permet d'effectuer des tâches de calcul intensif plus rapidement qu'avec d'autres langages.

IL offre un certain nombre de fonctionnalités pour la documentation et le partage de votre travail.

Ce logiciel (**MATLAB**) a été développé pour être utilisé dans un environnement efficace et flexible de simulation pour la recherche et l'application des RNA.

II.15 Conclusion.

Dans ce chapitre nous avons essayé de donner en bref une description sur les réseaux de neurones artificiels, et aussi les différents types d'architectures et ses propriétés. Nous avons aussi présenté une définition de l'apprentissage des réseaux de neurones, puis une description générale de l'algorithme de rétro propagation, et les domaines d'utilisation des réseaux de neurones.

Les réseaux de neurones artificiels ou réseaux connexionnistes sont fondés sur des modèles qui tentent de mimer les cellules du cerveau humain et leurs interconnexions. Le but, d'un point de vue global, est d'exécuter des calculs complexes et de trouver, par apprentissage, une relation non linéaire entre des données numériques et des paramètres.

Parmi les logiciel d'application et simulation de réseau de neurone artificiel est logiciel MATLAB.

CHAPITRE III :

Présentation de la méthode des éléments finis

"Logiciel COMSOL"

Chapitre III : Présentation de la méthode des éléments finis "Logiciel COMSOL"

III.1 Introduction.

L'objectif principal de cette simulation est de déterminer la distribution du potentiel et du Champ électrique le long d'un d'isolateurs en silicone. 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. A cet effet, la méthode des Eléments 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.

III.2 La méthode des éléments Finis (M.E.F).

III.2.1 Définition.

La *M.E.F*, est un outil numérique très puissant, est beaucoup utilisée dans la résolution des problèmes à domaine spatial fini, surtout en mécanique où elle a connu son plus fort développement. Cette méthode a été appliquée avec succès dans les problèmes de calcul de potentiel et de champs électriques.

L'idée de la méthode est de chercher une solution approchée à une équation différentielle après une reformulation sous forme d'identité intégrale appelée forme faible ou variationnelle. Au lieu de chercher à satisfaire l'équation aux nœuds, on décompose ici le domaine en sous domaines appelés éléments finis, et on impose la satisfaction des équations par sous domaine. L'introduction d'une approximation locale par sous domaine (dit élément fini) permet de contourner le problème de complexité des géométries car il suffit alors de choisir une approximation ou une décomposition (maillage) qui respecte la géométrie. (32)

III.2.2 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 choix de la forme de l'élément de 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. Il existe un grand nombre de formes géométriques pour les éléments de maillage tels que :

1. des triangles, des rectangles, des quadrilatères arbitraires pour les problèmes à deux dimensions;
2. des tétraèdres, des hexaèdres, des cubes, des prismes pour des problèmes à trois dimensions.

Sur chacun des éléments issus de la subdivision, la fonction qui modélise le phénomène est définie par une fonction d'interpolation. Souvent, on choisit des polynômes comme fonction d'interpolation pour les variables car ceux-ci sont faciles à intégrer ou à différencier. Le degré du polynôme dépend du nombre de nœuds assignés à chaque élément, de la nature et du nombre d'inconnues à chaque nœud et surtout du degré de dérivabilité des variables apparaissant dans la forme variationnelle associée aux E.D.P du problème avec conditions aux limites. (32)

Ces fonctions d'interpolation permettent alors de donner une approximation du potentiel notée ϕ , sur chaque élément en fonction de ses valeurs aux nœuds de l'élément comme suit :

$$\phi = \sum_{i=1}^{Ne} N_i \cdot \phi_i \quad (III.1)$$

Avec Ne le nombre de nœud d'interpolation, N_i les fonctions d'interpolation ϕ_i et les valeurs nodales du potentiel.

Pour illustrer le principe de la M.E.F, on prend l'exemple de l'équation de Laplace et on cherche à minimiser la quantité R telle que :

$$R = (\nabla^2 \phi) \quad (III.2)$$

Parmi toutes les méthodes qui permettent d'annuler une grandeur dans un domaine Ω , la méthode des résidus pondérés est bien connue et souvent utilisée. Elle consiste à choisir un ensemble de fonctions linéairement indépendantes W_n , appelées fonctions de projection, et annuler ainsi toutes les intégrales sur chacun des éléments finis.

$$I_n = \int_{\Omega} W_n \cdot R \cdot d\Omega \quad (III.3)$$

On obtient ainsi une formulation intégrale forte de la méthode des éléments finis. Par la suite, une intégration par partie permet de diminuer le degré de dérivabilité de potentiel dont on cherche la solution approchée et d'augmenter celui du champ de pondération.

Le choix du degré d'approximation sur l'élément sera alors sur le niveau de continuité requis par cette forme intégrale obtenue par intégration par partie que l'on appelle forme variationnelle ou faible.

La méthode des résidus pondérés conduit à des sous méthodes (Galerkine, moindre carré), selon le choix de la grandeur de pondération. Parmi toutes ces méthodes, la méthode de Galerkine est la plus utilisée. Elle consiste à prendre les mêmes expressions pour les fonctions de projection et les fonctions d'interpolation, ($N_i = W_i$).

L'intégration par partie de l'équation donne :

$$In = \int_{\Omega_e} \mathbf{grad}\varphi \cdot \mathbf{grad}Wn \cdot d\Omega + \int_{S_e} (\mathbf{grad}\varphi \cdot \mathbf{n}) \cdot \mathbf{grad}Wn \cdot d\Omega \quad (III.4)$$

Pour chaque élément, on annule les intégrales In de nombre n qui correspondent aux n fonctions de projection. On obtient un ensemble de n équations à n inconnues formant ainsi un système élémentaire pouvant s'écrire sous la forme matricielle suivante :

$$[Ae]\{\varphi e\} = \{be\} \quad (III.5)$$

La matrice $[Ae]$ est associée à l'élément considéré. Ses coefficients sont fonctions des coordonnées des nœuds de l'élément. Les composantes de $\{\varphi e\}$ sont les inconnues du potentiel électrique aux nœuds du même élément. Le vecteur $\{be\}$ tient compte des éventuelles conditions aux limites présentes sur certains nœuds de l'élément considéré.

En écrivant pour tous les éléments constituant le maillage, on obtient un système d'équations algébriques dont la solution fournit la distribution du potentiel dans le domaine étudié. La résolution du système final est simple puisque les équations obtenues sont linéaires et les matrices ainsi formées sont symétriques. Pour déterminer la distribution du champ électrique, il faut calculer la dérivée du potentiel par une méthode numérique adaptée.

III.2.3 Etapes de la méthode des éléments finis.

Pour une analyse par éléments finis, tout un travail de préparation et de finalisation doit être effectué, c'est ce que nous décrivons dans les étapes suivantes :

- ✓ 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. (33)

Dans la suite de ce travail, nous avons utilisé le logiciel COMSOL Multiphysics version 5.2. Les étapes de résolution peuvent être résumées selon l'organigramme montré dans la figure suivante :

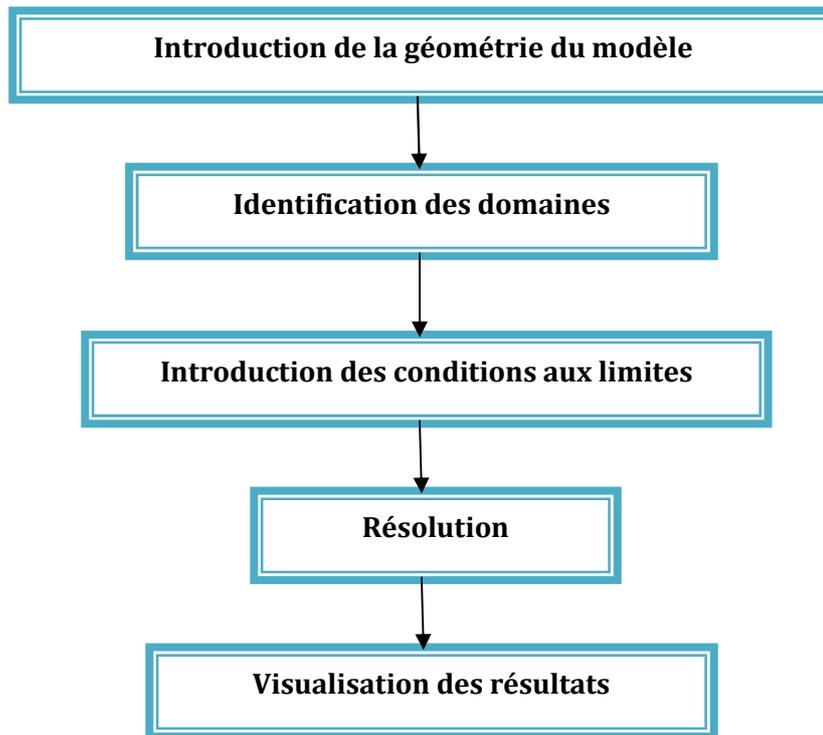


Figure III.1 : Diagramme de différentes étapes de résolution dans Comsol.

III.2.4 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 (III.2) Sur chaque élément nous allons chercher à définir une approximation de la fonction solution. (34)

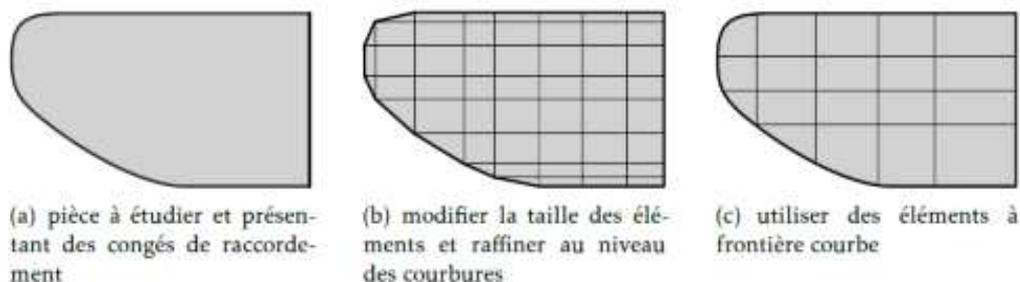


Figure III.2: Erreur de discrétisation géométrique.

III.2.5 Avantages de la M.E.F :

- ❖ La flexibilité est l'un des plus importants avantages de la M.E.F. Les éléments peuvent avoir plusieurs formes variées et peuvent donc s'adapter facilement à n'importe quelles formes géométriques complexes et aussi tenir compte des propriétés inhomogènes et non linéaires des matériaux.
- ❖ Les matrices formant le système final d'équations sont symétriques ce qui simplifie grandement la résolution de celui-ci.
- ❖ La programmation de la méthode est assez simple surtout lorsqu'il s'agit de tenir compte de l'introduction des conditions aux limites.
- ❖ La M.E.F a fait ses preuves dans beaucoup de domaines en ingénierie.
- ❖ De plus, avec son développement important, il existe de très bons logiciels commerciaux qui sont basés sur cette méthode et qui la rendent très accessible, et par conséquent, elle est applicable à beaucoup de problèmes sans que nous connaissions nécessairement la M.E.F en détail. (35)

III.2.6 Inconvénients de la M.E.F :

- ❖ Dans les problèmes de calcul de champs électriques présentant un domaine spatial infini, l'établissement de la frontière artificielle peut causer certaines difficultés dans la réalisation d'un programme simple. D'une part, celle-ci doit être beaucoup plus vaste que le domaine d'étude, ce qui engendre un temps de calcul (en ce qui concerne le maillage) beaucoup plus important que pour des domaines finis. D'autre part, le choix de cette frontière à une grande importance dans la précision des calculs et son influence sur celle-ci doit être pris en compte dans tout programme de ce type.
- ❖ Il a été dit que la M.E.F était une méthode flexible car elle s'adapte facilement aux différentes géométries, mais ce n'est pas le cas du maillage car celui-ci doit être entièrement refait si une modification sur une partie de la géométrie du problème considéré intervient.
- ❖ L'utilisation de la M.E.F pour la résolution d'un problème donné nécessite la connaissance parfaite de la géométrie du problème mais aussi des conditions aux limites ; ce qui n'est pas toujours le cas.
- ❖ Une fois le potentiel connu en chaque nœud, il faut procéder à un autre calcul numérique pour déterminer le champ électrique en tout point ce qui peut engendrer d'autres erreurs (32).

III.2.7 Utilisation d'un logiciel pour la méthode des 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).

Dans notre cas en utilisant le logiciel **COMSOL** pour de nombreuses possibilités offertes suivantes :

- 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. (34)

III.3 Description du logiciel « COMSOL Multyphysics ».

C'est un logiciel conçu par l'entreprise «Comsol » qui est fondée en 1986. Elle se spécialise dans le domaine de développement de logiciels de support technique et de formation spécialisé et de conseil, développé au Royal Institute of Technology (Suède).

Le logiciel est utilisé par plusieurs grandes entreprises à travers le monde. Nous pouvons modéliser et simuler tout système basé sur la physique en utilisant un logiciel de COMSOL. (36)

Le logiciel COMSOL Multiphysics, anciennement appelé FEMLAB, est avant tout un outil de résolution d'équations aux dérivées partielles par éléments finis.

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 (37).

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 dynamiques 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. (38)

III.3.1 Méthodologie de conception avec COMSOL Multiphysics.

