

RÉPUBLIQUE ALGÉRIENNE DÉMOCRATIQUE ET POPULAIRE

Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique

Université Amar TELIDJI - Laghouat



Faculté de Technologie
Département d'Electrotechnique
THÈSE DE DOCTORAT EN SCIENCES

Spécialité : Génie électrique / Electrotechnique
Option : Matériaux Isolants

Diplôme d'Ingénieur : 1998
Diplôme de Magister : 2002

Présentée et soutenue publiquement le **30-09-2014**
par

MAHDJOUBI Abdelhalim

UTILISATION DE L'APPROCHE DES MACHINES À VECTEURS DE SUPPORT (SVM)
POUR LA PRÉDICTION DES PERFORMANCES ÉLECTRIQUES DES SYSTEMES
D'ISOLATION UTILISÉS DANS LES RÉSEAUX DE TRANSPORT D'ÉNERGIE

| | | | |
|--------------------------------------|-------------------|------|-----------------|
| M ^r . LEFKAIER Ibnkhaloun | Président du jury | Prof | U.A.T. Laghouat |
| M ^r . SMAILI Attalah | Examineur | Prof | U.I.K .Tiaret |
| M ^r . HAMID Azzeddine | Examineur | Prof | USTMB Oran |
| M ^r . MAHI Djillali | Examineur | Prof | U.A.T. Laghouat |
| M ^r . ZEGNINI Boubakeur | Rapporteur | Prof | U.A.T. Laghouat |
| M ^r . BELKHEIRI Mohammed | Co-rapporteur | MC-A | U.A.T. Laghouat |

Dédicaces

Je dédie cette thèse

A

L'âme de mon père,

Ma chère mère,

Mes chers frères,

Ma chère sœur,

Ma chère épouse,

Ma chère fille,

Toute la famille,

Mes copains,

Mes collègues,

Tous ceux qui m'ont connu de près ou de loin.

Abdelhalim Mahdjoubi

Remerciements

Tout d'abord je remercie Allah de me donner la force et la volonté afin d'avoir achevé mon travail jusqu'à la fin,

*Je remercie très sincèrement les rapporteurs de cette thèse, le professeur **Zegnini Boubakeur** et le Docteur **Belkheiri Mohammed** qui ont pu encadré et dirigé ce travail avec beaucoup de compétences et disponibilité. Vos précieux conseils et nos nombreuses discussions m'ont permis de progresser et travailler dans les meilleures conditions.*

*Je remercie les examinateurs de cette thèse les Professeurs **Hamid Azzedine, Smaili Attalah** et **Mahi Djillali** pour la lecture de mon manuscrit et l'intérêt qu'ils ont porté à mon travail. Merci également au Professeur **Lefkaier Iben Khaldoun**, d'avoir accepté de présider ce jury.*

Enfin, je tiens à remercier tout individu qui m'a aidé de près ou de loin.

Abdelhalim Mahdjoubi

Liste des Figures

| | | |
|-------------|--|-----------|
| 1.1 | <i>Schéma simplifié d'un isolateur</i> | 5 |
| 1.2 | <i>Isolateur avec assiettes en céramique</i> | 6 |
| 1.3 | <i>Isolateur HT de suspension en verre</i> | 7 |
| 1.4 | <i>Vue intérieure d'un transformateur type colonne</i> | 8 |
| 1.5 | <i>Transformateur de puissance dans un poste électrique</i> | 8 |
| 1.6 | <i>Transformateur Haute tension Nouvelle Génération 600 MVA 385 kV</i> | 8 |
| 1.7 | <i>Câbles souterrains avec isolant en papier imprégné d'huile</i> | 9 |
| 1.8 | <i>Segments des câbles de haute tension</i> | 10 |
| 1.9 | <i>Isolant XLPE pour câbles triphasé de moyenne tension 35kV</i> | 10 |
| 1.10 | <i>Disjoncteur à air comprimé</i> | 11 |
| 1.11 | <i>Disjoncteur au SF₆</i> | 11 |
| 1.12 | <i>Bandes d'énergie d'un isolant</i> | 17 |
| 1.13 | <i>Isolant avec une géométrie cylindrique</i> | 19 |
| 1.14 | <i>Etapes successives du contournement d'une couche polluante</i> | 22 |
| 2.1 | <i>Streamer de corona le long de la glace de la chaine supérieure</i> | 25 |
| 2.2 | <i>Streamer de corona le long de la glace de la chaine inférieure</i> | 25 |
| 2.3 | <i>Décharge corona sur la surface de la glace</i> | 26 |
| 2.4 | <i>Décharge corona dans l'intervalle d'air</i> | 26 |
| 2.5 | <i>Schéma illustratif du banc d'essai expérimental</i> | 27 |
| 2.6 | <i>Dispositif expérimental pour la collection des données</i> | 28 |
| 2.7 | <i>Variation de la densité de dépôt du sel vs. la vitesse du vent</i> | 28 |
| 2.8 | <i>Tranche microtomée de l'isolant d'un câble souterrain</i> | 29 |
| 2.9 | <i>Cellule de mesure pour le diagnostic expérimental</i> | 30 |
| 2.10 | <i>Conductivité des papiers à 60 Hz vs. température</i> | 30 |
| 2.11 | <i>Chambre climatique –université de Chongqing</i> | 31 |
| 2.12 | <i>Champ disruptif vs. Distance à partir de l'âme conductrice</i> | 32 |
| 2.13 | <i>Accumulation de glace de largeurs différentes sur une chaine d'isolateurs</i> | 34 |
| 2.14 | <i>Courants enregistrés pour les accumulations de glace</i> | 35 |
| 2.15 | <i>Montage expérimental</i> | 35 |
| 2.16 | <i>Image de la décharge pour une pollution de 100µS/cm</i> | 36 |
| 2.17 | <i>Arborescence accélérée d'un isolant de type XLPE d'un câble souterrain</i> | 37 |
| 2.18 | <i>Coordonnées et zones de défauts</i> | 38 |
| 2.19 | <i>Génération de Cl-K à rayons X pour un isolateur pollué avec NaCl</i> | 40 |
| 2.20 | <i>Intensité des rayons Cl K-X vs. la densité surfacique en NaCl</i> | 40 |
| 2.21 | <i>Montage expérimental utilisé dans le laboratoire</i> | 41 |
| 2.22 | <i>Dimensions de l'isolateur en verre utilisé</i> | 41 |

| | | |
|-------------|---|-----------|
| 2.23 | <i>Valeurs moyennes des spectres pour 80% d'humidité</i> | 42 |
| 2.24 | <i>Montage expérimental pour la technique de mesure des CPD</i> | 43 |
| 2.25 | <i>Principe de test des courants de polarisation et de dépolarisation.....</i> | 44 |
| 2.26 | <i>Présentation d'un nœud intéressé</i> | 45 |
| 2.27 | <i>Variation de la température pour différents diamètres de la cavité et pour différentes positions dans l'isolant</i> | 46 |
| 2.28 | <i>Maillage des parties fondamentales du transformateur</i> | 47 |
| 2.29 | <i>Distribution de température dans les enroulements et noyaux</i> | 48 |
| 2.30 | <i>Variation de la température le long des enroulements et noyaux</i> | 48 |
| 2.31 | <i>Maillage d'une moitié d'un isolateur de type 7K3</i> | 49 |
| 2.32 | <i>Réseau de neurones simple</i> | 52 |
| 2.33 | <i>Tension de contournement vs. Conductivité surfacique avec la technique des RNA.....</i> | 54 |
| 2.34 | <i>Topologie du réseau de neurones utilisé</i> | 55 |
| 2.35 | <i>Diagnostic expérimental du transformateur</i> | 56 |
| | | |
| 3.1 | <i>Modèles d'erreurs</i> | 59 |
| 3.2 | <i>Transformation non linéaire des données</i> | 61 |
| 3.3 | <i>Hyperplan séparateur dans l'espace de redescription-Discrimination à deux classes avec séparation linéaire</i> | 61 |
| 3.4 | <i>Hyperplan séparateur dans l'espace de redescription-Discrimination à deux classes avec séparation non linéaire</i> | 62 |
| 3.5 | <i>Classification linéaire binaire.....</i> | 72 |
| 3.6 | <i>Classification linéaire de trois classes.....</i> | 73 |
| 3.7 | <i>Classification non linéaire de deux classes.....</i> | 74 |
| 3.8 | <i>Classification non linéaire de trois classes.....</i> | 75 |
| 3.9 | <i>RMSE vs. Paramètres de régularisation.....</i> | 76 |
| 3.10 | <i>Fonction d'estimation de la régression $\gamma=4096$, $\sigma^2=11.3137$.....</i> | 76 |
| | | |
| 4.1 | <i>Circuit équivalent d'un isolateur pollué</i> | 79 |
| 4.2 | <i>Organigramme de calcul</i> | 80 |
| 4.3 | <i>Tension du contournement en fonction de la densité surfacique de la pollution</i> | 81 |
| 4.4 | <i>Modèle normalisé pour quatre types d'isolateurs</i> | 82 |
| 4.5 | <i>Variation de la densité de la pollution en fonction des échantillons</i> | 85 |
| 4.6 | <i>Contribution des différents paramètres sur la tension du contournement des isolateurs</i> | 85 |
| 4.7 | <i>Variation de la tension du contournement en fonction des échantillons avec trois types de fonctions de noyau</i> | 86 |
| 4.8 | <i>Tension du contournement en fonction des échantillons pour différentes valeurs des éléments de la chaîne d'isolateurs en deux conditions météorologiques</i> | 88 |
| 4.9 | <i>Calcul du furane en fonction de CO</i> | 90 |
| 4.10 | <i>Calcul du furane en fonction de CO₂</i> | 91 |

Liste des Tableaux

| | | |
|------------|---|-----------|
| 2.1 | <i>Influence de la pluie sur la tension de tenue pour différentes géométries d'isolateurs</i> | 33 |
| 2.2 | <i>Rapport et intervalles et codes de Rogers</i> | 39 |
| 2.3 | <i>Codes et interprétations selon Rogers</i> | 39 |
| 2.4 | <i>Taux de pollutions appliquées aux isolateurs</i> | 42 |
| 2.5 | <i>Données d'apprentissage et de test</i> | 53 |
| 2.6 | <i>Evaluation statistique des résultats</i> | 53 |
| | | |
| 3.1 | <i>Données utilisées pour la régression.....</i> | 75 |
| | | |
| 4.1 | <i>Caractéristiques des isolateurs étudiés</i> | 81 |
| 4.2 | <i>Résultats statistiques de comparaison</i> | 83 |
| 4.3 | <i>Valeurs de b avec différentes températures</i> | 84 |
| 4.4 | <i>Caractéristiques des isolateurs examinés</i> | 87 |
| 4.5 | <i>Mesures effectuées sur les transformateurs.....</i> | 89 |
| 4.6 | <i>Nombre de données selon les cas d'étude</i> | 89 |
| 4.7 | <i>Paramètres et résultats du modèle élaboré pour les transformateurs</i> | 92 |