Dans notre projet on va passer étape par étape commençant par la création de la géométrie du modèle à concevoir. La modélisation avec COMSOL Multiphysics se résume en 5 étapes : (36)

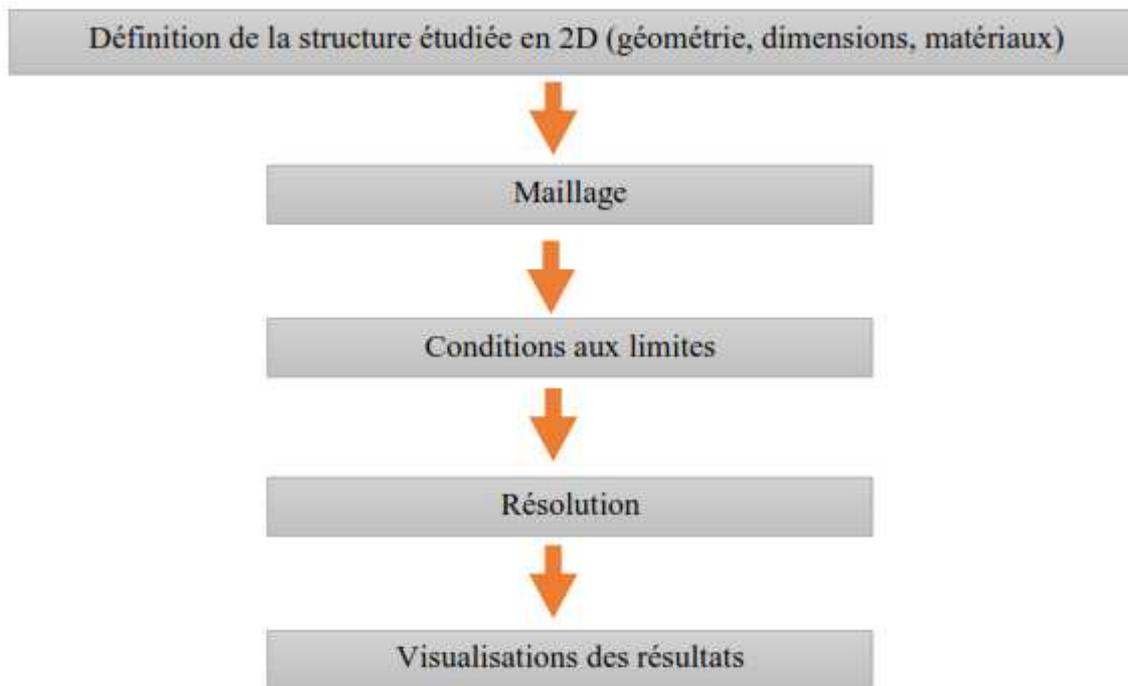


Figure III.3:Diagramme de différentes étapes de résolution dans COMSOL (39).

Les solutions sont obtenues sous forme de graphiques en 2D, courbes ou tableaux de valeurs. Il est important de vérifier que ces solutions ne dépendent pas d'une manière significative du maillage, et qu'elles sont analogues aux résultats obtenus expérimentalement ou rapportés dans la littérature. (36)

III.3.2 L'interface graphique de COMSOL :

Au démarrage du logiciel, le navigateur de modèle apparaît. C'est lui que permettra de spécifier 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 III.4)



Figure III.4:Fenêtre de select space.

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

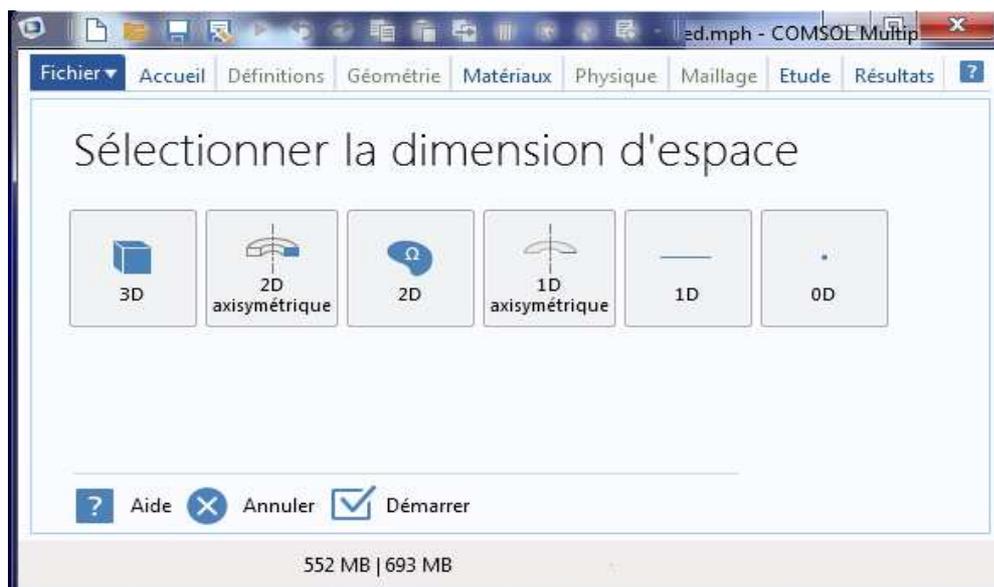


Figure III.5:Fenêtre de « SELECT SPCAE ».

Dans cette étape, on choisi le type de champs physique du modèle (PHYSICS). Pour notre cas on choisi « ELECTROSTATICS » (figure III.6)

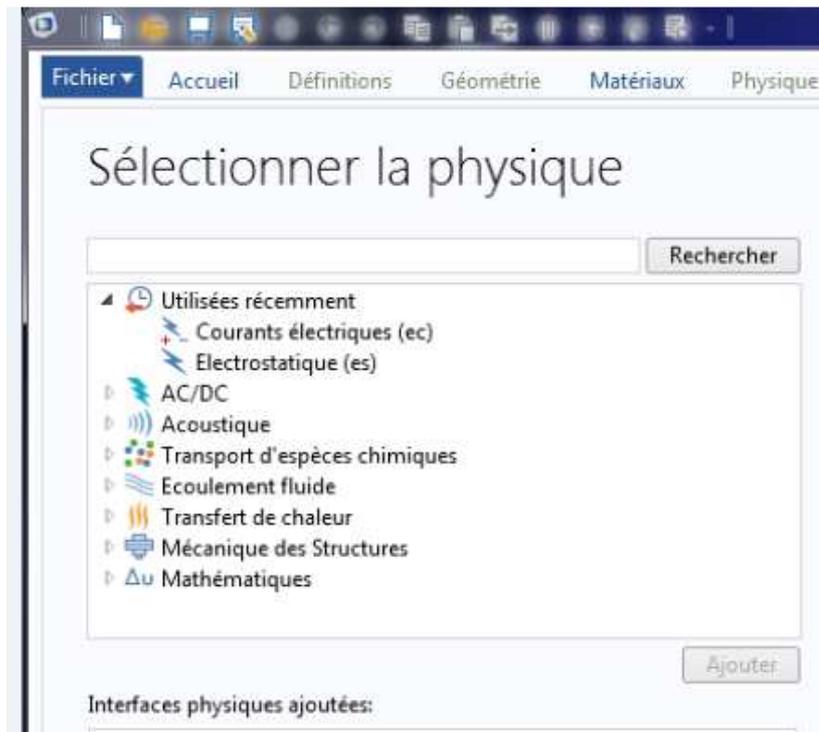


Figure III.6: Fenêtre de « ADD PHYSICS(MODEL) ».

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

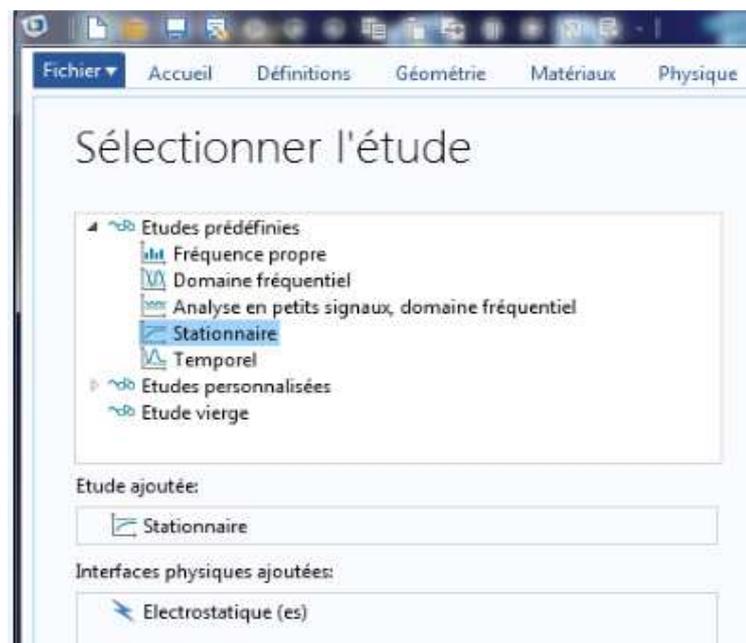


Figure III.7: Fenêtre "SELECT STUDY TYPE".

En suite, on dessine la géométrie de l'élément à simuler à travers des outils de la rubrique « GEOMETRY ». Pour cela, on défini d'abord 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.

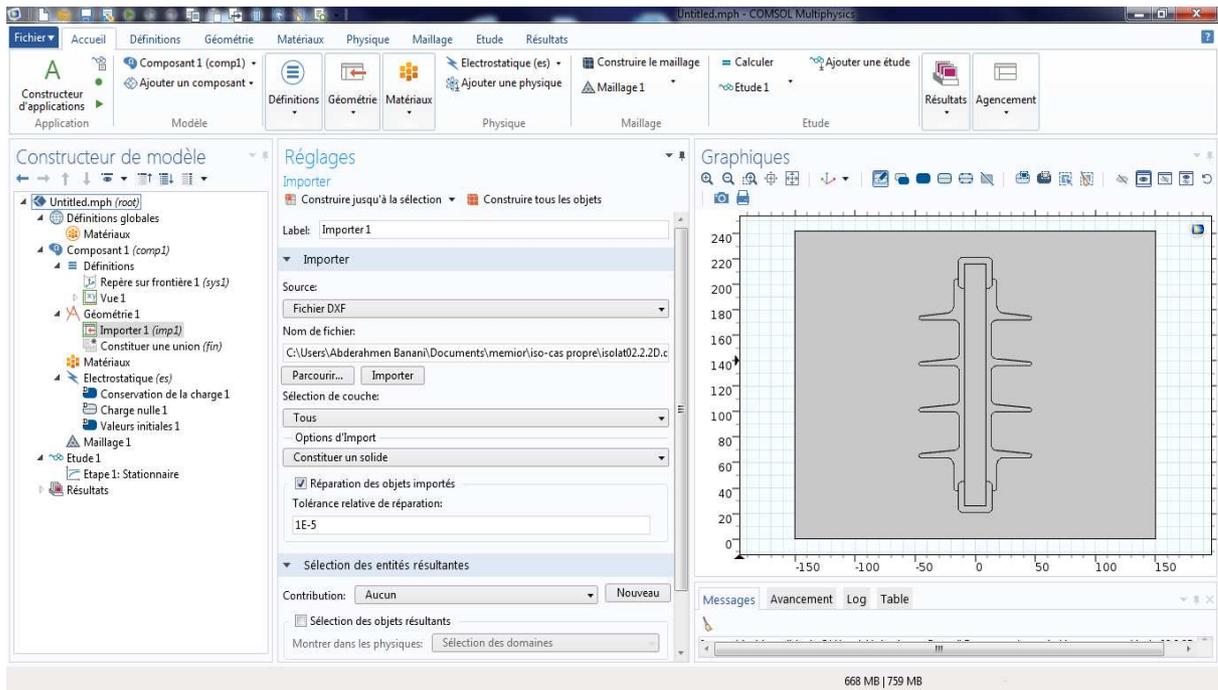


Figure III.8:Géomètre exemple de l'équivalent de l'isolateur.

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

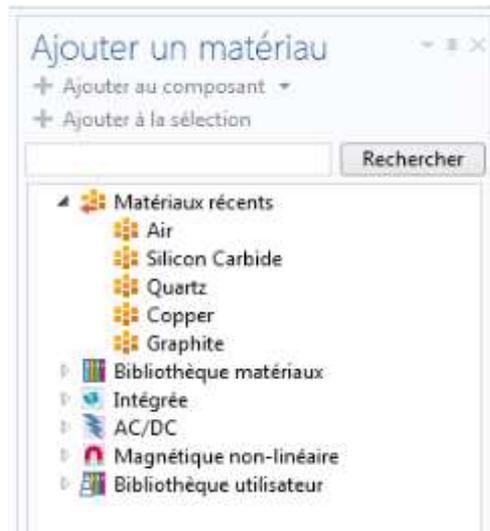


Figure III.9:Matériel exemple de l'équivalent de l'isolateur.

Après, on sélectionne le type de champs physique à utiliser « ELECTROSTATICS ». Dans ce cas on doit préciser l'emplacement de la mise à terre 'GROUND', et la borne haute tension « TERMINAL » où la tension est appliquée.

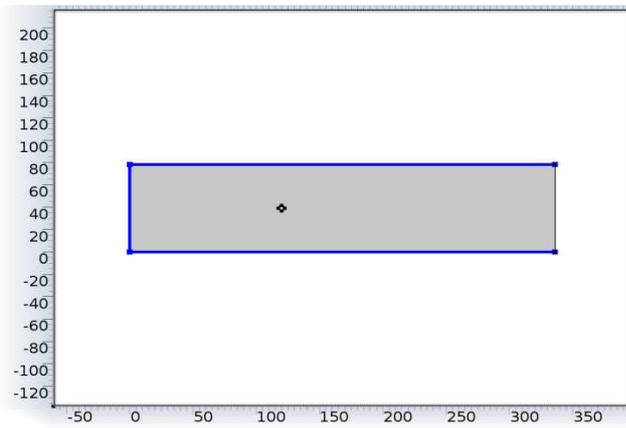


Figure III.10: détermination de physiques.

➤ **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.