• Symboles

| | |
|----------------|---|
| M_1 et M_2 | Pièces métalliques |
| eV | Electronvolt |
| d_c | Diamètre d'un isolateur avec géométrie cylindrique (m) |
| L | Longueur d'un isolateur avec géométrie cylindrique (m) |
| P_j | Pertes Joules (W) |
| σ_{th} | Conductivité thermique à la température T ($W \cdot m^{-1} \cdot K^{-1}$) |
| σ_{0th} | Conductivité thermique à la température T_0 ($W \cdot m^{-1} \cdot K^{-1}$) |
| E_c | Champ électrique traduisant la rigidité diélectrique (V/m) |
| D | Diamètre externe de l'isolateur (m) |
| d | Diamètre interne de l'isolateur (m) |
| CH_4 | Méthane |
| C_2H_2 | Acétylène |
| C_2H_4 | Ethylène |
| C_2H_6 | Ethane |
| I_{pol} | Courant de polarisation |
| $I_{dépol}$ | Courant de dépolarisation |
| D_m | Diamètre maximal (m) |
| H | Distance entre centres (m) |
| L | Ligne de fuite (m) |
| F | Facteur de forme |
| λ | Coefficient de transfert thermique ($W/m^2 K$) |

- **Abréviations**

| | |
|-----------------------|---|
| EPDM | Ethylène Propylène Diène Monomère |
| U40B | Isolateur en verre avec tension rupture mécanique minimale 40 kN |
| U70BLP | Isolateur en verre avec tension rupture mécanique minimale 70 kN |
| U120AD | Isolateur en verre avec tension rupture mécanique minimale 120 kN |
| PCB | Polychlorobiphényles |
| PEBD | Polyéthylène à basse densité |
| PEHT | Polyéthylène à haute densité |
| EPR | Ethylène propylène rubber |
| XLPE | Cross-linked polyethylene |
| SF₆ | Six fluorures de Sodium |
| UV | Ultra-violet |
| PDC | Polarisation and polarisation curent |
| FL | Fuzzy logic |
| PSO | Particles swarm optimization |
| ANN | Artificial neural networks |
| SVM | Support vectors machines |
| LS-SVM | Least squares Support vectors machines |
| CCD | Charged coupled device |
| PD | Partial discharge (décharge partielle) |
| Ar | Argon |
| Ca | Calcium |
| RMSE | Root mean squares error |
| MAPE | Mean absolute percentage error |
| ERM | Empirical risk minimization |
| SRM | Structural risk minimization |
| Kernel | Noyau |
| RBF | Radial basis function |
| MFNN | multilayer feedforward neural network |
| WLAN | Wireless local area network |
| EEMD | Ensemble empirical mode decomposition |
| HHT | Hilbert Huang transformation |
| WMRA | Wavelet Multi-Resolution Analysis |
| Poly | Polynomial |
| MLP | Multilayer perceptron |
| ESDD | Equivalent salt deposit density |
| DGA | Dissolved gas analysis |
| RNA | Réseau de neurones artificiels |

Résumé

Dans ce travail, une nouvelle méthode d'apprentissage et de classification appelée les Machines à Vecteurs de Support (SVM pour Support Vectors Machines) a été appliquée au problème de diagnostic de la dégradation des isolants électriques. La méthode SVM prouve son supériorité sur les méthodes discriminantes classiques. Sa robustesse vis-à-vis de la dimensionnalité des données et son pouvoir accru de généralisation, font que SVM est nettement plus avantageux. L'avantage principal de cette approche provient du fait qu'il y a peu de paramètres à régler comparativement aux autres méthodes. Elle est utilisée dans cette thèse afin de prévenir les pannes et d'optimiser la performance des isolants des équipements dans le réseau électrique. Il est primordial de récolter le plus de données possibles des tests expérimentaux pour construire des bases de données d'apprentissage et de test. Il est montré dans cette étude que cette approche a été appliquée pour prédire l'imminence d'un contournement électrique au niveau des isolateurs pollués sous conditions météorologiques secs et sous pluie. Deuxièmement voir l'état des isolants des transformateurs de puissance. Il est montré également qu'un tel système intelligent d'alerte permettrait aux équipes d'entretien d'avoir assez de temps pour agir en conséquence d'un coté et d'un autre coté assurer la fiabilité du réseau électrique et une meilleure protection des personnes, des équipements et des installations.

Mots clés

Apprentissage, Classification, Machine à vecteurs de support (SVM), Dégradation, Isolant, méthodes discriminantes, Réseau électrique, Contournement, Isolateur pollué, Diagnostic, Transformateur de puissance.

Abstract

In this work, a new method of learning and classification called Support Vectors Machines (SVM) was applied to the diagnosis problem of electrical insulation degradation. SVM method proves its superiority on the classic discriminating methods. Its robustness towards the dimensionality of the data and its greater power of generalization, make that SVM is clearly more advantageous. The main advantage of this approach comes from the fact that there are few parameters to be adjusted compared with other methods. It is used in this thesis to prevent the breakdowns and optimize the performance of equipments insulations in the electrical network. It is essential to collect most possible data of the experimental tests to build learning databases and test. It is shown in this study that this approach was applied to predict the imminence of electrical flashover voltage of polluted insulators under dry weather conditions and under rain. Secondly see the state of insulations of power transformers. It is also shown that such an intelligent system of alert would allow the maintenance crews time to act as a result of a highly-rated and of another one esteemed to assure the reliability of the electricity network and A better protection of people, equipments and installations.

Keywords

Learning, Classification, Support Vectors Machines, Insulation, Degradation, Discriminating methods, Electrical flashover voltage, Polluted Insulator, Power transformer, Intelligent system.

ملخص

في هذا العمل المطروح، نطرح طريقة جديدة للتلقين والتقسيم تسمى طريقة الآلات ذوات الأشعة الحاملة استعملناها وطبقناها لاستكشاف مدى اهتراء العزل في الأنظمة الكهربائية. طريقة الآلات ذوات الأشعة الحاملة تتميز بالتفوق على طرق أخرى. قوتها من حيث سعة المعطيات وسهولة التعميم تجعلها أكثر تميزاً.

الميزة الأساسية لطريقة الآلات ذات المتجهات هي من حيث قلة المتغيرات المراد ضبطها من طرف المستخدم مقارنة بطرق أخرى. استخدمنا الطريقة في هذه الأطروحة لمعرفة إمكانيتها لكشف الأعطال ومعرفة الميزات المثلى للعوازل لمختلف مكونات الشبكات الكهربائية. إضافة لذلك، أدرجنا عدة تقنيات لتثمين الدراسة.

إنه من الضروري أن نجمع كم كبير من المعطيات التجريبية لإدراجها في تكوين قاعدة البيانات في مرحلتى التلقين والاختبار. قمنا بدراسة حالتين، الأولى نتطرق فيها لدراسة توتر الانهيار للعوازل الكهربائية تحت تأثير التلوث الجوي؛ أما الحالة الثانية خصصناها لدراسة العوازل في محولات الطاقة. إدراج مثل هذه الطرق والتقنيات في أنظمة المراقبة يكسبها كفاءة تترجم في أنظمة متطورة قادرة على ضبط وتشغيل الشبكات الكهربائية بطريقة مثلى. إضافة إلى عامل الوقت بحيث نستطيع التدخل بسرعة وذلك من أجل حماية الأشخاص، العتاد والشبكات.

الكلمات المفتاحية:

التلقين، التقسيم، الآلات ذوات الأشعة الحاملة، اهتراء العزل، الشبكات الكهربائية توتر الانهيار، محولات الطاقة، أنظمة متطورة.

Table des matières

| | |
|-------------------------------|------|
| Dédicaces..... | I |
| Remerciements | II |
| Liste des figures..... | III |
| Liste des tableaux | V |
| Symboles et abréviations..... | VI |
| Résumés..... | VIII |
| Table des matières..... | XI |
| Introduction générale..... | 1 |

CHAPITRE 1 : Généralités sur les Isolants dans les Dispositifs Electriques

| | | |
|------------|--|-----------|
| 1.1 | Introduction | 4 |
| 1.2 | Classification des isolants | 4 |
| 1.3 | Isolants pour matériel électrique | 5 |
| 1.4 | Types de contraintes | 12 |
| 1.5 | Méthodes électriques de diagnostic | 15 |
| 1.6 | Comportement des diélectriques | 17 |
| 1.7 | Mécanismes de claquage | 18 |
| 1.8 | Phénomène de contournement | 21 |
| 1.9 | Conclusion | 23 |

CHAPITRE 2 : Dégradation de l'Isolation dans les Dispositifs Electriques

| | | |
|-------------|---|-----------|
| 2.1 | Introduction | 24 |
| 2.2 | Méthode par la capture photographique | 25 |
| 2.3 | Mesure spectrométrique des décharges | 26 |
| 2.4 | Effet du vent sur le dépôt des glaces | 27 |
| 2.5 | Vieillissement thermique accéléré des isolants | 28 |
| 2.6 | Effet du brouillard ultrasonique sur des isolateurs | 30 |
| 2.7 | Effet de l'eau sur l'isolant des câbles souterrains | 32 |
| 2.8 | Effet de la pluie sur la tension de tenue des isolateurs | 32 |
| 2.9 | Effet de la géométrie des isolateurs sur leur efficacité | 34 |
| 2.10 | Effet de la polarité de la tension sur les décharges des isolateurs | 35 |

| | | |
|------|---|----|
| 2.11 | Tests chimiques sur les câbles souterrains | 36 |
| 2.12 | Composantes furaniques dans l'isolation des transformateurs de puissance | 37 |
| 2.13 | Mesure de la densité des glaces par la technique de fluorescence | 39 |
| 2.14 | Technique de la mesure des bruits ultrasoniques émis par les isolateurs | 41 |
| 2.15 | Méthode du courant de polarisation et de dépolarisation pour le diagnostic des isolants | 43 |
| 2.16 | Méthode des différences finies | 44 |
| 2.17 | Méthode des éléments finis | 46 |
| 2.18 | Méthode de la logique floue | 50 |
| 2.19 | Méthode d'optimisation par essaim de particules | 51 |
| 2.20 | Méthode des réseaux de neurones artificiels | 52 |
| 2.21 | Méthode des machines à vecteurs de support | 56 |
| 2.22 | Autres modèles hybrides qui combinent entre deux ou plusieurs méthodes | 57 |
| 2.23 | Conclusion | 58 |

CHAPITRE 3 : Présentation de la Méthode SVM

| | | |
|------|---|----|
| 3.1 | Introduction | 59 |
| 3.2 | Historique..... | 59 |
| 3.3 | Théorie d'apprentissage statistique | 59 |
| 3.4 | Principes de base de la méthode | 60 |
| 3.5 | SVM et problèmes de régression | 64 |
| 3.6 | Types de fonctions de noyaux et la méthode LS-SVM | 66 |
| 3.7 | Applications de la méthode SVM | 67 |
| 3.8 | Application de la méthode SVM dans le diagnostic des systèmes | 71 |
| 3.9 | Calcul par classification | 71 |
| 3.10 | Calcul général par régression..... | 75 |
| 3.11 | Conclusion | 77 |

CHAPITRE 4 : L'Approche des Machines à Vecteurs de Support (SVM) pour la Prédiction des Performances Electriques des Isolants

| | | |
|-----|---|----|
| 4.1 | Introduction | 78 |
| 4.2 | Simulation de la tension de contournement dans les isolateurs pollués | 78 |
| 4.3 | Calcul de la tension de contournement pour quatre isolateurs pollués..... | 81 |
| 4.4 | Influence de la température sur la tension de contournement..... | 84 |

| | | |
|------------|---|-----------|
| 4.5 | Calcul de la tension de contournement pour différentes fonctions noyau..... | 86 |
| 4.6 | Tension de contournement des isolateurs en verre sous condition de pluie | 87 |
| 4.7 | Simulation de la tenue des isolants dans les transformateurs de puissance | 89 |
| 4.8 | Conclusion | 92 |
| | Conclusion générale..... | 93 |
| | Références bibliographiques | |

Introduction Générale

Introduction Générale

L'évolution progressive de l'architecture des réseaux électriques et les différentes fonctions d'isolation qui font appel de plus en plus aux équipements, lignes de transport d'énergie et demandeurs d'électricité. Cette architecture a imposé aux contrôleurs des réseaux électriques d'implanter des moyens de surveillance et de contrôle pour bien gérer l'écoulement de puissances dans différents points d'une façon optimale. Par l'augmentation de la taille des réseaux électriques, plusieurs facteurs de contraintes entrent en jeu et influent sur le bon fonctionnement des différents équipements. Chaque pays doit intervenir dans la mesure des besoins et selon les moyens disponibles afin de bien comprendre les différents impacts en termes de natures et influences.