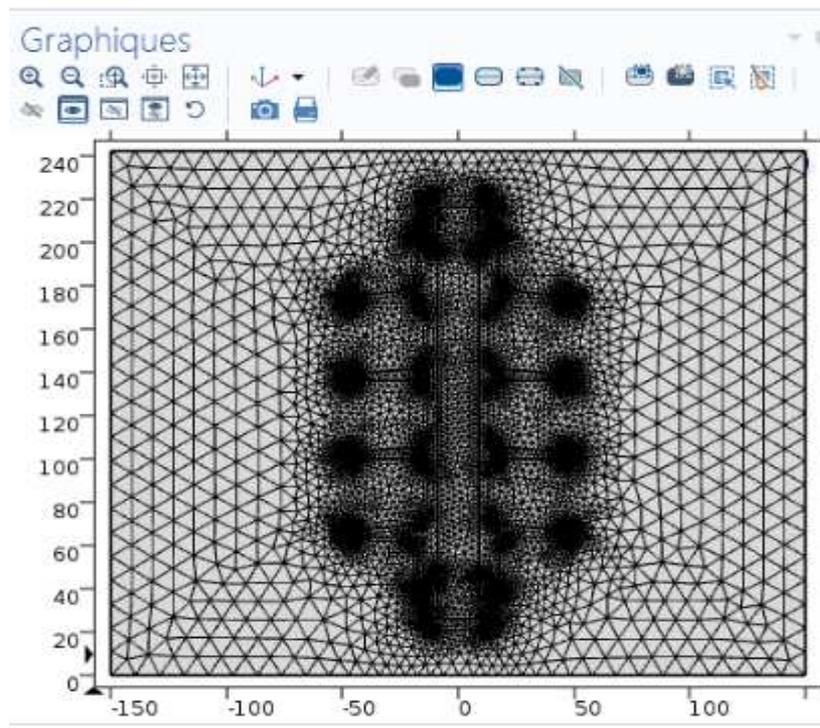


Figure III.11: Le maillage.

➤ **Résolution et visualisation des résultats :**

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 III.12

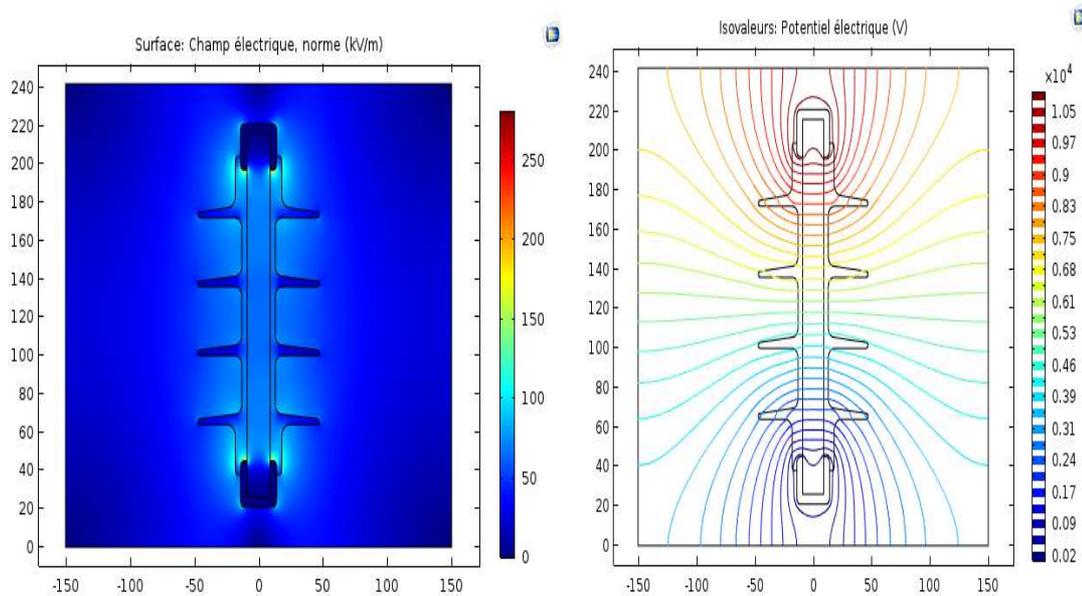


Figure III.12: Résultats de simulation.

III.4 Conclusion.

La détermination de la distribution du champ et du potentiel électriques de tout système de haute tension, est un problème de calcul complexe. Pour remédier à ce problème, la méthode des Eléments Finis était la mieux adaptée aux contraintes imposées par le problème.

Le logiciel COMSOL Multiphysics peut servir d'une manière puissante et interactive à les résoudre en se fondant sur la méthode des éléments finis.

La modélisation et la simulation d'un isolateur peuvent se résumer en cinq étapes successives suivantes:

- ✓ La première étape consiste à définir la géométrie entière de modèle l'isolateur par l'intermédiaire d'une interface graphique de conception.
- ✓ Dans la deuxième étape on définit les conditions aux limites qui se traduisent par le potentiel imposé sur chaque électrode et déterminer les frontières de l'isolation électrique c'est-à-dire les frontières où le champ électrique peut être considéré comme nul.
- ✓ La quatrième étape consiste en la résolution du problème par l'application de la méthode numérique.
- ✓ La dernière étape consiste à l'affichage des résultats obtenus parmi lesquels les équipotentielles, la norme du champ électrique et ses composantes normales et tangentielles, etc. (40)

CHAPITRE IV:

*Calcul et optimisation de la répartition
du potentiel et du champ électrique
le long d'un isolateur (SIR.11KV)*

CHAPITRE IV: Calcul et optimisation de la répartition du potentiel et du champ électrique le long d'un isolateur(SIR.11KV)

IV.1 PARTIE I : Calcul la distribution de potentiel et du champ électrique autour d'un isolateur silicone par la méthode des éléments finis pour différents paramètres géométriques.

IV.1.1 Simulation du modèle réel par COMSOL

L'objectif principal de notre simulation dans cette partie est de déterminer la distribution du potentiel et du champ électrique autour de différents profils géométriques d'un isolateur silicone (SIR.11KV) dans le cas propre, en utilisant la méthode des éléments finis par l'intermédiaire de logiciel(COMSOL).

IV.1.2 Modèle de l'isolateur étudié

Dans ce travail, les simulations numériques sont réalisées sur le modèle isolateur polymère (SIR en caoutchouc de silicone) de quatre ailettes 11kV, cet isolateur utilisé actuellement dans les réseaux de la SONEGZ.

Ce modèle a été sélectionné pour calculer la distribution de potentiel et du champ. L'isolateur est composé de trois matériaux principaux comme illustré dans la figure (IV.1).

1. Tige centrale : matériau isolant porteur (en quartez)
2. Matériau Isolant : en caoutchouc de silicone recouvre le cœur et construire les ailettes.
3. Pièces métalliques : Extrémités métalliques (en cuivre)

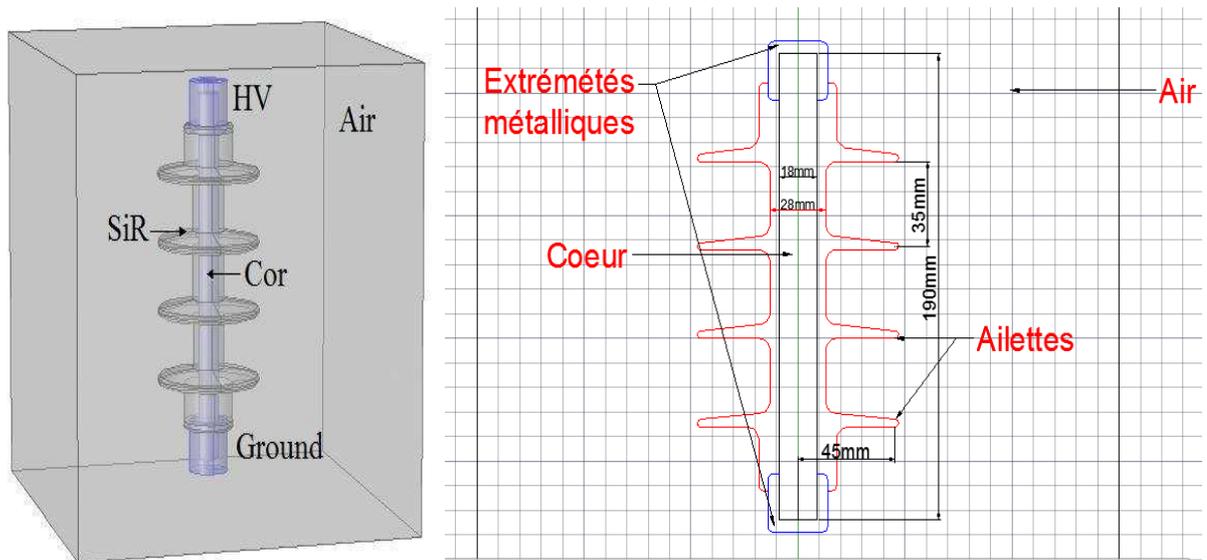


Figure IV.1:Géométrie et caractéristiques dimensionnelles de l'isolateur en silicone (SIR.11KV)

IV.1.3 Identification des domaines de l'isolateur

Nous avons définie les différents domaines de l'isolateur étudié dans (COMSOL) en introduisant pour chaque matériau : la permittivité relative ϵ_r et la conductivité électrique σ .

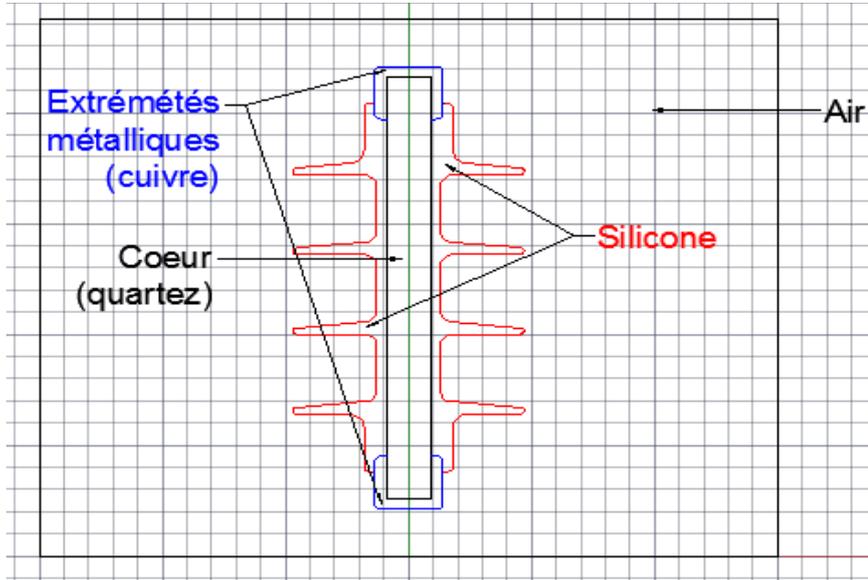


Figure IV.2: Différents domaines de l'isolateur (SIR.11KV)

Domaine	Permittivité relative ϵ_r	Conductivité électrique σ (S/m)
Air	1	$1 \cdot 10^{-13}$
Extrémétés métalliques (Cuivre)	1	$26.31 \cdot 10^6$
Tige centrale (quartz)	7.1	$1 \cdot 10^{-13}$
Silicone	2.9	$1 \cdot 10^{-13}$

Tableau IV.1: propriétés électriques des matériaux.

IV.1.4 Conditions aux limites

Pour le cas étudié, nous avons pris comme conditions aux limites pour l'électrode haute tension un potentiel constant de valeur 11kV et celui de l'électrode inférieure un potentiel nul (masse).

IV.1.5 Maillage des domaines :

Concernant le maillage, la densité des éléments finis est importante pour les régions critiques (proches de la surface de l'isolateur) où une plus grande précision est exigée, car les propriétés électriques des matériaux sont très changeantes.

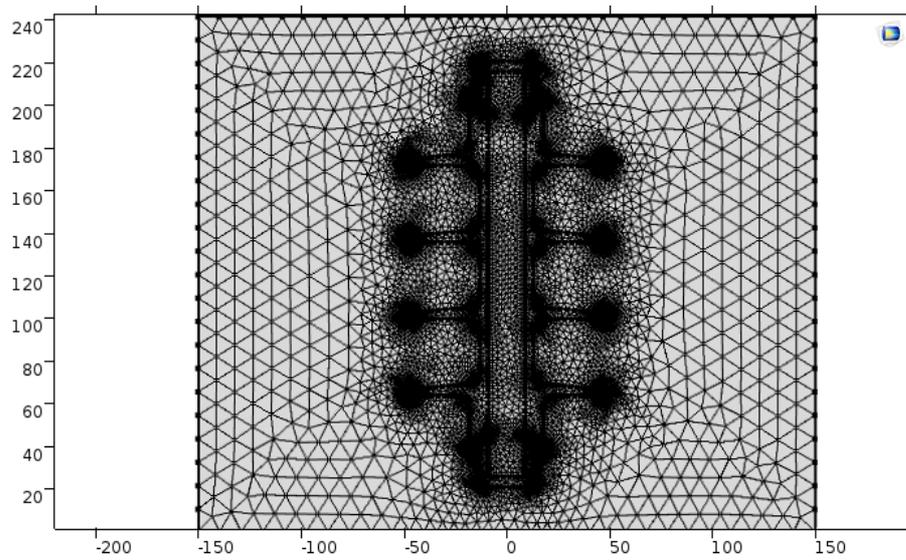
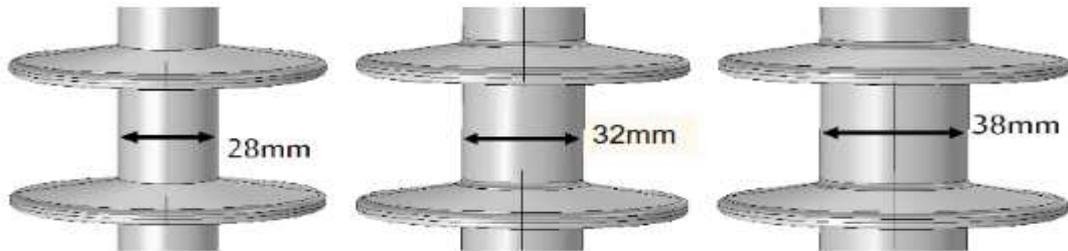
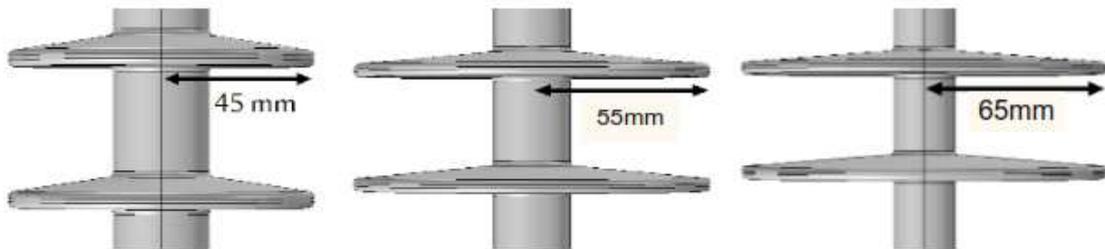