Vu que la majorité des centrales électriques sont toujours situées dans des endroits loin des centres de consommation, les lignes de transport vont traverser des zones montagneuses, plaines, près ou dans les mers, et sous sol dans la terre. Ces différents environnements vont influent sur les lignes électriques d'une façon directe ou indirecte. L'influence directe comme les dépôts de toute nature qui peuvent engendrer des zones faibles dans les lignes à causes d'une intensité forte du champ électrique local. La façon indirecte est interprétée par un déséquilibre de la géométrie de la ligne qui peut engendrer des défauts tels que le déséquilibre de la fréquence du réseau électrique.

Les isolateurs et les transformateurs de puissance sont bien connus comme étant parmi les principaux équipements dont dépend la fiabilité des réseaux de distribution et de transport d'énergie. Bien qu'ils soient conçus pour faire face aux contraintes environnementales les plus sévères, les coupures engendrées par les contournements électriques des isolateurs pollués ou glacés et la défaillance du système d'isolation dans les transformateurs de puissance sont souvent difficiles à identifier après coup. De plus, l'accumulation de pollution ou de glace sur la surface des isolateurs peut causer l'apparition précoce de couronnes de streamers ou d'arcs partiels pouvant mener rapidement à un contournement. Certains de ces contournements se produisent dans des lieux très éloignés. Par conséquent, ceci rend leur observation difficile et aléatoire. La rigidité diélectrique de ces isolateurs, l'état d'huile et les gaz dissous dans les transformateurs de puissance, affectant ainsi grandement la fiabilité des lignes de transport et la qualité de la transformation et la distribution d'énergie.

Dans ce contexte, il est primordial de réaliser des tests en laboratoire afin de récolter le plus de données possibles sur les causes de ces défaillances et d'approfondir les connaissances sur le sujet tant au point de vue théorique que pratique. Pour améliorer malgré tout leur performance lorsqu'ils opèrent sous ces conditions, deux actions

s'avèrent nécessaires. Il s'agit soit de prévenir les pannes et d'optimiser la performance des systèmes d'isolation de ces équipements, soit de concevoir des isolateurs et des transformateurs de puissance mieux adaptés aux différents climats.

Un réseau électrique doit être muni des dispositifs de protection et de contrôle afin de bien gérer ce réseau d'une façon adéquate. Donc, l'intervention du personnel qualifié est indispensable. Cette intervention peut être d'une façon pratique sur champ comme le nettoyage des isolateurs ainsi que la quantification des gaz dissous et les composantes furaniques émises dans les transformateurs de puissance ou par des outils tels que les capteurs et l'utilisation des moyens informatiques. Ce traitement est basé sur des méthodes de l'intelligence artificielle. Parmi ces méthodes, on trouve la méthode des machines à vecteurs de support (SVM).

La méthode SVM est introduite après des années d'études théoriques approfondies dans l'aspect de l'apprentissage des machines. L'utilisation effective de la méthode est daté de 1995 où elle était généralisé et introduite dans plusieurs applications. Aujourd'hui, la méthode SVM est appliquée partout dans plusieurs secteurs tels que la médecine, la biologie, l'informatique, les traitements dans le secteur économique, et l'analyse des réseaux de distribution et de transport d'énergie électrique

La méthode permet d'étudier efficacement des problèmes de classification ou de régression. L'avantage principal de cette approche provient du fait qu'il y a peu de paramètres à régler comparativement aux réseaux de neurones. Elle laisse très peu de place aux paramètres utilisateurs, elle est utilisée dans cette thèse afin de prévenir les pannes et d'optimiser la performance des systèmes d'isolation des équipements d'importance stratégique dans la production, transport et distribution de l'énergie électrique.

Dès lors, tout le problème consiste donc, d'une part à identifier les contraintes spécifiques aux systèmes d'isolation et d'autre part à prédire l'impact de ces contraintes sur l'occurrence des défaillances afin d'apporter, dans le futur, soit des outils d'aide aux dimensionnements, soit des critères de choix d'équipements via la préconisation des tests spécifiques, pour garantir la fiabilité de la fonction d'isolation.

Nous traiterons dans ce travail de recherche l'application de la méthode SVM pour l'étude du phénomène de contournement des isolateurs pollués sous différents conditions environnementales et le diagnostic des huiles des transformateurs sous l'influence des émissions furaniques.

La présente thèse est divisée en quatre chapitres :

- Dans le premier chapitre, nous rappelons les classifications des isolants ainsi que l'état de l'art des dispositifs électriques dans les équipements du réseau de transport d'énergie électrique,
- Le deuxième chapitre est consacré aux travaux antérieurs trouvés dans la littérature afin de bien comprendre le comportement des isolants sous différentes contraintes électrique, mécanique et environnementales dans les systèmes d'isolation. Ces méthodes peuvent être des essais expérimentaux sur site, dans le laboratoire ou des méthodes de simulation ou de modélisation,
- Dans le troisième chapitre nous présentons des différentes applications de la méthode SVM pour le traitement des problèmes dans différents domaines et spécialement qui touchent les réseaux et systèmes électriques,
- Le dernier chapitre est réservé à la présentation et discussions des résultats obtenus avec la méthode SVM sur des isolateurs pollués dans les réseaux de transport et le diagnostic du système d'isolation dans les transformateurs de puissance.

Enfin, dans la conclusion, nous dégageons les résultats essentiels de cette étude et nous donnons quelques recommandations et perspectives de recherches qui en découlent.

CHAPITRE 1

Généralités sur les Isolants dans les Dispositifs Electriques

1.1 Introduction

L'utilisation des isolants dans les systèmes électriques est indispensable. Cette isolation permette de séparer électriquement des parties actives ou des parties mixtes ; actives et masses. Lors du service, l'isolant est sous plusieurs contraintes ; soit normal tel que : courant ou tension ou anormal d'une circonstance imprévue telle que choc mécanique fort ou thermique à cause d'un feu ou un choc de foudre.

1.2 Classification des isolants

Les isolants ou matériaux diélectriques sont nombreux et variés. Différents critères peuvent être envisagés pour les classer. On constate deux grands critères :

- L'origine : naturelle ou artificielle,
- L'état : solide, liquide ou gazeux.

1.2.1 Isolants naturels

Un isolant naturel est issu de matériaux renouvelables, éventuellement disponibles localement et recyclables. Le lin, le chanvre, le coton sont des plantes cultivées. D'autres types d'origine animale tels que : la laine et les plumes. Les isolants naturels se déclinent en de multiples formes : en panneaux, rouleaux ou flocons en vrac. Ces isolants sont utilisés d'une façon directe ou d'une façon indirecte après leur amélioration dans des usines. L'avantage principal de ce type d'isolants est caractérisé par :

- Ce type d'isolant est économe en termes d'une ressource naturelle,
- Consomme moins d'énergie,
- Pas nocif et biodégradable.

1.2.2 Isolants artificiels

Les isolants artificiels et de synthèse proviennent principalement de l'industrie du pétrole et donc ils ont un impact écologique négatif. Il existe plusieurs types tels que :

- La mousse de polyuréthane : excellent isolant, cher, elle est moins stable dans le temps que ses concurrents,
- Les mousses de polymère ,
- Polystyrène expansé : il présente les avantages des polymères et de l'air ; léger, rigide, fragile et facile à découper.
- Polystyrène extrudé

1.3 Isolants pour matériel électrique

Dans un réseau électrique, il existe plusieurs équipements où on utilise dans leur construction des isolants solides, liquides ou gazeux. Les équipements les plus répandus sont :

- Les isolateurs,
- Les transformateurs de puissance,
- Les câbles souterrains,
- Les disjoncteurs.

Dans la partie de simulation l'étude est consacrée pour les deux premiers équipements ; c'est-à-dire les isolateurs et les transformateurs.

1.3.1 Isolateurs

Un isolateur est un composant électrotechnique destiné à fixer, maintenir ou soutenir les conducteurs électriques nus. On trouve des isolateurs en particulier sur les lignes à haute et très haute tensions, mais aussi dans les postes électriques. Ils assurent l'isolation entre les conducteurs et les pylônes. Les isolateurs étaient réalisés en verre, ou céramique. On en trouve maintenant en matériau synthétique.

L'isolateur est formé par une chaîne d'isolants dont le nombre est dépendant de la tension de service utilisée. Les isolants sont en verre, céramique ou matériaux synthétiques. Cette chaîne est fixée par deux pièces métalliques M_1 et M_2 : M_1 se fixe au pylône ; M_2 porte le conducteur [1]

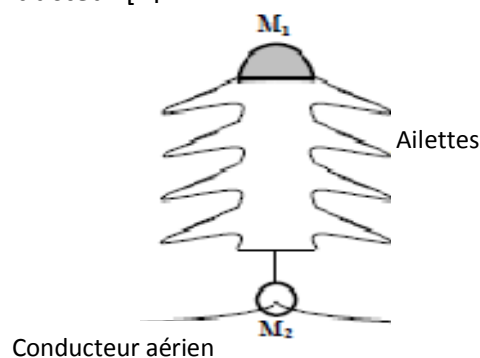


Fig. 1.1 Schéma simplifié d'un isolateur [1]

Les isolateurs en verre ou en céramique des lignes à haute tension ont en général la forme d'une assiette. On les associe entre eux pour former des chaînes d'isolateurs. On trouve aussi des isolateurs sous forme de colonne, avec toujours un profil en ailettes pour allonger la ligne de fuite, c'est-à-dire la distance aux bornes de l'isolateur, mesurée en suivant le profil de l'isolateur.

Les matériaux composites sont de plus en plus utilisés pour fabriquer des isolateurs en réalisant un axe central en fibre de verre et en surmoulant par dessus une matière silicone ou EPDM. Les isolateurs composites sont plus légers ; en général moins chers et présentent une excellente hydrophobicité. Ils sont en particulier prisés pour les zones fortement polluées et dans les zones urbaines.

Dans la gamme des très hautes tensions, le dimensionnement de l'isolation externe est déterminé principalement par les surtensions de manœuvre. Dans ces conditions, la tenue à la tension nominale à 50 Hz des isolateurs propres et secs est excellente. Généralement, elle est suffisante pour supporter les surtensions temporaires. Cependant, en l'absence des surtensions de foudre ou de manœuvre, de nombreux défauts sont enregistrés sur les lignes aériennes, particulièrement par temps humide (rosée, brouillard, pluie fine,...). Ces défauts sont dus à la pollution des isolateurs.