Figure IV.3: Maillage de l'isolateur (SIR.11KV)

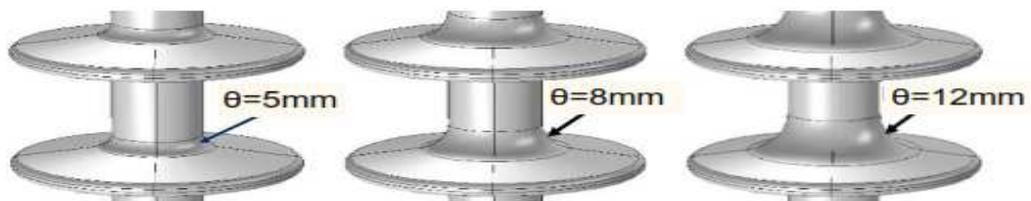
IV.1.6 Différentes modifications des paramètres géométriques étudiés :

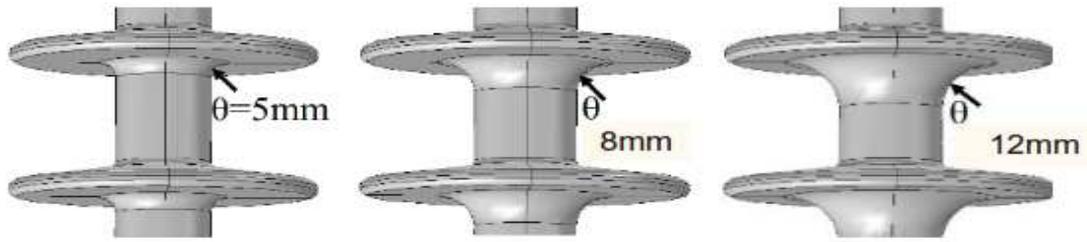


a) Modifications du diamètre de la tige.



b) Modifications du rayon des ailettes (disques).





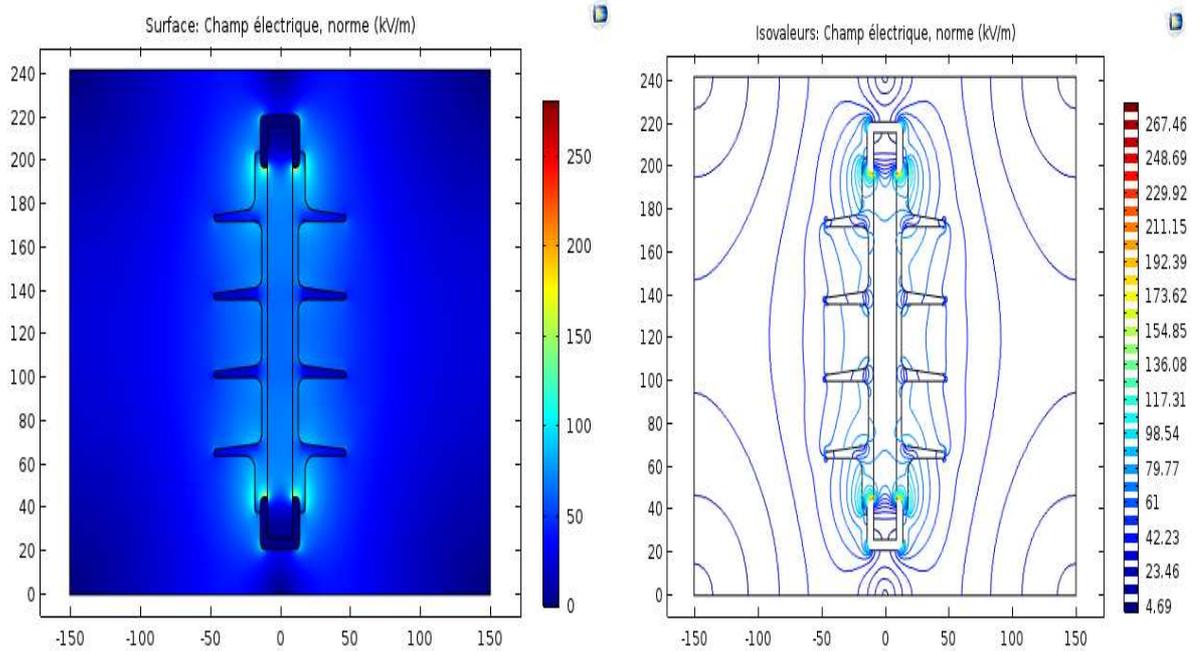
c) Modifications du rayon des congés de raccordement (inclinaison).



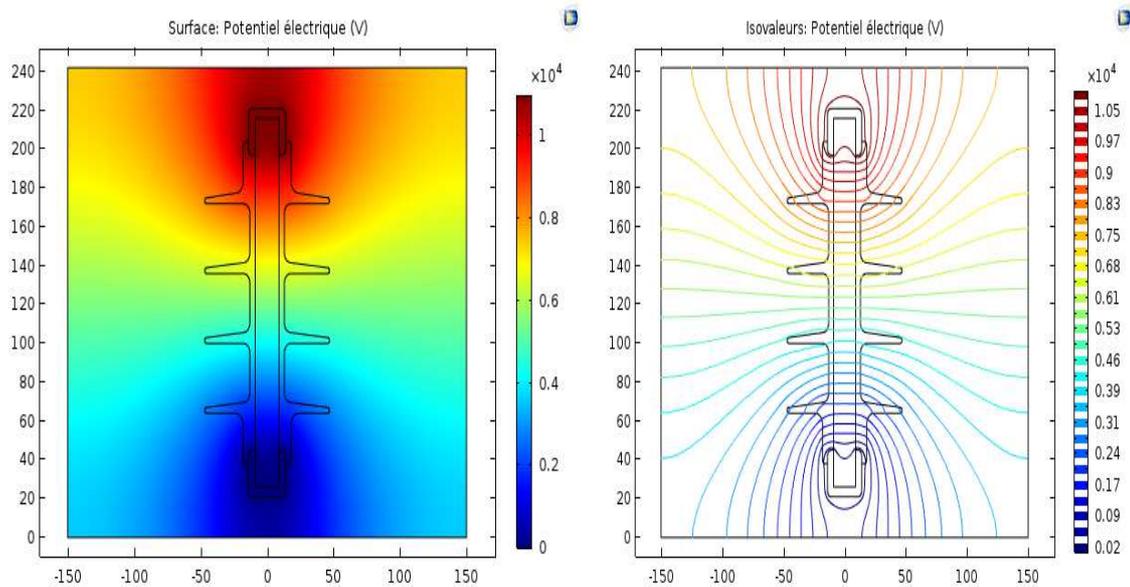
d) Modifications de la distance entre la pièce métallique et l'ailette.

Figure IV.4: Différentes modifications géométriques étudiés.

IV.1.6.1 Résultats de calcul du potentiel et du champ électrique :



(a)



(b)

Figure IV.5: distribution de potentiel et de champ électrique autour de l'isolateur(SIR.11KV)

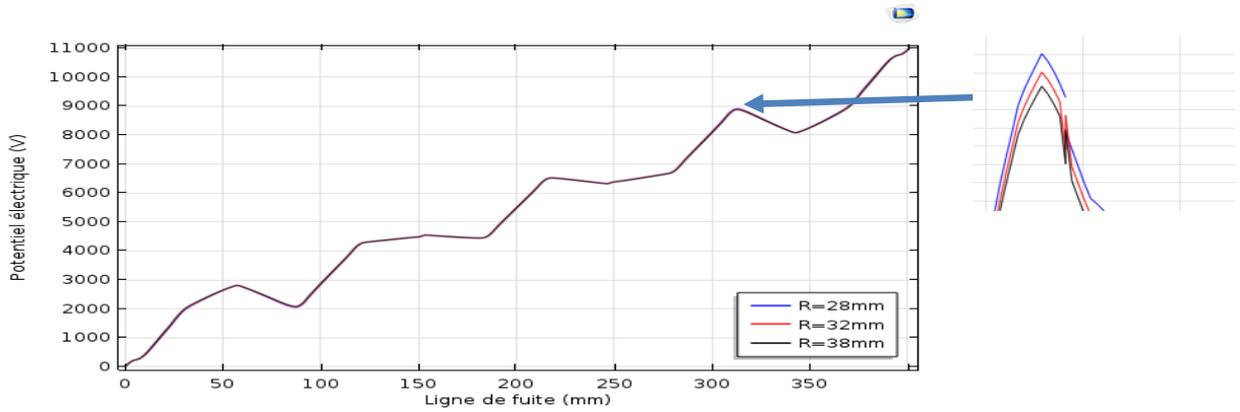
- La figure IV.5-(a) représente la cartographie globale et la distribution des lignes du champ électrique sur la surface d'un isolateur propre, une forte concentration des lignes de champ a été observée autour d'électrode haute tension.

- La figure IV.5-(b) représente les distributions totales du potentiel électrique sur la surface d'un isolateur propre. On voit clairement que les lignes équipotentielles sont concentrées autour d'électrode haute tension et d'électrode basse tension

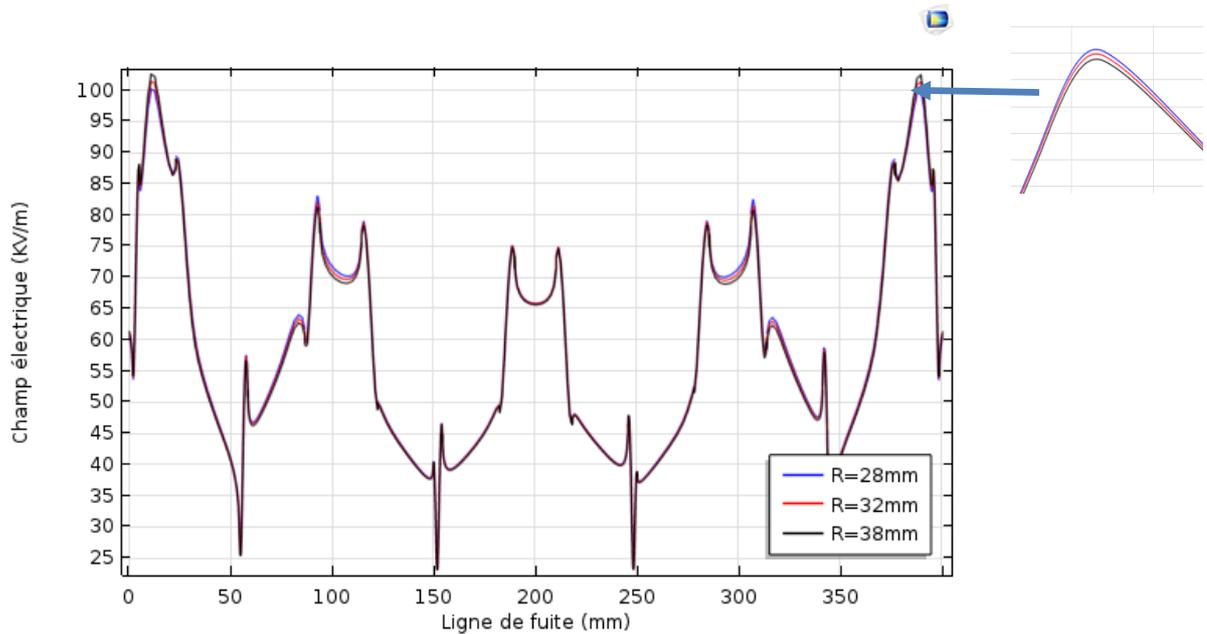
1) Influence de diamètre de la tige central :

La figure IV.6-(a) représente la répartition du potentiel électrique le long de la ligne de fuite de l'isolateur en fonction des modifications géométriques sur le diamètre de la tige centrale.

La figure IV.6-(b) montre la variation du champ électrique le long de la ligne de la fuite de l'isolateur pour différentes modifications géométriques sur le diamètre de la tige centrale.



(a)



(b)

Figure IV.6: Influence de rayon de cœur sur le potentiel et le champ électrique.