Cette pollution humide va déposer progressivement sur les isolateurs une couche de sel qui sur une longue échéance, recouvre toute la surface de l'isolant. Cette couche de sel devient conductrice sous certaines conditions. Un courant de fuite s'établit alors à travers la couche superficielle et des arcs peuvent prendre naissance et se développer jusqu'à provoquer le claquage total de l'isolateur.

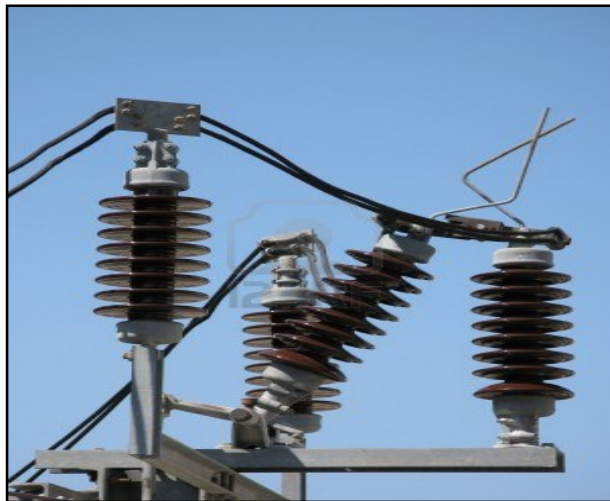


Fig.1.2 *Isolateur avec assiettes en céramique [2]*

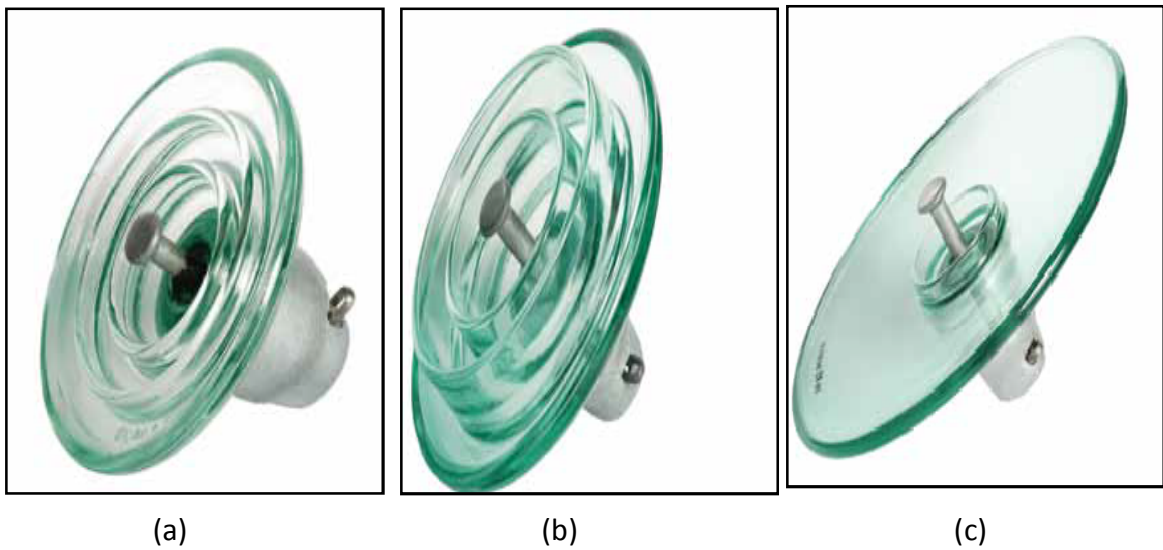


Fig.1.3 *Isolateur HT de suspension en verre [3]*

- (a) Isolateur HT de suspension en verre U40B
- (b) Isolateur HT de suspension en verre U70BLP
- (c) Isolateur HT de suspension en verre de profil aérodynamique U120AD

1.3.2 Transformateurs de puissance

Dans cette catégorie, on trouve deux types d'isolants :

- Solide : bois, papier ou carton Kraft,
- Liquide : huile.

Le papier ou carton sont imprégnés d'huile afin d'avoir une bonne isolation diélectrique. Puisque l'huile possède une bonne conductivité thermique, il sera servir comme un moyen pour évacuer la chaleur produite à l'intérieur du transformateur. Il existe deux types de transformateurs : type colonne (Fig.1.4) ou type galette.

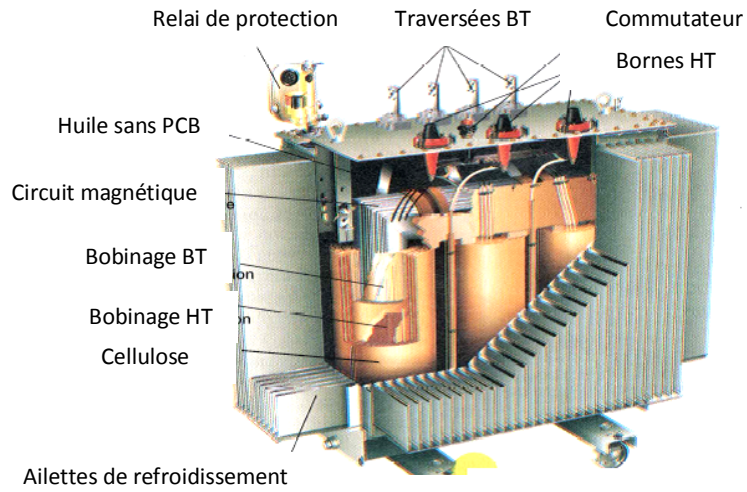


Fig. 1.4 Vue intérieure d'un transformateur type colonne [4]



Fig.1.5 Transformateur de puissance dans un poste électrique [5]



Fig.1.6 Transformateur Haute tension Nouvelle Génération 600 MVA 385 kV [6]

Dans les figures (1.5) et (1.6), on voit deux transformateurs implantés dans des postes d'utilisation avec tous ses accessoires tels que : Relais *Buchholz*, Traversées du primaire, Traversées du secondaire, ventilateurs de refroidissement et autres accessoires.

1.3.3 Câbles souterrains

Les premiers câbles souterrains étaient équipés d'une isolation à base du papier imprégné d'huile minérale. Les câbles utilisés aujourd'hui sont munis d'une isolation à base de polyoléfinés. Il existe plusieurs types d'isolants tels que :

- Polyéthylène à basse densité (PEBD),
- Polyéthylène à haute densité (PEHT),
- Ethylène propylène rubber (EPR) (caoutchouc),
- Ethylène propylène diène monomère (EPDM),
- polyéthylène réticulé chimiquement (PRC ou XLPE).

Les isolants synthétiques utilisés présentent des avantages tels que :

- Homogénéité vis-à-vis la migration des matières d'imprégnation,
- Supporter des températures élevées,
- Moins de maintenance.

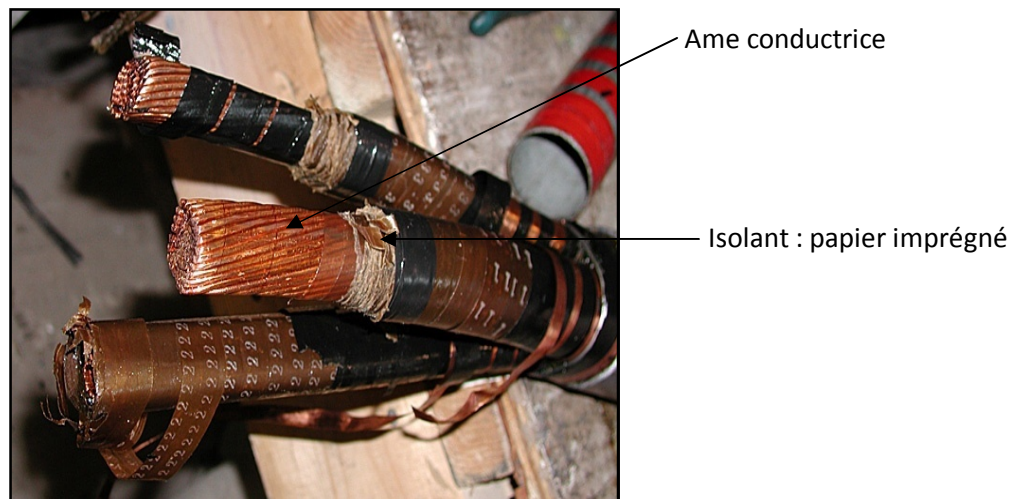


Fig.1.7 Câbles souterrains avec isolant en papier imprégné d'huile [7]

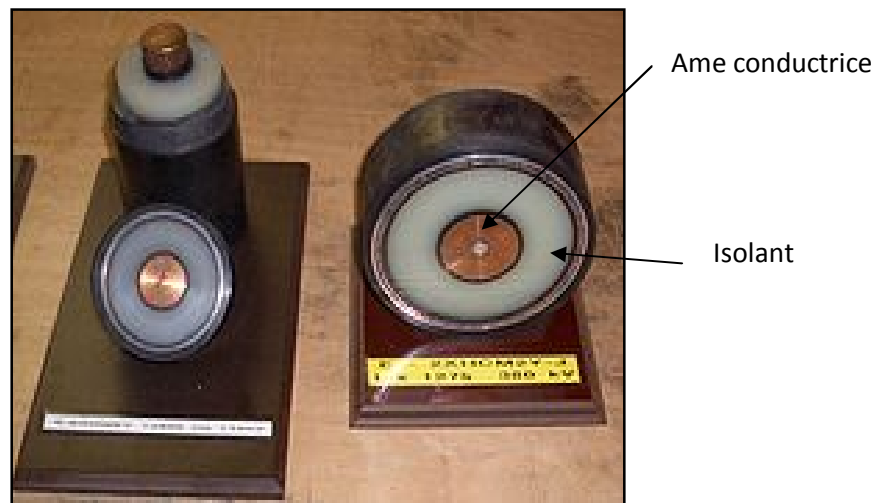


Fig.1.8 Segments des câbles de haute tension [8]

A droite un câble pour une tension de 380kV, à gauche pour une tension de 110kV

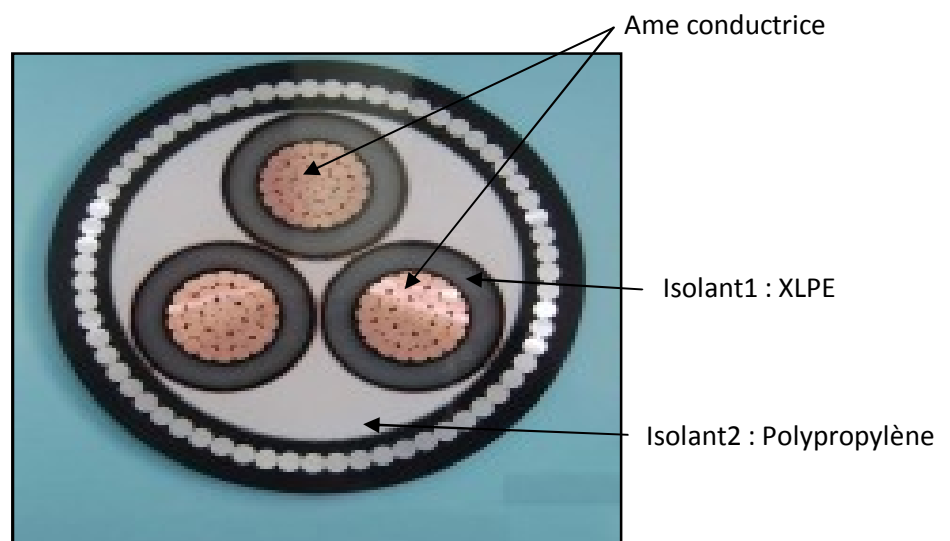


Fig.1.9 Isolant XLPE pour câbles triphasé de moyenne tension 35kV [9]

1.3.4 Disjoncteurs

Un disjoncteur est un moyen indispensable de protection des réseaux électriques de la production jusqu'à la distribution de l'énergie électrique. Il sert comme un interrupteur qui permet d'ouvrir ou d'établir une connexion sous la tension maximale du réseau qu'il protège (tension assignée). Il existe plusieurs types de disjoncteurs tels que :

- Disjoncteur à l'huile,
- Disjoncteur à air comprimé,

- Disjoncteur au SF₆.

Les isolants tels que : l'huile, air comprimé ou SF₆ servent à éliminer ou minimiser l'arc en retour et ensuite ouvrir le circuit. La performance d'un disjoncteur lorsqu'il peut couper le circuit en court circuit (pouvoir de coupure) sous la tension assignée. Aujourd'hui l'utilisation des disjoncteurs au SF₆ prennent son emplacement dans la réalisation des réseaux électriques. Cette efficacité est jugée par leur pouvoir de coupure élevé et moins d'encombrement en termes d'équipement.



Fig.1.10 Disjoncteur à air comprimé [10]



Fig.1.11 Disjoncteur au SF₆ [11]

1.4 Types de contraintes

Trois catégories principales de contraintes (électrique, mécanique et thermique) s'ajoute toujours aux d'autres influences spécifiques. Ces contraintes influent sur le matériel intéressé et son environnement et jouent un rôle important en vue de la tenue des isolations en service dans les systèmes électriques.

On va prendre quelques types et voir l'influence sur les isolants utilisés surtout dans les systèmes de transport d'énergie électrique. Ces contraintes peuvent provoquer des problèmes en termes de qualité de fonctionnement. En plus dans des circonstances diverses, on peut constater des relations de causalité de deux ou plusieurs contraintes. Il existe plusieurs, mais on peut citer les contraintes suivantes :

- Contraintes électriques,
- Contraintes mécaniques,
- Contraintes thermiques,
- Contraintes chimiques,
- Contraintes dues à l'environnement : action de l'humidité, de l'oxygène atmosphériques, action du rayonnement UV et action d'organismes vivants (bactéries, champignons, insectes...),
- Contraintes dues aux déchets industriels : pollutions industrielles de toutes natures, action des radiations nucléaires.

1.4.1 Contraintes électriques

Lors du fonctionnement des isolants plusieurs facteurs permettent d'affecter des contraintes de nature électrique. Parmi ces facteurs, on trouve :

- Nature de la tension : continue, alternative ou de choc,
- Amplitude de la tension,
- Fréquence de la tension,
- Durée de la tension : transitoire ou permanente.

1.4.1.1 Tenue à la tension de service

Le champ électrique appliqué aux isolations sous la tension de service est normalement inférieure à la valeur qui conduira à la perforation du diélectrique. L'application de la tension fait apparaître un certain nombre de phénomènes parasites qui provoquent la détérioration des isolants [12].

Le plus important et le plus nocif de ces phénomènes est celui des décharges partielles qui se manifestent soit à l'intérieur des cavités gazeuses de l'isolant, soit à la frontière entre l'isolant et un conducteur.

D'autres mécanismes peuvent intervenir pour provoquer sous la tension de service, la dégradation des isolants. Des irrégularités de la structure isolante, des impuretés conductrices incluses, mêmes microscopiques, peuvent provoquer des contraintes locales. Ceci peut aider au développement des cheminements conducteurs qui progressent jusqu'à la perforation de l'isolation.

Les isolateurs qui font en grande partie l'objet de notre étude, sont des équipements destinés à supporter des organes sous tensions dans l'air et à les isoler entre eux par rapport à la terre. La défaillance des isolateurs peut se manifester soit par un arc de contournement dans l'air à la surface, soit par une perforation du matériau solide constituant l'isolateur et provoquant sa détérioration.

1.4.1.2 Tenue aux surtensions

Les isolants peuvent subir en basse tension des surtensions passagères pouvant affecter leur dysfonctionnement. Lorsque la tension devient plus en plus élevée les contraintes deviennent plus sévères. Il faut donc noter qu'on doit prendre en considération toutes les contraintes possibles lors du dimensionnement des isolations. L'influence de la tension sur l'isolation peut être gênante selon plusieurs critères :

- La nature de la tension, soit interne de manœuvre (enclenchement des disjoncteurs), soit externe au réseau électrique (coup de foudre),
- L'amplitude de la tension,
- La polarité de l'onde,
- La durée d'impact.

1.4.2 Contraintes mécaniques

Dans cette catégorie on peut citer quelques problèmes qui sont dus aux contraintes mécaniques :

- Contraintes mécaniques élémentaires telles que traction, compression, flexion, cisaillement ou torsion pour un isolant solide,
- Pour un isolant liquide, on peut citer les efforts dynamiques exercés en mouvement,
- Influence de la température sur la structure des isolants, ce qui peut causer des efforts internes,
- Des efforts dynamiques causés par des facteurs externes tels que les décharges de foudre.

1.4.3 Contraintes thermiques

Les problèmes causés par ces contraintes sont beaucoup. On peut citer les suivants :

- Problèmes de dilatation et peut être la fusion de l'isolant,
- Des efforts dynamiques résultants pouvant causer des fissures et même une destruction totale de l'isolant,
- Des évaporations pour des isolants de nature liquide.

1.4.4 Contraintes chimiques

Ce type de contraintes peut affecter le comportement des isolants et affaibli leur efficacité. Parmi ces contraintes, on peut citer :

- L'influence de certaines solutions qui peuvent causer des fissures ou modifier la structure du matériau isolant,
- L'influence de la propriété chimique du liquide d'imprégnation sur l'efficacité des isolants tels que les papiers utilisés dans les transformateurs ou dans les câbles souterrains.

1.4.5 Contraintes dues à l'environnement

Certains matériels équipés d'isolation sont utilisés dans les réseaux électriques. Ils peuvent être directement exposés aux intempéries et subir des contraintes climatiques variées. Ces contraintes peuvent affaiblir la rigidité diélectrique des isolants. On peut noter les influences suivantes :

- L'humidité atmosphérique qui pénètre dans les isolations et affecte fortement leur tenue diélectrique,
- L'Action chimique représentée par l'oxydation des isolations par l'oxygène atmosphérique,
- L'influence de radiations ultra-violettes,
- L'influence des efforts dynamiques dus aux vents,
- L'influence des actions météorologiques telles que la pluie, la neige et formation de la glace qui est un facteur majeur pour les isolateurs,
- L'influence de la variation de la température sur le comportement des isolants,
- La pollution atmosphérique des régions industrielles peuvent affecter la tenue diélectrique superficielle des isolants (dépôt de poussière sur des isolateurs).

1.4.6 Contraintes dues aux déchets industriels

L'influence de ce type de contrainte est caractérisée par une influence directe ou indirecte. On peut citer :

- L'influence de certaines solutions ou matières sur les câbles souterrains,
- Les gazes émis par les déchets industriels tels que le méthane peut causer des explosions et/ou incendies,
- Des fumées émises par des usines peuvent causer des dépôts sur les isolateurs par exemple, et rendre ces isolants moins efficaces.

Dans ce qui suit on va détailler l'influence des différentes contraintes sur les propriétés diélectriques des isolants tels que leur rigidité diélectrique. On prend comme exemples d'étude, les isolateurs et les isolants utilisés dans les transformateurs de puissance.

1.5 Méthodes électriques de diagnostic

Des mesures électriques sont nécessaires à effectuer aux isolants afin de bien juger leur comportement lors du fonctionnement. On peut citer les mesures suivantes [13] :

- Le facteur de dissipation diélectrique,
- La capacité,
- L'indice de polarisation,
- Le taux de décharges partielles,
- La rigidité diélectrique,
- Le taux de charges électrostatiques.

1.5.1 Mesure du facteur de dissipation diélectrique

Ce facteur interprète la dégradation chimique qui peut conduire à une instabilité thermique. L'augmentation du facteur de dissipation avec la tension s'explique en général par l'énergie dissipée dans les décharges partielles.

1.5.2 Mesure de la capacité

C'est l'une des méthodes les plus efficaces pour contrôler les claquages partiels d'isolation ; comme par exemple l'état des traversées au papier enduit de résine et l'isolation des condensateurs.

1.5.3 *Mesure de l'indice de polarisation*

La variation du courant de conduction avec la tension et, en particulier, l'importance de l'écart par rapport à la loi d'Ohm peut donner des indications sur la fatigue de l'isolation. Un isolant vieillit, peut être un indice assez sûr de fissurations avec éventuellement une pénétration d'humidité.

1.5.4 *Mesures de décharges partielles*

Les mesures de décharges partielles constituent l'une des voies les plus fécondes pour explorer, de façon non destructive, l'état des isolations. De nombreuses méthodes électriques de mesure ont été développées et ont conduit à la réalisation de mesureurs maniables et fiables. On peut distinguer deux grandes catégories :

- Appareils qui effectuent une mesure globale moyenne. Le principe est de mesurer à l'intérieur d'une bande de fréquences étroites et différentes les uns des autres par le choix de la fréquence d'accord,
- Appareils à bande large adaptés spécialement pour les décharges peut nombreuses.

1.5.5 *Mesure de la rigidité diélectrique*

La rigidité diélectrique d'un milieu isolant représente la valeur maximale du champ électrique que le milieu peut supporter avant le déclenchement d'un arc électrique (donc d'un court-circuit ou d'un claquage). On utilise aussi l'expression champ disruptif qui est synonyme mais plus fréquemment utilisée pour qualifier la tenue d'une installation. La mesure de cette rigidité peut être faite en trois parties :

- Mesure à fréquence industrielle,
- Mesure en tension continu,
- Mesure complémentaires aux essais aux ondes de choc 1.2/50 μs .

De nombreux phénomènes entrent en jeu lors du vieillissement provoquant une diminution de la rigidité diélectrique et par conséquent la dégradation de l'isolant. On peut constater les observations suivantes :

- La dégradation s'accélère tant qu'il y aura plus de défauts d'homogénéité, cavités et inclusions des particules étrangères dans l'isolant,
- Les arborescences qui mènent à la dégradation. Ces arborescences croissent au cours du temps à cause du champ électrique suffisamment élevé et par l'impact des transformations chimiques induites par érosion ou fusion localisée.

1.5.6 Mesure du taux de charges électrostatiques

On sait que les charges électrostatiques existent tout le temps. L'accumulation de ces charges favorise l'augmentation du champ électrique local où elles sont concentrées et dans certaines conditions, on aura une disruption qui peut engendrer la dégradation de l'isolant.

Il est possible de mesurer l'électricité statique indirectement par l'effet qu'elle produit. Aujourd'hui les appareils de mesure d'intensité de champs sont utilisés. Ils s'appuient sur la méthode de modulation ou d'influence. Ces appareils travaillent sans contact et mesurent la valeur et la polarité du champ électrique. Les appareils de mesure de l'influence, mesurent directement les charges qui sont générées par le champ électrostatique d'un objet.