✓ **Analyse :**

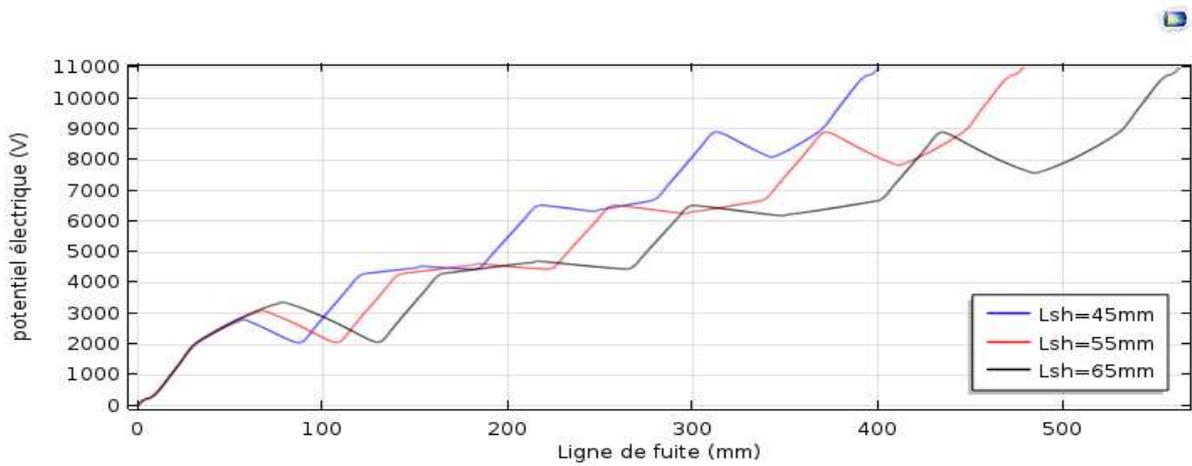
- La distribution de potentiel électrique dans ce cas a des changements négligeables pour les différentes modifications géométriques sur le diamètre de la tige centrale comme illustré à la Figure IV.6-(a).
- Le champ électrique à proximité des électrodes diminue avec l'augmentation du diamètre du noyau tandis que dans le milieu de l'isolateur, le champ électrique a tendance à augmenter avec l'augmentation du diamètre de la tige central, comme indiqué dans la figure IV.6-(b).

2) Influence du rayon des ailettes (disque):

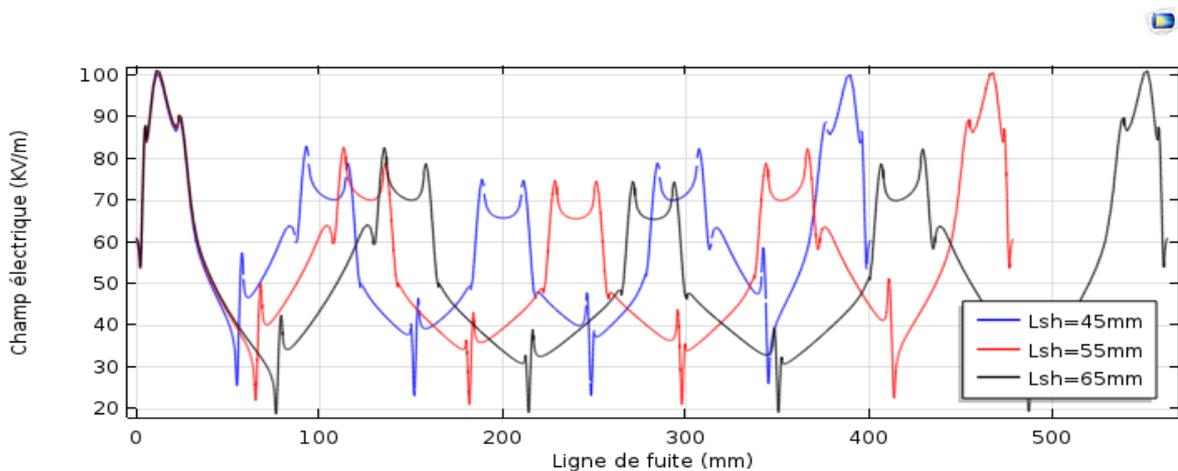
Le rayon est varié avec des valeurs de 45 mm, 55 mm et 65 mm pour observer l'effet de ce paramètre sur la distribution du potentiel et du champ électrique autour de l'isolateur.

La figure IV.7-(a) représente la distribution du potentiel électrique en fonction de la ligne de fuite de l'isolateur, pour différentes modifications géométriques sur le rayon des ailettes (disques).

La figure IV.7-(b) montre la comparaison de l'intensité du champ électrique le long de la ligne de fuite de l'isolateur pour les différentes modifications géométriques sur le rayon des ailettes (disques).



(a)



(b)

Figure IV.7: Influence de rayon des ailettes (disque) sur le potentiel et le champ électrique.

✓ **Analyse :**

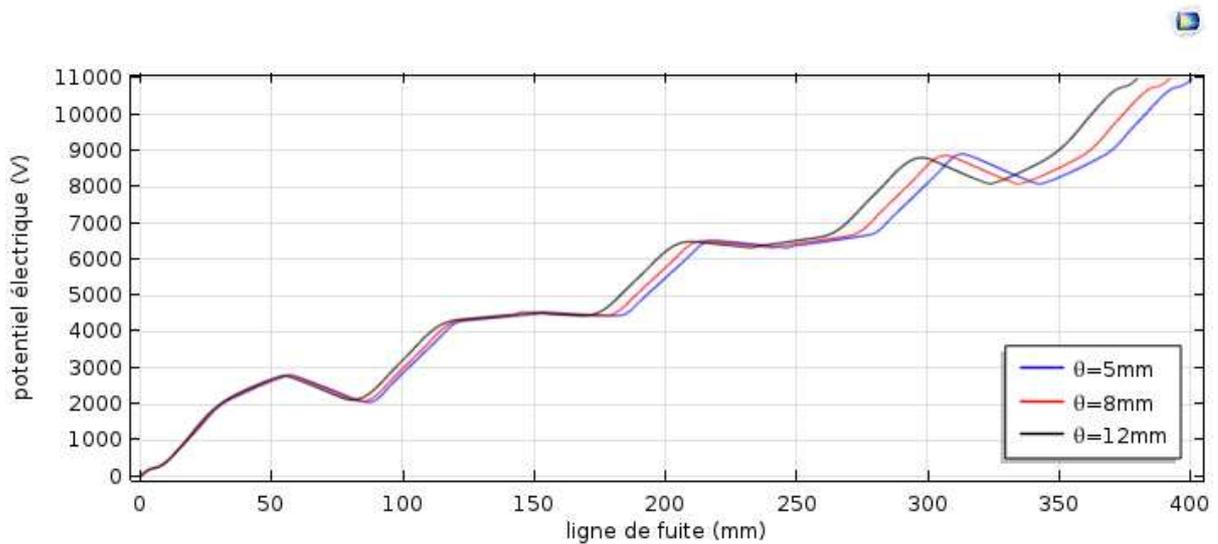
- Le plus grand rayon des ailettes donne généralement la plus haute tension et intensité du champ électrique.
- Cependant, au premier coin extérieur d'ailette, l'intensité du champ électrique diminue à mesure que le rayon d'ailette augmente.

3) Influence du rayon des congés de raccordement (inclinaison):

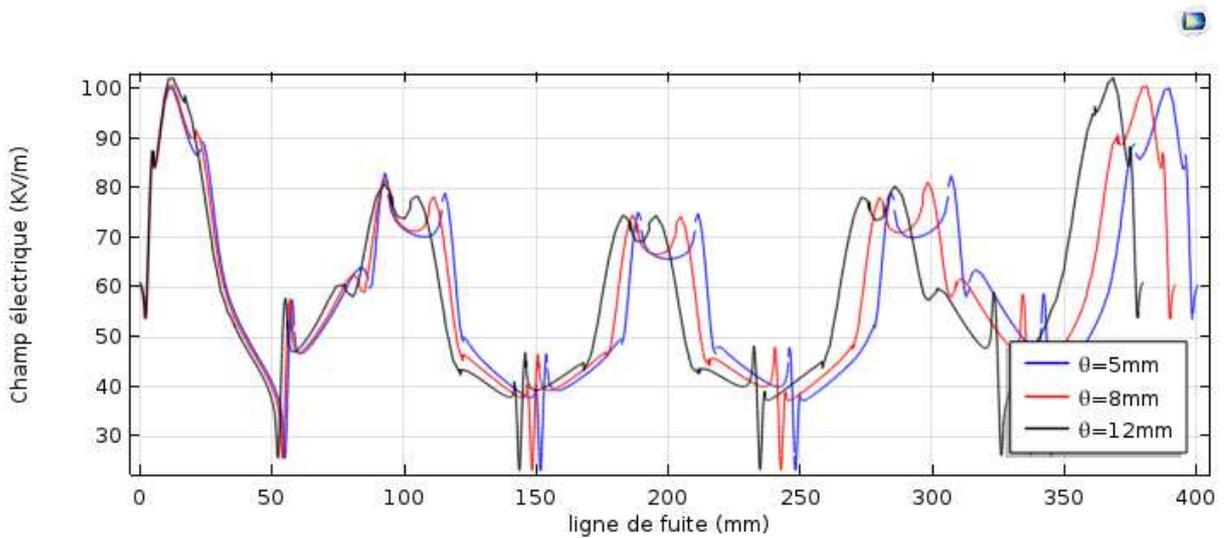
Le rayon des congés de raccordement de l'isolateur (SIR. 11 kV) est varié avec des valeurs de 5, 8 et 12mm pour étudier la distribution du potentiel et du champ électrique.

La Figure IV.8-(a) représente la comparaison des distributions du potentiel obtenu avec un isolateur propre pour différentes modifications géométriques sur le rayon des congés de raccordement.

La Figure IV.8-(b) montre la variation de l'intensité du champ électrique le long de la ligne de fuite de l'isolateur pour différentes modifications géométrique sur le rayon des congés de raccordement.



(a)



(b)

Figure IV.8: Influence du rayon des congés de raccordement (inclinaison) sur le potentiel et le champ électrique.

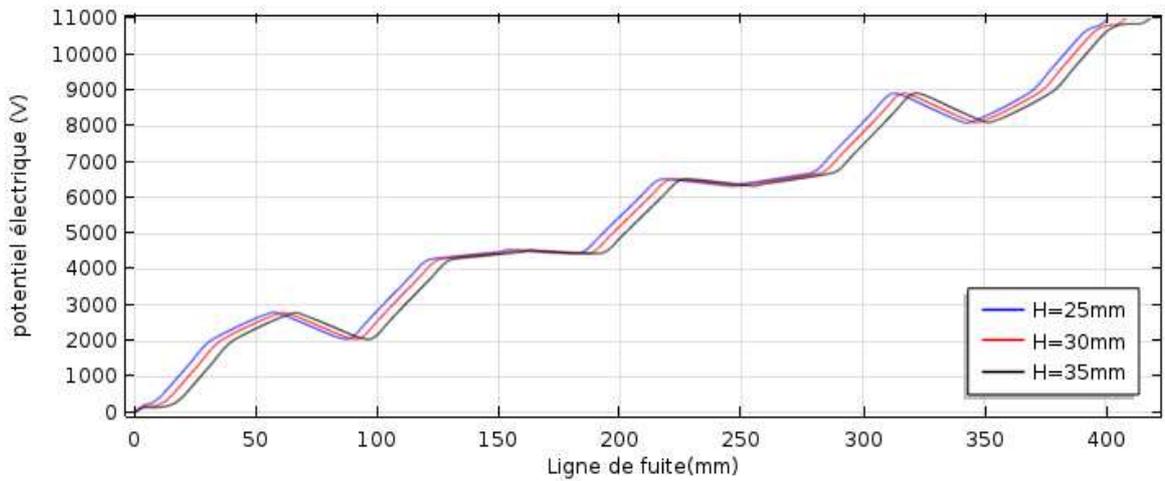
✓ **Analyse :**

- L'augmentation de l'intensité du champ électrique et de la tension à proximité des électrodes avec l'augmentation du rayon des congés de raccordement (inclinaison).
- A l'inverse, au milieu de l'isolateur, le potentiel et le champ électrique ont tendance à diminuer avec l'augmentation du rayon des congés de raccordement (inclinaison) des ailettes.

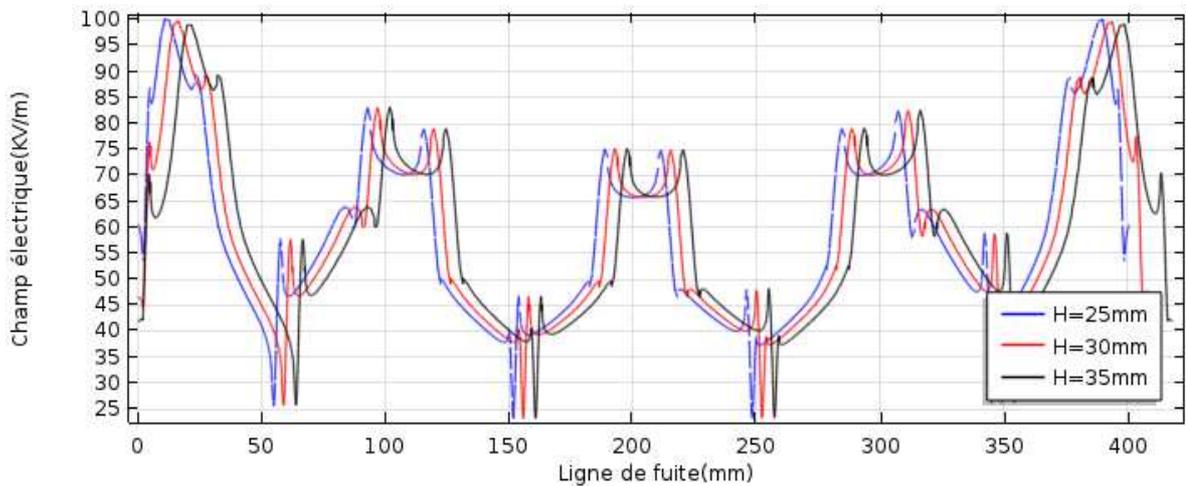
4) Influence de la distance entre l'extrémité métallique et l'ailette :

La figure IV.9-(a) illustre la distribution du potentiel électrique le long de la ligne de fuite de l'isolateur pour différentes modifications géométriques de la distance entre l'extrémité métallique et l'ailette.