1.6 Comportement des diélectriques

On parle ici des matériaux diélectriques ou plus couramment diélectriques en spécifiant l'application des isolants dans les systèmes électriques et spécialement traités dans cette thèse concernant les systèmes de transport d'énergie électrique.

Un matériau est diélectrique s'il ne contient pas de charges électriques susceptibles de se déplacer de façon macroscopique. Autrement dit, c'est un milieu qui ne peut pas conduire le courant électrique. A ce titre, on l'appelle parfois isolant électrique. On compte parmi ces milieux le verre et de nombreux plastiques.

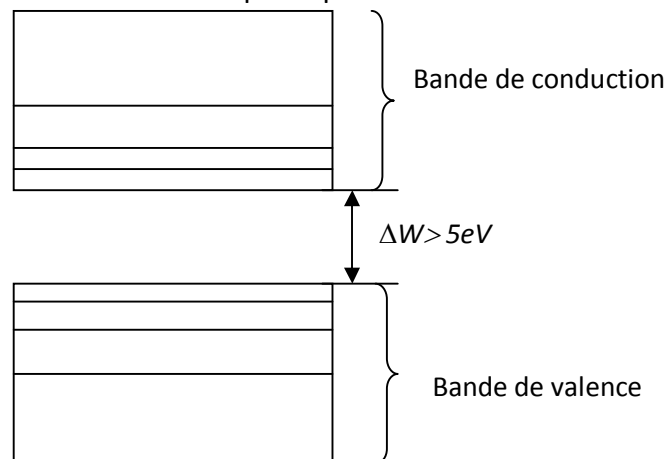


Fig.1.12 Bandes d'énergie d'un isolant

Un isolant possède peu de charges libres qu'y sont piégées, contrairement à un matériau conducteur où les charges sont nombreuses et libres de se déplacer sous l'action d'un champ électrique. Malgré l'impossibilité des milieux diélectriques de conduire le courant, ils présentent de nombreuses caractéristiques électriques. En effet les atomes qui constituent le matériau peuvent présenter des dipôles électrostatiques qui

sont susceptibles d'interagir avec un champ électrique. Cette interaction se traduit par la création d'une polarisation reliée à ce champ électrique, au niveau microscopique, par une polarisabilité, et au niveau macroscopique, par la susceptibilité électrique.

Donc, les matériaux diélectriques vont subir trois propriétés qui peuvent les dysfonctionner. Les propriétés sont :

- Polarisation,
- Aimantation,
- Conduction.

1.7 Mécanismes de claquage

On appelle claquage la perte subite de la propriété isolante d'un diélectrique soumis à un champ. Le claquage intervient lorsqu'on dépasse la rigidité diélectrique. On désigne par l'expression décharge électrique, ou simplement décharge, le passage du courant dans un diélectrique, lors d'un claquage. Dans une décharge, il existe au moins un chemin à haute conductivité reliant les électrodes. Il existe d'autres décharges qui se naissent dans un isolant dans des zones étroites ou localisées. Ces décharges s'appellent décharges partielles. Le courant véhiculé par les décharges partielles ne représente qu'une petite fraction du courant de déplacement.

Les mécanismes responsables des claquages sont divisés en deux grandes catégories :

- Claquage thermique,
- Claquage intrinsèque.

1.7.1 Claquage thermique

Les pertes diélectriques de polarisation et de conduction provoquent un dégagement de chaleur dans les isolants. La température de l'isolant augmente tant que la quantité de chaleur évacuée est inférieure à la chaleur produite. L'accroissement de la chaleur est peut être interprétée par l'augmentation de la conductivité thermique. Si la température de l'isolant dépasse un certain seuil, une décharge se manifeste qui s'appelle claquage thermique. Parfois, celui-ci est précédé de la décomposition chimique ou de la fusion de l'isolant

A titre d'exemple, on peut calculer la rigidité diélectrique relative au claquage thermique d'un échantillon cylindrique (Fig.1.13). Les hypothèses suivantes sont prises en considération [14] :

- L'échange thermique se fait uniquement pour la surface latérale,
- La température est uniforme dans le cylindre,
- Les pertes diélectriques de polarisation sont négligeables devant les pertes diélectriques de conduction,

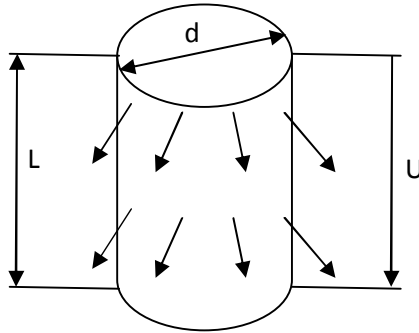


Fig.1.13 Isolant avec une géométrie cylindrique

La puissance P_j dissipée dans le cylindre vaut :

$$P_j = U^2/R \quad (1.1)$$

Où

$$1/R = \sigma_{th} \frac{\pi d^2}{4L} \quad (1.2)$$

Soit T_0 la température du milieu ambiant, supposée constante, et T la température du cylindre. Posons :

$$\Delta T = T - T_0 \quad (1.3)$$

D'autre part, on a l'équation de la conductivité qui s'écrit :

$$\sigma = \sigma_0 \exp\left(-\frac{w_a}{k_B(T_0 + \Delta T)}\right) \quad (1.4)$$

k_b : coefficient de Boltzmann,

w_a : énergie d'activation

Soit encore

$$\sigma = \sigma_0 \exp\left(-\frac{w_a T_0}{k_B(T_0^2 - \Delta T^2)}\right) \exp\left(-\frac{w_a \Delta T}{k_B(T_0^2 - \Delta T^2)}\right) \quad (1.5)$$

En supposant que le coefficient de transmission de chaleur (λ) à la surface du cylindre est indépendant de la température, on peut écrire :

$$\sigma = \sigma'_0 \exp(\gamma \Delta T) \quad (1.6)$$

D'où

$$P_j = \frac{U^2 \sigma'_0 \pi d^2}{4L} \exp(\gamma \Delta T) \quad (1.7)$$

D'autre part, la puissance transmise P_R par l'isolant au milieu ambiant vaut :

$$P_R = \lambda \pi d L \Delta T \quad (1.8)$$

A l'équilibre :

$$P_j = P_R \quad (1.9)$$

D'où :

$$\Delta T = \frac{U^2 \sigma'_0 d}{4\lambda L^2} \exp(\gamma \Delta T) \quad (1.10)$$

Correspondant à une tension U_c , la valeur maximum de ΔT au-delà de laquelle la température de l'échantillon va croître, en théorie, indéfiniment.

Pour $\Delta T = \Delta T_c$, on en plus la relation :

$$\frac{\partial P_j}{\partial \Delta T} = \frac{\partial P_R}{\partial \Delta T} \quad (1.11)$$

On tire donc le résultat en prenant en considération (1.9) et (1.11)

$$\Delta T_c = \frac{1}{\gamma} \quad (1.12)$$

D'où part la relation (1.10), la rigidité diélectrique trouvée est :

$$E_c = 1.21 \sqrt{\frac{\lambda}{\gamma \sigma_0 d}} \quad (1.13)$$

1.7.2 Claquage intrinsèque

D'une manière générale, on peut dire que le mécanisme d'avalanche est à l'origine de ce claquage. Les électrons de conduction et les électrons provenant de niveaux isolés proches de la bande de conduction participent à ce processus. Les niveaux isolés proviennent d'imperfections telles que les défauts ponctuels, les dislocations et les joints de grain. Dans le cas des structures semi-cristallins ou amorphes, l'étude devient plus délicate et plus compliquée.

Le claquage intrinsèque se déclenche dans un diélectrique lorsque le champ appliqué dépasse le seuil critique. Il se manifeste par les étapes suivantes [15] :

- Les collisions déclenchées par le claquage produisent des électrons mobiles, et des trous moins mobiles. Ces trous créent une charge d'espace qui déforme le champ électrique, le renforçant au voisinage de la cathode et le diminuant près de l'anode,
- Le taux de collisions croît près de la cathode favorisant le courant d'émission électronique et d'autre part renforçant le champ électrique local,
- Les conditions pour une évolution divergente sont satisfaites ; le diélectrique est rapidement détruit par une émission massive d'électrons d'où la disruption.

1.8 Phénomène de contournement

Le contournement d'un isolant ou diélectrique est dit lorsqu'on a une décharge électrique qui se manifeste. Cette décharge peut se produire à l'intérieur ou à la surface. Le contournement est donc l'apparition d'un arc manifesté par un courant de décharge. Des conditions doivent être satisfaites pour qu'il y ait un contournement. On peut citer essentiellement :

- Surface polluée,
- Champ électrique suffisant à la disruption qui est en liaison avec la distance de décharge.

Le processus de contournement sur une surface isolante polluée se déroulera en quatre étapes [16, 17]:

- Dépôt du polluant : dépôt de tout genre de pollution comme par exemple la formation de la glace sur la surface d'un isolateur dans les zones froides,
- Mouillage de la couche de pollution : les conditions météorologiques (brouillard, pluie, neige...) causent la diminution de la résistance de la couche polluée se qui favorise l'apparition de la décharge (figure 1.14a),
- La formation de la bande sèche et de l'arc local : la non homogénéité de l'isolant tel que un isolateur mène à la naissance des zones de forte intensité (figure 1.14b) ce qui provoque une décharge dite locale qui peut s'étaler le long d'un isolant (figure 1.14c). le contournement peut ne pas s'achever et dans ce cas on dit que l'arc est éteint (figure 1.14d),
- Le développement d'un arc et l'achèvement du contournement : dans des conditions favorisantes l'arc peut se déplacer latéralement (figure 1.14e) vers une position stable ou longitudinalement (figure 1.14f) jusqu'à atteindre les électrodes et dans ce cas un arc de contournement global s'achève. Dans ce cas on dit qu'on a arrivé à une disruption totale du milieu isolant.

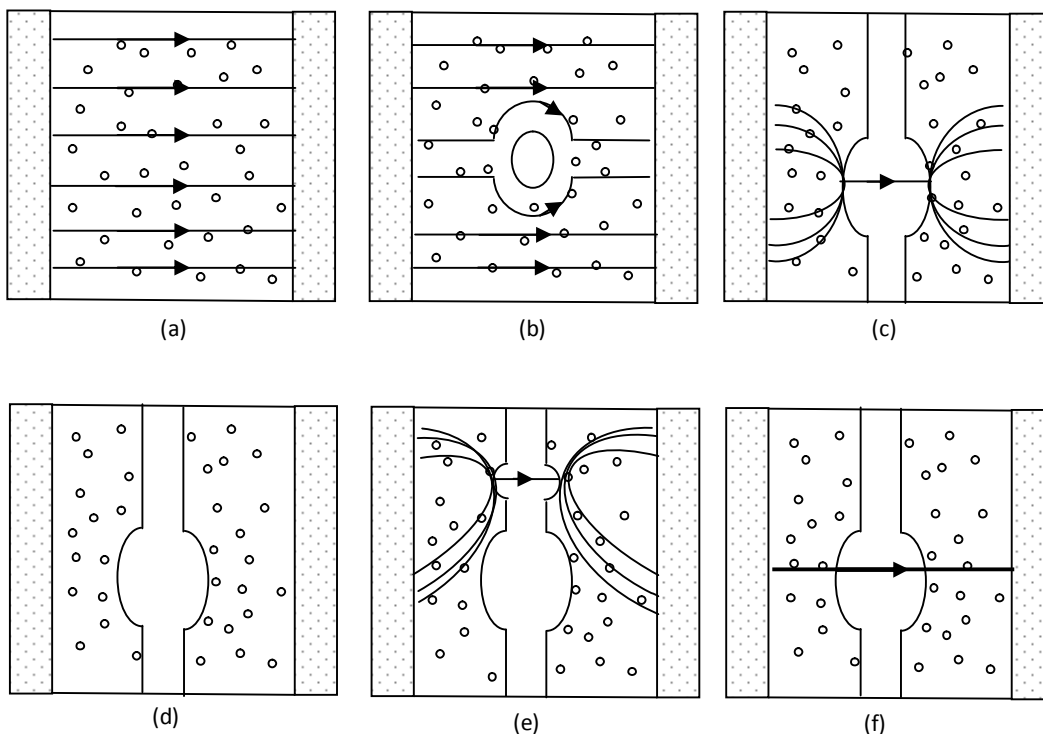


Fig. 1.14 Etapes successives du contournement d'une couche polluante [17]

Plusieurs études [18-21] ont été faites sur plusieurs types d'isolateurs et voir l'effet de la nature de la tension sur l'apparition de la décharge.

1.9 Conclusion

De nombreux défis doivent être relevés pour garantir la fiabilité des systèmes d'isolation des équipements des réseaux de transport d'énergie électrique pour assurer le confort , la sécurité , le cout et l'impact sur l'environnement. Nous avons identifié les contraintes spécifiques aux systèmes d'isolation et rappelé la quantification expérimentale de l'impact de ces contraintes sur l'occurrence des défaillances des réseaux électriques afin d'apporter, dans le futur, soit des outils d'aide aux dimensionnements, soit des critères de choix d'équipements via la préconisation des tests spécifiques, pour garantir la fiabilité de la fonction d'isolation.

CHAPITRE 2

Dégradation de l'Isolation dans les Dispositifs Electriques

2.1 Introduction

Plusieurs travaux et recherches ont été élaborés afin de bien comprendre le comportement des isolants dans les systèmes électriques et surtout les réseaux de production-transport d'énergie électrique.

Les travaux effectués sont classés en deux catégories :

- Travaux expérimentaux,
- Travaux de simulation.

La première catégorie comporte des tests expérimentaux tels que :

- Méthode par la capture photographique pour voir la progression des streamer sur une glace [22],
- Mesure spectrométrique des décharges sur des glaces (spectroscopie) [23],
- Test sur l'effet du vent sur le dépôt des glaces sur des isolateurs [24],
- Test sur le vieillissement thermique accéléré des isolants [25, 26],
- Test sur l'effet du brouillard sur des isolateurs [27],
- Test sur l'effet de l'eau sur l'isolant des câbles souterrains [28],
- Test sur l'effet de la pluie sur la tension de tenue des isolateurs,
- Voir l'effet de la géométrie des isolateurs sur leur efficacité [29],
- Test sur l'effet de la polarité de la tension sur les décharges des isolateurs [30],
- Tests chimiques sur les câbles souterrains [31],
- Mesure des composantes furaniques dans l'isolation des transformateurs de puissance [32-35],
- Mesure de la densité des glaces par la technique de fluorescence basée sur les rayons X [36],
- Technique de la mesure des bruits ultrasoniques émis par les isolateurs [37].

On trouve dans la deuxième catégorie des travaux de simulation basés sur des différentes méthodes telles que :

- La méthode du courant de polarisation et de dépolarisation (PDC) pour le diagnostic des câbles souterrains [38-41],
- Les méthodes des différences finies et éléments finis pour voir la distribution du champ électrique par exemple pour des géométries différentes ; simples ou complexes [42-44],
- La méthode de la logique floue (FL) [45, 46],
- La méthode d'optimisation par essaim de particules (PSO) [47-49],
- La méthode des réseaux de neurones artificiels (ANN) [50-54],
- La méthode des machines à vecteurs de support (SVM et LS-SVM),

- Autres modèles hybrides qui combinent entre deux ou plusieurs méthodes [55-58].

2.2 Méthode par la capture photographique

Cette méthode consiste à prendre des photos successives en utilisant des caméras spéciales. Cette capture permet de visualiser la progression d'un tel phénomène comme le développement des streamers. Des tests faites par des chercheurs tels que : *M. Farzaneh et I. Fofana* [22] ont montré le phénomène des décharges de type corona et le développement des streamers le long de la chaîne d'un isolateur (Fig. 2.1 et 2.2)

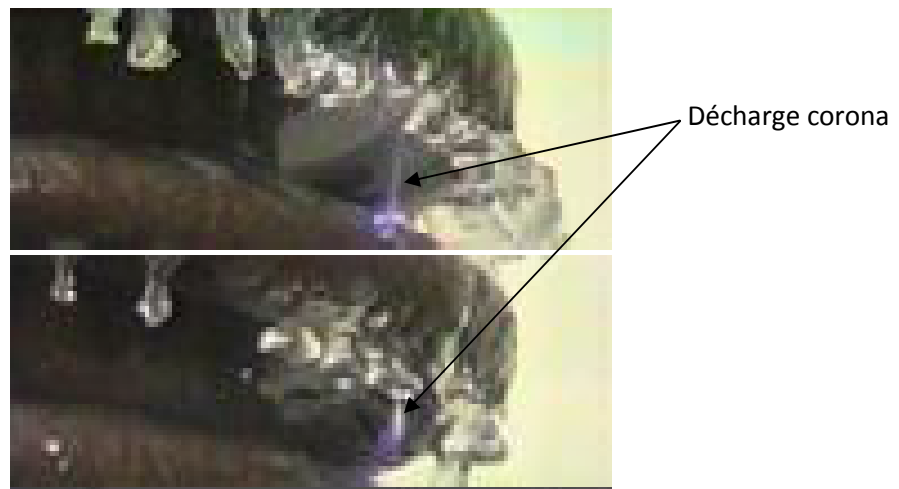


Fig.2.1 Streamer de corona le long de la glace de la chaine supérieure [22]

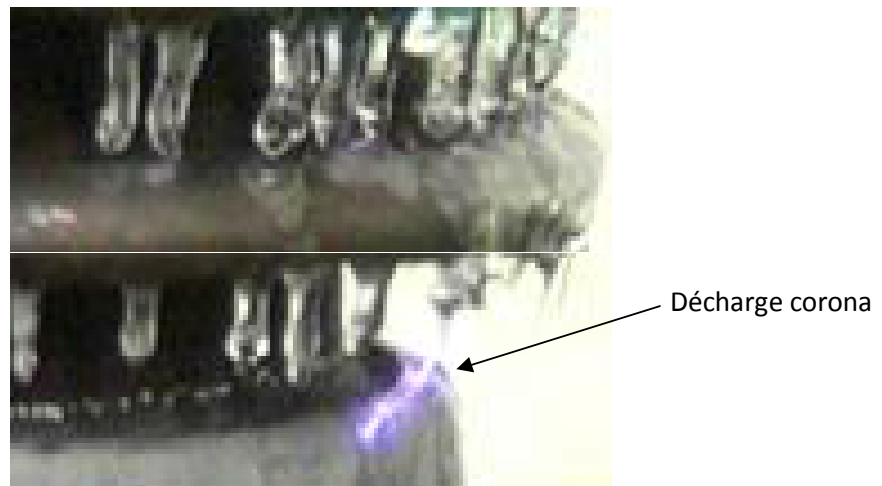


Fig.2.2 Streamer de corona le long de la glace de la chaine inférieure [22]

Des images ont été prises par un balayage d'une période de 100ns sont représentées dans les figures 2.3 et 2.4. La première présente le streamer à la surface de la glace et la deuxième montre le développement dans l'intervalle d'air.

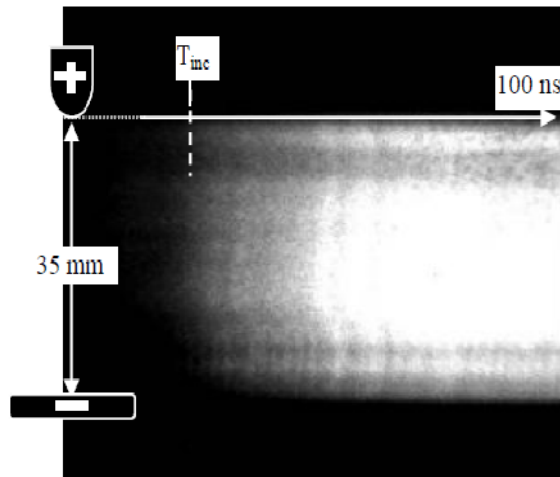


Fig.2.3 Décharge corona sur la surface de la glace [22]

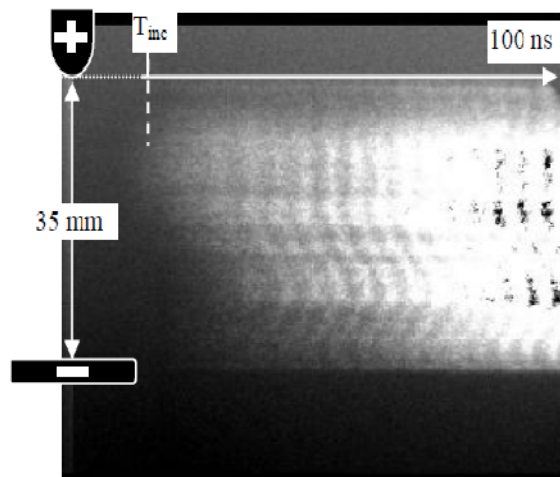


Fig.2.4 Décharge corona dans l'intervalle d'air [22]

Depuis les deux figures précédentes, *M. Farzaneh et I. Fofana* ont constaté que premièrement le développement des streamers est de l'électrode HT (Anode) vers l'électrode de la masse (Cathode) ; deuxièmement, la vitesse des streamers sur la glace est supérieure à celle dans l'intervalle d'air.

2.3 Mesure spectrométrique des décharges

Cette technique de mesure consiste à utiliser un spectromètre qui permet de visualiser les bandes de fréquences des rayons émis par la décharge. *A. Nekahi et M. Farzaneh* [23] ont appliqué cette technique pour collecter des informations concernant la composition de la pollution de la glace et ensuite voir l'aspect du développement de la décharge. Ils ont constaté que la lumière émise par la décharge le long de la glace est une

bande de longueurs d'ondes qui s'étalent de 300nm à 850nm. La figure 2.5 montre le dispositif expérimental de la mesure spectroscopique.