La figure IV.9-(b) illustre la comparaison des variations du champ électrique le long de la ligne de fuite de l'isolateur en fonction différentes modifications géométriques sur la distance entre l'extrémité métallique et l'ailette.



(a)



(b)

Figure IV.9: Influence de la distance entre l'extrémité métallique et l'ailette sur le potentiel et le champ électrique.

✓ **Analyse :**

D'après la Figure (IV.9) : la distance la plus élevée entre l'extrémité métallique et l'ailette donne généralement un champ électrique et une tension plus faibles tandis que la distance la plus courte donne l'augmentation la plus élevée de la tension et de le champ électrique ainsi que. On peut donc conclure de la Figure 9(b) qu'au fur et à mesure que la distance entre l'extrémité métallique et l'ailette augmente, l'intensité du champ électrique à premier ailette a diminué.

IV.2 PARTIE II : Optimisation du profil des isolateurs silicones par la technique des réseaux de neurones artificiels.

Après avoir vu dans la première partie de ce chapitre, l'influence des paramètres géométriques de l'isolateur sur les valeurs maximales du champ électrique. Dans cette partie, nous allons appliquer les RNA pour la prédiction de la valeur du champ maximal en fonction des paramètres géométriques de l'isolateur silicone(SIR).

IV.2.1 Procédure de la modélisation neuronale

L'objectif de la modélisation est de trouver, à partir des données ou des mesures disponibles, une relation déterministe, si elle existe, entre les variables d'entrées du modèle x_i et la grandeur à modéliser y .

La procédure de développement d'un réseau de neurones qui répond à une modélisation statique peut se résumer aux points suivants :

1. Sélection des données ;
2. Collecte des données;
3. Séparation des bases de données ;
4. Normalisation des données;
5. Choix du type de réseau de neurones ;
6. Choix du nombre de neurones dans la couche cachée ;
7. Choix de la fonction de transfert ;
8. Estimation des paramètres ou apprentissage ;
9. Validation et généralisation (41).

IV.2.1.1 Sélection des données

L'ensemble des variables d'entrée soit aussi réduit que possible en effet, à chaque entrée du modèle correspond un nombre de paramètres égal lorsqu'on conçoit un modèle à partir des mesures.

Avant la conception d'un modèle neuronale, il convient donc de procéder à une sélection des entrées. Cette sélection revêt deux aspects :

- Réduction de la dimension de l'espace de représentation des variables du modèle,
- Elimination des entrées qui n'ont qu'une faible influence sur la sortie.

IV.2.1.2 Collecte des données

Une fois les entrées pertinentes du modèle sont bien connues, l'objectif de cette étape est de les recueillir, à la fois pour développer le réseau de neurones et pour le tester. La

base de donnée reconstituée doit être représentative des données susceptibles d'intervenir en phase d'utilisation du système neuronal.

Le choix des variables d'entrée et de sortie basé sur la banque des données collecté de la littérature.

IV.2.1.3 Séparation des bases de données

Afin de développer un modèle neuronal, il est nécessaire de disposer d'au moins deux bases de données : une base pour effectuer l'apprentissage et une autre pour valider le réseau obtenu et déterminer ses performances. On peut utiliser une troisième base de données, si elle est disponible, pour tester le réseau. L'essentiel, est que la base de données consacrées à l'apprentissage doit être la plus importante.

IV.2.1.4 Normalisation des données

Avant tout apprentissage, il est indispensable de normaliser et de centrer toutes les variables d'entrée. En effet, si des entrées ont des grandeurs très différentes, celles qui sont petites n'ont pas d'influence sur l'apprentissage. Il existe plusieurs approches de normalisation des données dont le choix dépend de la nature des données et de la fonction à approximer.

Les données d'entrée et de sortie sont normalisées de deux manières différentes. Dans le premier procédé, les valeurs maximales de l'entrée et la sortie sont déterminées en premier :

$$n_{imax} = \max(n_i(p)) \quad (IV.1)$$

Et $O_{kmax} = \max(O_k(p)) \quad (IV.2)$

Puis les variables normalisées d'entrée et de sortie sont données par:

$$n_{i,nor(p)} = n_i(p) / n_{imax} \quad (IV.3)$$

$$O_{i,nor(p)} = O_k(p) / O_{kmax} \quad (IV.4)$$

Dans le second procédé, les valeurs normalisées des entrées et des sorties sont déterminées par :

$$n_{i,nor(p)} = (n_i(p) - n_{imin}) / (n_{imax} - n_{imin}) \quad (IV.5)$$

$$O_{k,nor(p)} = (O_k(p) - O_{kmin}) / (O_{kmax} - O_{kmin}) \quad (IV.6)$$

Avec

$$n_{i,min} = \min(n_i(p)). \quad (IV.7)$$

Et $O_{kmin} = \min(O_k(p)) \quad (IV.8)$

Après la normalisation, les entrées et les sorties sont comprises entre 0 et 1.

IV.2.1.5 Choix du type de réseau de neurones

Comme il s'agit d'une modélisation statique pour approcher une fonction bornée et continue, la meilleure approche neuronale envisageable est celle des MLP à une seule couche cachée.

IV.2.1.6 Choix du nombre de neurones dans la couche cachée

Il n'existe pas de règle permettant de prévoir à l'avance le nombre de neurones dans la couche cachée. On pourrait penser qu'en plaçant un grand nombre de neurones dans la couche cachée, on obtiendrait systématiquement de meilleurs résultats. Mais il convient de prendre garde d'une part du temps de calcul, d'autre part du risque du sur apprentissage ou du sous apprentissage lorsque leur nombre est insuffisant.

IV.2.1.7 Choix de la fonction de transfert

La fonction de transfert neuronale, que l'on appelle aussi fonction d'activation, est la fonction mathématique appliquée à la sortie de chaque neurone. Là encore, il n'existe pas de méthode permettant de prévoir a priori quelle sera la fonction qui donnera les meilleurs résultats. Mais pour les **MLP**, il faut des fonctions de type sigmoïde pour les neurones de la couche cachée et généralement une fonction linéaire pour le neurone de la couche de sortie.

IV.2.1.8 Estimation des paramètres ou apprentissage

Pour les modélisations statiques au moyen des **MLP**, il s'agit de faire un apprentissage supervisé. Le critère d'arrêt de l'apprentissage est souvent calculé à partir d'une fonction de coût, caractérisant l'écart entre les valeurs de sortie obtenues et les valeurs désirées. Ce qui permet un arrêt adéquat de l'apprentissage pour obtenir de bonnes performances de généralisation.

IV.2.1.9 Validation et généralisation

La validation consiste à tester le réseau après ou au cours de l'apprentissage avec des données proches des données utilisées lors de la phase d'apprentissage. Les résultats de ce test permettront au modèle d'éviter les situations de sous ou de sur apprentissage. En revanche la généralisation s'effectue avec des données tout à fait nouvelles et différentes de la base de données de départ. Elle permet de savoir si le réseau a développé une capacité de généralisation assez performante.

IV.2.2 Modèle de réseaux de neurones

Pour la mise en œuvre de notre modèle à base des réseaux de neurones, il faut définir:

1. La base de données: Nous utilisons deux différentes bases de données

La première est utilisée pour l'apprentissage du réseau et la deuxième pour la validation des résultats.

2. Définition des entrées et sorties :

La sortie : La valeur de champ électrique maximal le long de l'isolateur

Les entrées : le rayon des ailettes (disque) [**R**], Le rayon des congés de raccordement (inclinaison) [**θ**], la distance entre l'extrémité métallique et l'ailette [**H**].

Tension (KV)	Entrées			Sorties
	R (mm)	H (mm)	θ (mm)	E (KV/m)
11	45	25	5	100.14
11	45	25	8	100.5
11	45	25	12	102.2
11	45	30	5	99.6
11	45	30	8	100.06
11	45	30	12	101.6
11	45	35	5	99.23
11	45	35	8	100
11	45	35	12	101.13
11	55	25	5	100.7
11	55	25	8	100.99
11	55	25	12	102.56
11	55	30	5	100.15
11	55	30	8	100.6
11	55	30	12	102.08
11	55	35	5	99.72
11	55	35	8	100.53
11	55	35	12	101.62
11	65	25	5	101.07
11	65	25	8	101.4
11	65	25	12	102.98
11	65	30	5	100.57
11	65	30	8	101.08
11	65	30	12	102.55
11	65	35	5	100.17
11	65	35	8	100.99
11	65	35	12	102.05

 20 Données d'apprentissage.

 07 Données de validation.

Tableau IV.2: base de données (données d'apprentissage /données de validation)

IV.2.3 Visualisation des résultats et analyse

IV.2.3.1 Les paramètres du modèle des RNA

Après la création du réseau en utilisant logiciel Matlab, il nous reste de définir le nombre des couches cachées et le nombre des neurones par couche. Afin de déterminer les meilleurs paramètres du réseau (nombre de neurones cachés, nombre des couches cachées) qui donne une prédiction satisfaisante, nous avons fait une série de tests pour le nombre des neurones cachés vaut de 20 neurones, pour des couches cachées variant entre 2 à 5 qui sont régit par des itérations de 140.

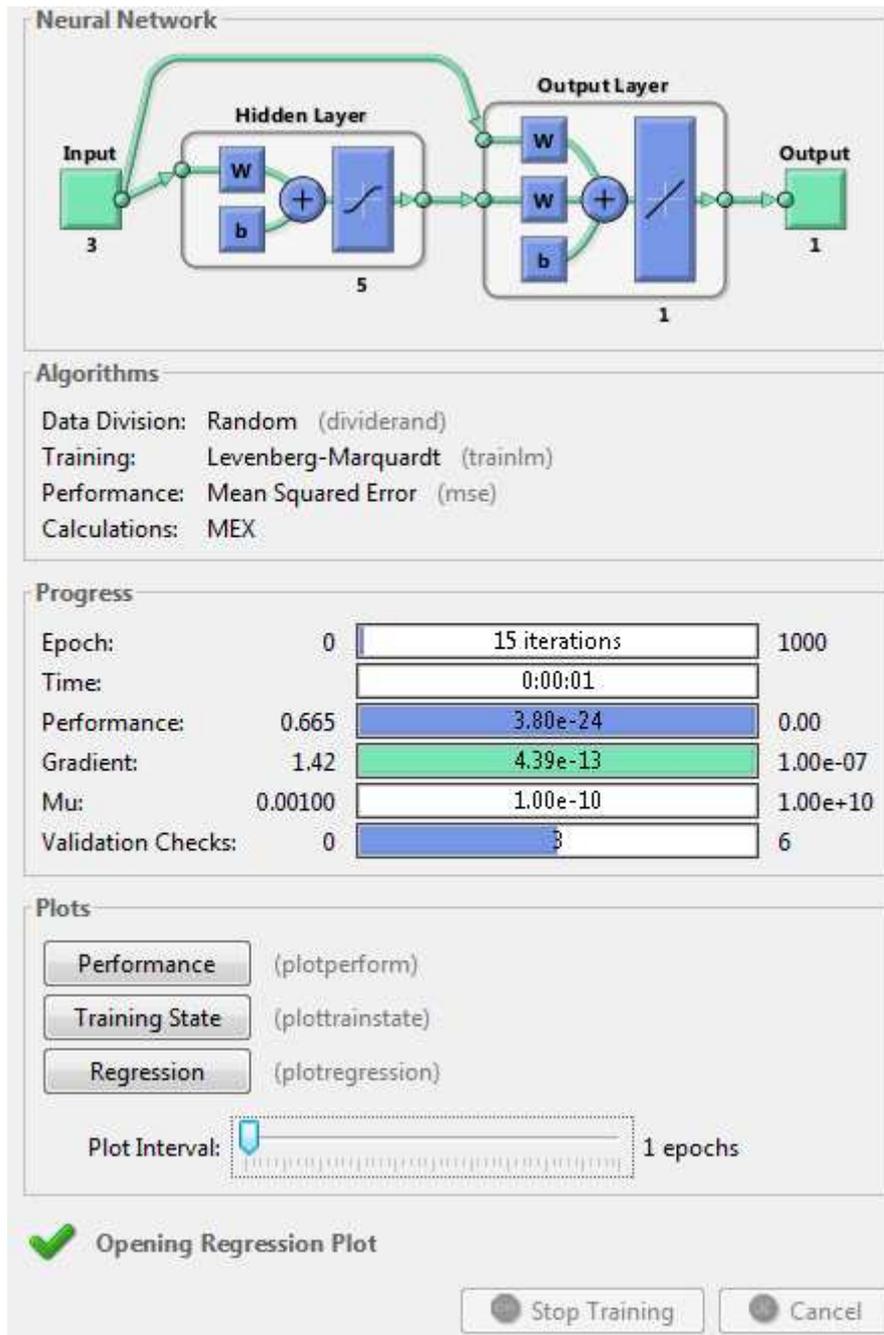


Figure IV: 10: La structure du RNA adoptée.

La sélection des paramètres convenables du réseau des neurones se basant sur le terme d'erreur calculé. Après une série d'apprentissage des différents réseaux choisis, nous avons préféré le réseau à 3 couches avec 20 neurones dans les couches cachées 5 et 1 neurone pour la couche de sortie.

En analysant ces résultats, alors notre réseau a la configuration suivante :

- Nombre des couches cachées (**05 couches**).
- Nombre des neurones des couches cachées (**20 neurones**).
- Nombre des neurones de la couche de sortie (**1 neurone**).
- Fonction d'activation des couches cachées (**fonction sigmoïde**).
- Fonction d'activation de la couche de sortie (**fonction linéaire**).
- Trainlm: l'algorithme d'apprentissage.
- Nombre d'itération : **140**
- Coefficient d'apprentissage : **$\alpha=0.2$**

IV.2.3.2 Résultats de l'apprentissage.

Dans l'apprentissage des réseaux neurones nous avons utilisé 27 vecteurs données d'entrée/sortie, les données d'entrées sont les caractéristiques géométriques de l'isolateur :

Le rayon des ailettes (disque) [R], Le rayon des congés de raccordement (inclinaison) d'ailette [θ], la distance entre l'extrémité métallique et l'ailette [H]. Et la sortie est la valeur de champ électrique maximal autour de l'isolateur calculé par la méthode des éléments finis.

La Figure(IV.10) montre le résultat de l'apprentissage des RNA, en présentant une comparaison entre le champ maximal normalisé calculé par la méthode des éléments finis et celui donné par le modèle des réseaux neurones, on remarque une très bonne concordance entre les deux modèles de calcul ce qui montre le bon choix des paramètres et la structure des réseaux de neurones.

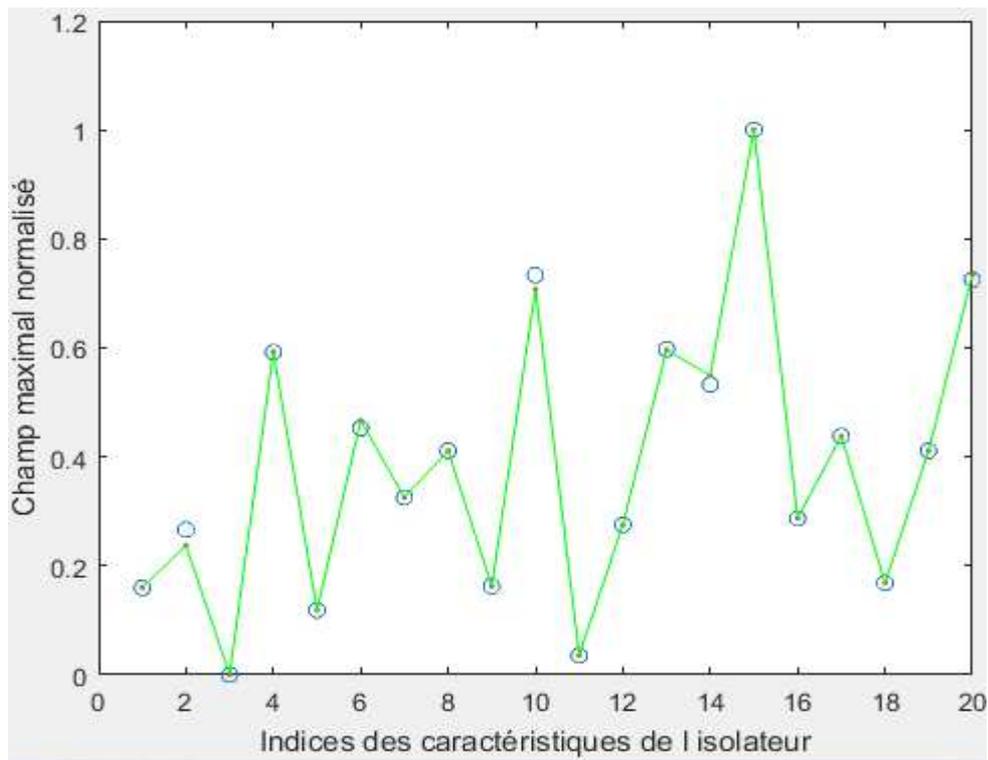


Figure IV.11: Comparaison des champs électrique calculées par COMSOL et celles données par le modèle de réseau neurone pour l'apprentissage.

Dans la Figure(IV.11) nous donnons la variation de l'erreur absolue moyenne entre le résultat désiré et celui calculé par le modèle des RNA pour chaque vecteur d'entrée.

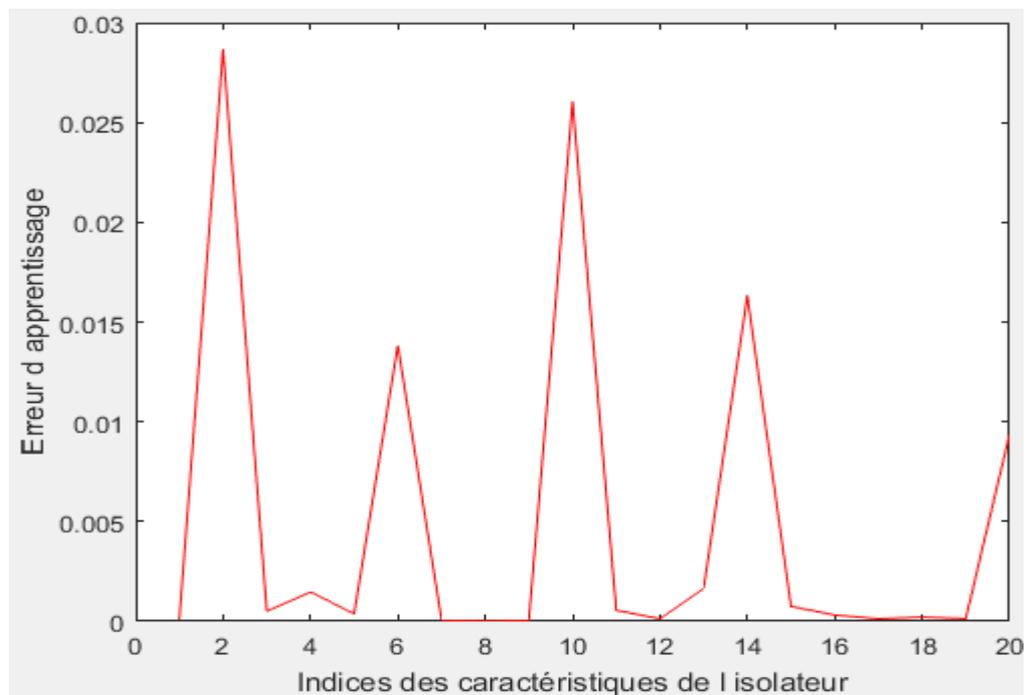


Figure IV.12: Evolution de l'erreur en fonction des indices des données d'isolateur.

La Figure(IV.12) montre l'évolution des différentes erreurs en fonction de nombre d'itérations

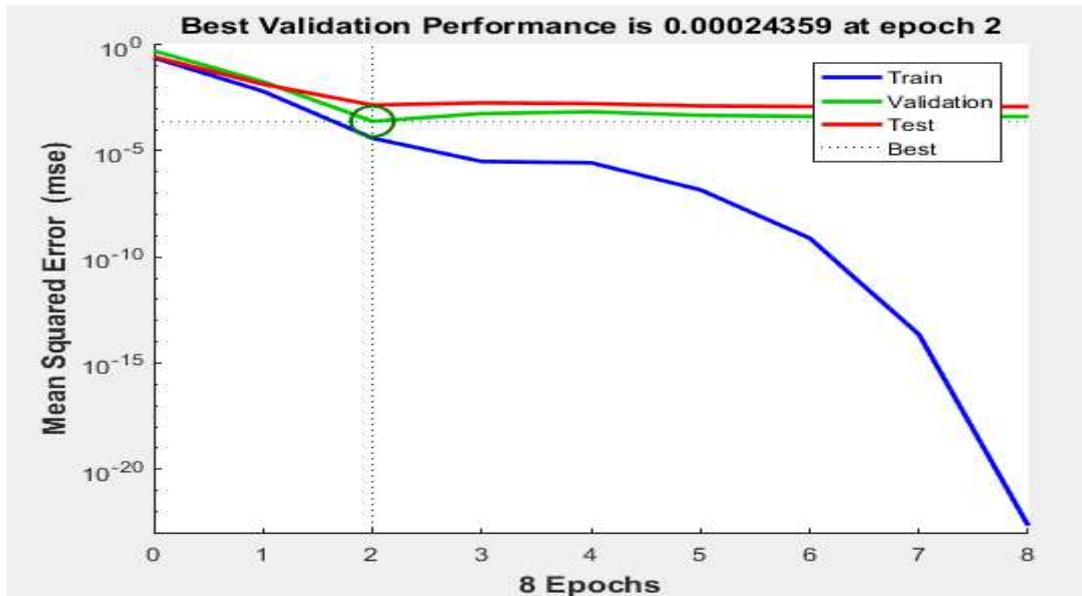


Figure IV.13: Evolution des différentes erreurs en fonction de nombre d'itération.

La figure (IV.13) présente les droites de régression linéaire des valeurs du champ maximale calculées par la méthode des éléments finis avec celles estimées par le modèle des réseaux neurones.

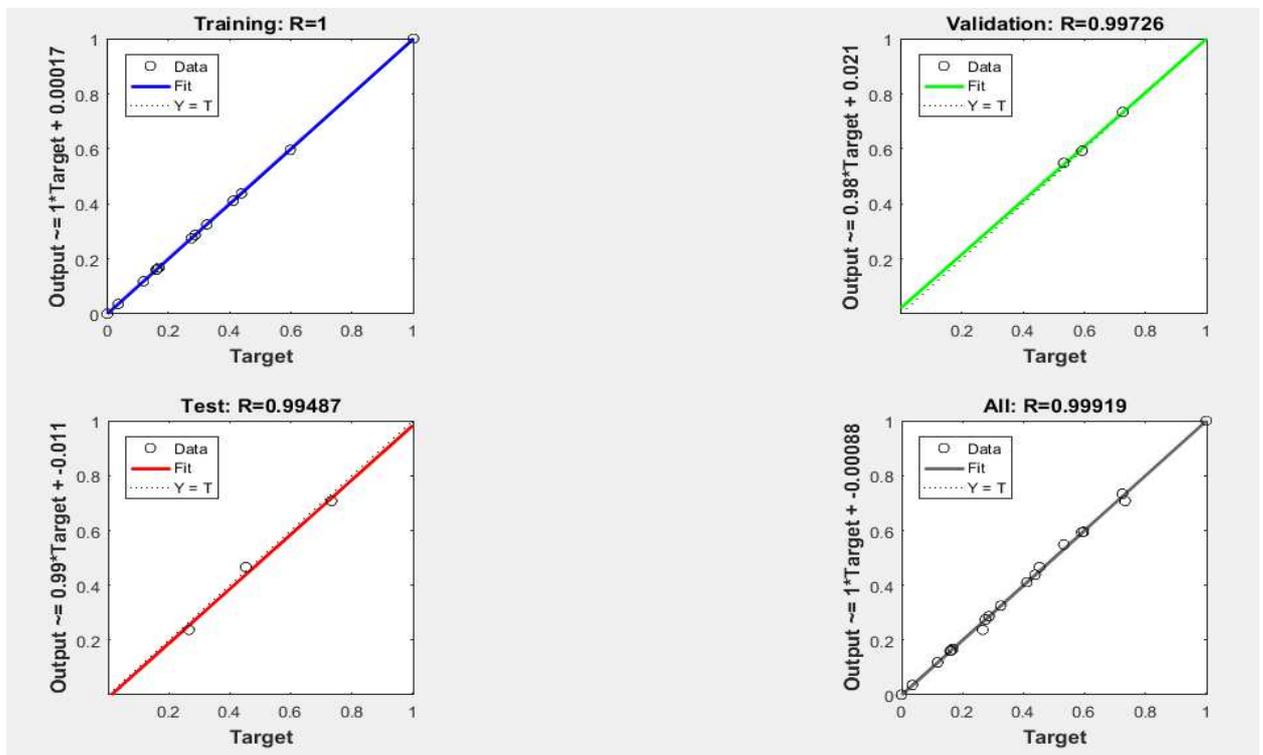


Figure IV.14: Courbe de régression de champ électrique calculé par MEF avec le RNA.

IV.2.3.3 Résultats de validation

Pour valider notre modèle nous avons pris 07 données calculées par la méthode des éléments finis. La Figure (IV.15) montre la comparaison entre les résultats de champ maximal autour de l'isolateur calculés par (COMSOL) avec ceux estimés par le modèle des Réseaux de Neurones.

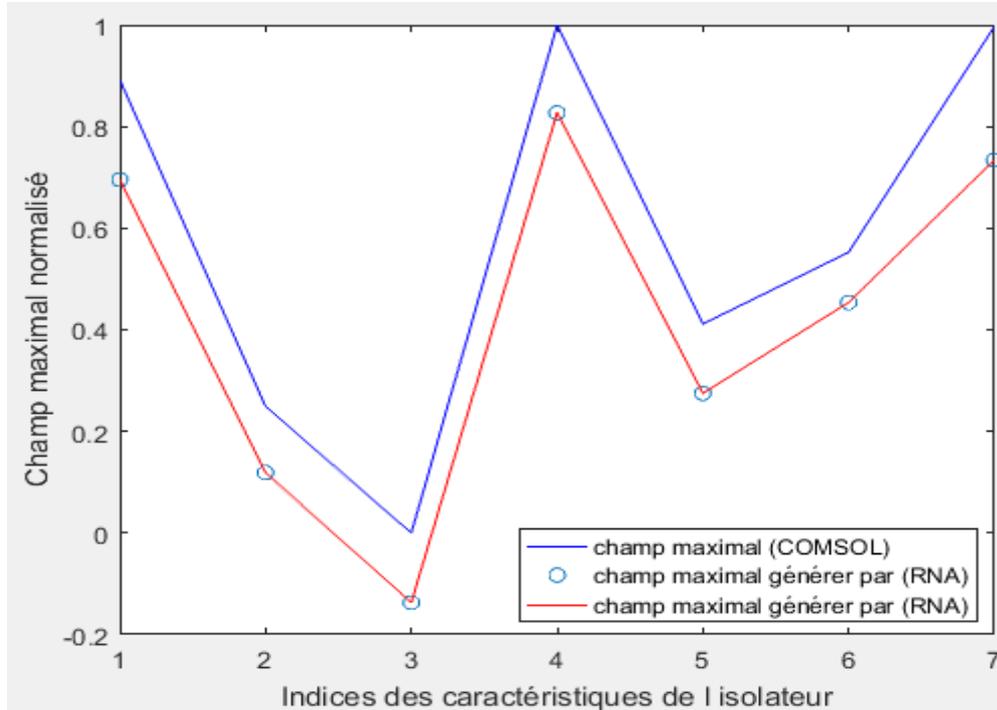


Figure IV.15: Comparaison des champs électrique calculées par COMSOL et celles données par le modèle de réseau neurone pour la validation.

IV.3 Conclusion .

Tenant compte de la difficulté des mesures et les contraintes imposées par le problème, la méthode des Eléments Finis (MEF) s'est avérée être une des meilleures solutions.

La modélisation est une étape importante dans toute simulation numérique. En particulier, elle permet, en définissant et en étudiant les caractéristiques géométriques et physiques du problème étudié.

Les étapes suivies lors de notre simulation sont :

- **Etape 1** : Dessiner le modèle équivalent de l'isolateur à l'aide de logiciel AUTOCAD ;
- **Etape 2** : définir les matériaux utilisés ;
- **Etape 3** : faire le maillage ;
- **Etape 4** : lancer la simulation.

Un modèle basé sur la technique d'intelligence artificielle (réseaux de neurones artificiels) est proposé pour la prédiction de la valeur de champ maximal autour de différentes profils géométriques de l'isolateur silicone(SIR.11KV) pour faciliter leur modélisation mathématique. Les RNA sont très attractive pour la modélisation des processus où la modélisation mathématique traditionnelle est difficile. La capacité d'apprentissage des réseaux de neurones permet de découvrir des interactions complexes et subtiles entre des variables indépendantes contribuant au développement d'un modèle plus précis.

*Conclusion
générale*

Conclusion générale :

Les isolateurs représentent relativement un faible pourcentage dans le prix des lignes aériennes, mais constituent un élément essentiel dans le bon fonctionnement de ces lignes. Leur rôle est d'assurer l'isolement électrique entre les parties portées à la HT ou entre les parties HT et les parties mises à la terre.

Notre travail a porté sur l'étude de la distribution du potentiel et du champ électriques sur la surface d'un isolateur de haute tension en silicone le long de la ligne de fuite. Puis nous avons étudié l'optimisation des profils géométriques des isolateurs réels. Pour ce faire, nous avons utilisé deux méthodes :

- La méthode des éléments finis (COMSOL Mutliphysics) : Dans la première partie de simulation on a appliqué la méthode des éléments finis à travers un logiciel (COMSOL) pour étudier la distribution de la tension et du champ électrique le long d'un isolateur de silicone(SIR.11KV) dans le cas propre.
- Technique d'intelligence artificiel : Dans la deuxième partie de simulation nous avons appliqué la méthode de réseau de neurone à travers de logiciel (MATLAB) pour la prédiction des valeurs de champ maximal autour de l'isolateur(SIR.11KV).

Parmi les principaux résultats de cette étude :

- La détermination de la distribution du champ et du potentiel électriques de tout système de haute tension, est un problème de calcul complexe. Pour remédier à ce problème, la méthode des Eléments Finis était la mieux adaptée aux contraintes imposées par le problème.
- L'utilisation du logiciel COMSOL a permis d'estimer avec une grande précision la valeur de champ maximal autour de l'isolateur en tenant compte de la géométrie de l'isolateur. Ces résultats sont impossibles à avoir avec les méthodes analytiques classiques.
- Le logiciel COMSOL Multiphysics peut servir d'une manière puissante et interactive à les résoudre en se fondant sur la méthode des éléments finis.
- Le RNA présente une méthode innovante pour traiter l'information, il est très recommandé de les utiliser quand le lien entre les entrées et les sorties d'un système donné est très complexe à modéliser. Les réseaux de neurones sont utilisés dans des domaines très variés en biologie, physique, économie.

L'application de la méthode des réseaux de neurones dans les calculs et la prédiction de la valeur de champ maximal autour de l'isolateur s'est avérée très utile. La puissance de cette méthode est mise en évidence par la bonne concordance, lors de la comparaison entre les résultats obtenus par les réseaux de neurones et les résultats obtenus par la méthode des éléments finis. Les erreurs commises restent très acceptables, en effet les études comparatives effectuées lors de la confrontation des résultats témoignent de leurs efficacités et de leurs performances.

Bibliographie

1. **Cours, d'A.Tilamnine.** « *cours techniques de la haute tension* ». s.l. : université DJILLALI LIABES.
2. **S.VITET.** « *La pollution des isolateurs,* ». s.l. : EDF-Epure, Juillet 1990.
3. **S. GENBERG.** « *Isolateur en céramique et en synthétique,* ». s.l. : EDF-EPURE, avril 1998.
4. **Y. Porcheron.** « *Lignes aériennes : Matériels entrant dans la constitution d'une ligne aérienne* ». s.l. : Technique de l'ingénieur D4425.
5. **C. LEROY.** *Les propriétés diélectriques de l'air et les très hautes tensions,*. s.l. : paris:collection de la direction des études et recherches d'électricité de France,, 1984.
6. **MESBAHI Roufaïda, BETTAHR Fatma Zohra .** " *Diagnostic d'une chaîne des isolateurs de haute tension par la méthode RNA*". s.l. : Mémoire MASTER ACADEMIQUE, Université Echahid Hama Lakhder d'El-Oued,, 03/06/2018.
7. **ABIMOULOUD. Adel.** « *Comportement d'une Surface Isolante Partiellement Polluée sous Tension Alternative 50Hz* ». s.l. : thèse de magister en Génie Electrique, Ecole Nationale Polytechnique Alger Décembre, 1999.
8. **MEKHALDI. Abdelouahab.** « *Etude des phénomènes de conduction et de décharge électrique sur des surfaces isolantes polluées sous tension alternative 50 Hz* ». s.l. : Thèse de doctorat d'Etat en Génie Electrique, Ecole Nationale Polytechnique Alger , 1999.
9. **A. Mekhaldi.** " *Etude du développement d'un arc électrique sur des surfaces isolantes contaminées par la pollution désertique* ". s.l. : Mémoire de Magister, Génie Electrique, ENP, 1990.
10. **M. Tegar.** *Etude mathématique des mécanismes de développement des décharges électriques sur des isolateurs installés en régions polluées.* s.l. : Mémoire Magister, Génie Electrique, ENP , 1993.
11. **D. Namane.** *Effet de la discontinuité de la pollution sur le comportement d'isolateur haute tension, sous la fréquence de 50 Hz.* s.l. : Mémoire de Magister, Génie Electrique, ENP, 1998.
12. **A. Mekhaldi, H.Boudjelthia,.** " *Contribution à l'étude de la pollution des isolateurs de haute tension dans la région électrique de Annaba*". s.l. : PFE, Génie Electrique, ENP, 1984.
13. **BENKHELIL Mohammed El-Maâmoun.** *Élaboration d'un Modèle Dynamique de Contournement d'un Isolateur Pollué sous une Tension Impulsionnelle.* MEMOIRE DE FIN D'ETUDES EN VUE DE L'OBTENTION DU DIPLOME DE MASTER EN GÉNIE ÉLECTRIQUE : UNIVERSITE DE MOHAMED BOUDIAF- M'SILA, 2016.
14. **P. S. Ghosh, N. Chatterjee,.** " *Polluted Insulator Flashover Model for AC Voltage*", . s.l. : IEEE Trans. on Diel. and Elect. Insul, February 1995. . vol. 2, N°. 1, pp. 128-136,.
15. **M. A. Boudjamaa, R. Sebti,.** « *Modélisation Des Phénomènes De Pollution Des Isolateurs De Haute tension* ». s.l. : Mémoire de Master, université d'Ouargla, 2012.
16. **Mohamed Aminé Soufi, Menouar Zemirline,.** « *Conception d'un Modèle Dynamique de Contournement d'un Isolateur Pollué sous Tension Alternative 50 Hz* ». s.l. : Mémoire d'Ingénieur d'Etat en Electrotechnique, ENP d'Alger , 2004.

17. **Meraghni Tahar, Guia Issam,** « *effet de la pollution désertique sur l'isolateur de haute tension* ». s.l. : mémoire de master, 2015.
18. **Fatiha. Aouabed.** « *Contribution A L'étude D'un Circuit Equivalent Des Isolateurs Synthétiques Sous Pollution En Utilisant L'emtp* ». s.l. : Mémoire De Magister, UNIVERSITE FERHAT ABBAS — SETIF .
19. **GUIA Talal.** « *Comportement d'un Modelé D'isolateur Sous Tension Impulsionnelle* ». s.l. : Mémoire de Magister, en Génie Electrique (Electrotechnique) à l'ENP, 10, Avenue Hassen Badi, BP 182, El-Harrach, Alger, Algérie.
20. **Z. Sahli.** " *Etude de la non uniformité de la pollution sur des caractéristiques de contournement des isolateurs réels pollués sous tension continu* ". s.l. : Mémoire de Magister, Génie Electrique, UAM Bejaia.
21. **F. Amidi, K. Ouerdane,** " *Les effets de la pollution sur les ouvrages électriques à 30kV en régions littorales*". s.l. : projet de fin d'études, département d'électrotechnique, université des sciences et technologies houari boumediene, bab Ezzouar, juin 1998.
22. **Dr.BEKAKRA Youcef.** *Cours, Techniques de l'Intelligence Artificielle Réseaux de Neurones Artificiels* ,. s.l. : Université Hamma Lakhdar d'EL-Oued ,, 2017.
23. **T.Norbert.** " *Treillis de Galois et réseaux de neurones : une approche constructive d'architecture des réseaux de neurones*". s.l. : thèse de doctorat , Université d'Artois - Faculté des Sciences Jean Perrin.
24. **HAMMOUCHE, Yassine.** *Comparaison de plusieurs méthodes pour la prédiction de la Charge Electrique Nationale.* MEMOIREMAGISTER , UNIVERSITE DE SETIF : s.n., Année 04 / 07 /2009.
25. **M, Parizeau.** « *Réseaux de neurones* ». s.l. : Edition université de Laval, 2004.
26. **M, MARICH.** « *Validation de nouvelles méthodes de modélisation du contournement des isolateurs pollués* ». s.l. : thèse doctorat en sciences, USTO, 2018.
27. **L.Guenfaf.** « *Application de l'automatique et réseaux de neurones en dynamique des structures* ». s.l. : Thèse de doctorat, ENP, 2001.
28. **MERZOUKA, NOURESSADAT.** *Etude des performances des réseaux de neurones dynamiques à représenter des systèmes réels :une approche dans l'espace d'état.* s.l. : MEMOIRE MAGISTER , UNIVERSITE DE SETIF, 04 / 07 / 2009.
29. **H.Mezaache.** " *Les réseaux de Neurones formels Et Les systèmes Neuro-Flous Pour l'apprentissage par renforcement*". s.l. : Mémoire soumis en vue de l'obtention du Diplôme de Magister, Université El Hadj Lakhdar, Batna, 2008.
30. **B.Laurent.** « *Etude de la construction par réseaux neuromimétique de représentations interprétables Application a la prédiction dans le domaine des télécommunications* ». s.l. : thèse de doctorat, France novembre 2000.
31. **H. Yousefizadeh, and A.Zilouchian.** « *Neural Network Architectures* ». s.l. : CRC Press LLC, 2001.

32. **M. OUCHEN, Lyamine.** *Modélisation Et Simulation Des Isolateurs Par La Méthode Des Eléments Finis*. s.l. : Mémoire De Fin D'étude En Vue De L'obtention Du Diplôme De MAGISTER EN ELECTROTECHNIQUE, UNIVERSITE FERHAT ABBAS — SETIF UFAS (ALGERIE) , 14/12/2010.
33. **Dilmi.A, Maarouf.A.** *Influence De La Pollution Sur Le Comportement D'un Modèle Plan D'isolateur Sous Haute Tension*. s.l. : Mémoire De Fin D'étude En Vue De L'obtention Du Diplôme De Master, Département Génie Electrique, 2017.
34. **Oudin, Hervé.** « *Introduction à la méthode des éléments finis* ». version 3.
35. **M. O. Meftah, M. Rahal,** « *Performances d'Isolateurs HT Pollués sous Tension Alternative 50Hz et Distributions du Champ et du Potentiel Electriques utilisant COMSOL* », s.l. : école nationale polytechnique, département d'électrotechnique, Mémoire du Projet de Fin d'Etudes pour l'obtention du diplôme d'Ingénieur d'Etat en Electrotechnique,, 2011.
36. **Mariem Ben Hamouda.** « *étude, conception et modélisation de la diffusion de la chaleur dans les tissus biologiques* », s.l. : mémoire présenté à l'université du québec à trois-rivières,, mars 2015.
37. **Seyf Eddine Hamdi.** « *Modélisation d'une machine asynchrone par logiciel COMSOL –Multiphysics* », s.l. : Mémoire de Fin d'Etudes, Université Mohamed Khider Biskra, Département de Génie Electrique, , 2018.
38. **Khelfaoui. A, Bouberma. O,** « *modélisation par méthode des éléments finis des phénomènes de conduction surfacique sur l'isolateur pollues* ». s.l. : Mémoire de masteracadémique, Université Kasdi Merbah Ouargla, Département de Génie Electrique,, 2014.
39. **MERZOUGUI Nabila, MERZOUGUI Hadjer.** *Diagnostic De L'état De Surface D'un Isolateur De Haute Tension En Utilisant « Current FlowProblem* ». diplôme de Master Académique : UNIVERSITE MOHAMED BOUDIAF - M'SILA, 2019.
40. **Hamza Slamet Amina.** « *Contribution à l'étude du modèle développé d'un isolateur Pollué* », s.l. : Mémoire de Magister en électrotechnique, USTO, 2013.
41. **BOUHAMAMA, Mohammed.** *MODELISATION DU CONTOURNEMENT SUR ISOLATEUR REEL POLLUE*. Doctorat en Sciences : UNIVERSITE DJILLALI LIABES DE SIDI-BEL-ABBES, 2018.