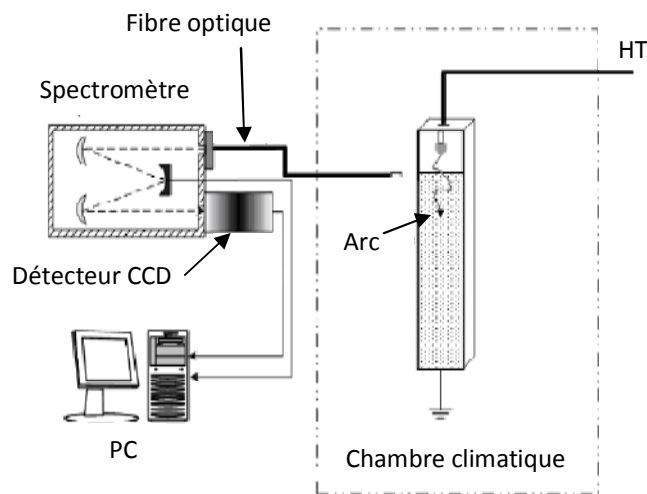


Fig.2.5 Schéma illustratif du banc d'essai expérimental [23]

Dans la figure on trouve des éléments qui ont pour but le suivant :

- Fibre optique pour capter le rayonnement de la décharge (arc) et le conduire vers le spectromètre,
- Spectromètre permet de donner le spectre de la décharge,
- Détecteur CCD permet de régler le temps de l'analyse spectrale vers l'acquisition des données dans le PC,
- Chambre climatique permet de régler la température afin d'avoir une glace quasiment plate.

Par l'analyse de plusieurs spectres, ces chercheurs [23] ont constaté que la décharge de l'arc de contournement et émis dans le spectre visible.

2.4 Effet du vent sur le dépôt des glaces

Md. Abdus Salam et al. [24] ont placé un dispositif expérimental (voir fig. 2.6) dans une région de Malaisie auprès de la cote qui touche la mer de la chine au sud. Les tests expérimentaux faits ont pour but de voir les effets de :

- La pollution causée par les sels de la mer sur les isolateurs,
- Le vent sur le dépôt de sel sur les isolateurs.



Fig. 2.6 Dispositif expérimental pour la collection des données [24]

Ces chercheurs ont constaté que :

- La mesure du degré de la contamination des surfaces des isolateurs est une tâche difficile,
- Les mesures doivent être illustrées en prenant en considération les facteurs régionaux et météorologiques,
- Plus la vitesse du vent augmente, plus la contamination prend un effet significatif sur le fonctionnement des isolateurs (Fig. 2.7)

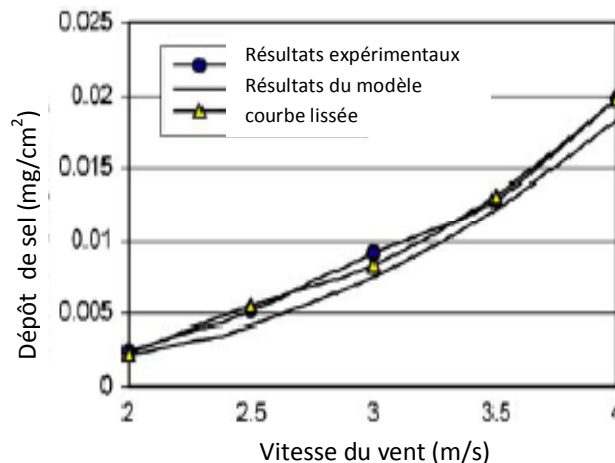


Fig. 2.7 Variation de la densité de dépôt du en fonction de la vitesse du vent [24]

2.5 Vieillessement thermique accéléré des isolants

Une étude a été faite par *F. Mauseth et H. L. Halvorson* [25] consiste à voir l'effet du vieillissement thermique accéléré sur les isolants de type XLPE des câbles souterrains. Le test est élaboré par l'application des courants forts dans les câbles et puis l'effet de Joule qui permet de dégager la chaleur. Les mesures effectuées prennent en considération le taux de décharges partielles dans une bande de fréquences allant de 10MHz jusqu'à 100Hz avec une tension maximale de 12kV.

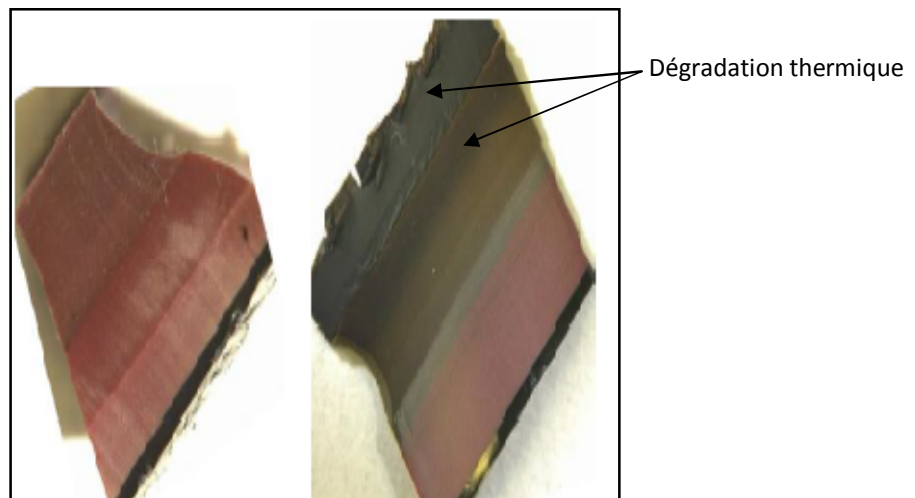


Fig. 2.8 Tranche microtomée de l'isolant d'un câble souterrain [25]

A gauche isolant sain, à droite isolant dégradé

Les deux chercheurs ont constaté que :

- Les décharges partielles prennent effet aux fréquences élevées testées telles que : 50 et 100Hz,
- Pas d'enregistrement de décharges en dessous de 10 cycles et influent significativement au delà de 14 cycles,
- La partie dégradée de l'isolant se décolore (voir fig. 2.8)

Une autre recherche faite par *T. Seghier et al.* [26] présente l'influence de la température sur le taux de vieillissement du papier utilisé dans les transformateurs de puissance. L'expérience faite par ces chercheurs consiste à faire varier la température d'essai et voir son influence sur le papier imprégné d'huile. Ils ont utilisé deux types de papier isolant :

- Papier carton (pressboard),
- Papier kraft.

Le bon d'essai est montré dans la figure (2.9). Parmi leurs résultats, on cite les courbes montrées dans la figure (2.10)

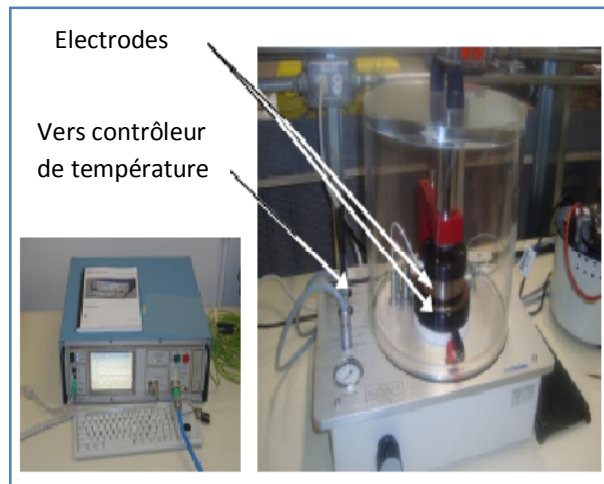


Fig. 2.9 Cellule de mesure pour le diagnostic expérimental [26]

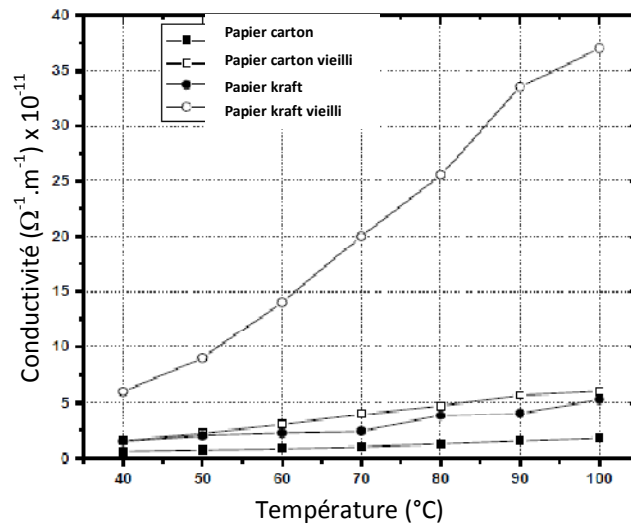


Fig. 2.10 Conductivité des papiers à 60 Hz en fonction de la température [26]

On voit clairement d'après la figure (2.10) que la conductivité électrique est proportionnelle à la température. En plus ces tests montrent que le papier carton présente une meilleure tenue diélectrique que le papier kraft.

2.6 Effet du brouillard ultrasonique sur des isolateurs

Xingliang Jiang et al. [27] ont fait des tests sur des isolateurs afin de voir la variation de la tension de contournement en fonction de la pollution caractérisée par la densité de dépôt du sel sur la surface des isolateurs. Ils ont utilisé une chambre climatique spéciale afin de bien contrôler la température à l'intérieur (voir fig. 2.11)



Fig. 2.11 *Chambre climatique –université de Chongqing [27]*

Ces chercheurs ont fait des tests sur trois échantillons ; deux sur isolateur en porcelaine et le troisième en verre. Ils ont suivi les étapes suivantes :

- Les surfaces des isolateurs étaient dépolluées de toute trace de poussière ou de gras avec un mélange d'eau purifiée et du trisodium de phosphate (Na_3PO_4),
- Les surfaces sont laissées sécher naturellement,
- Mettre plusieurs quantités de sel selon le nombre de tests avec une densité qui varie de $0.05\text{mg}/\text{cm}^2$ à $0.20\text{mg}/\text{cm}^2$,
- Utiliser des brosses afin de bien homogénéiser la pollution sur la surface d'isolateur,
- Après 24h de séchage naturel, la couche de la pollution est mouillée avec un jet réglé d'un brouillard ultrasonique afin de bien contrôler la conductivité de la pollution.

Après les tests, ils ont constaté que :

- La variation de la tension de contournement en fonction de la densité du sel suit une loi exponentielle négative,
- Influence de la pollution caractérisée par le dépôt du sel est indépendante de la conductivité du brouillard jeté sur la surface.

2.7 Effet de l'eau sur l'isolant des câbles souterrains

On sait que les caractéristiques électriques de l'isolant d'un câble souterrain sont affectées par la présence de l'eau dedans. S.V. Nikolajevic a et R. Drca [28] ont fait des tests sur plusieurs gammes de câbles souterrains avec une isolation de type XLPE. Ils injectaient de l'eau dans les câbles en différentes étapes et en différents endroits. Les résultats obtenus sont mentionnés dans la figure (2.12)

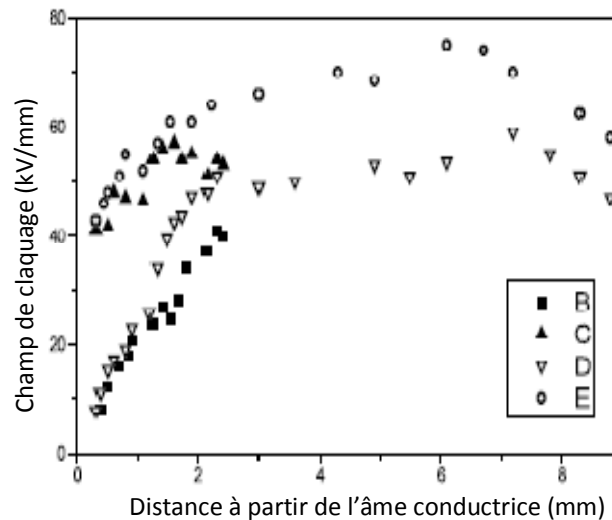


Fig. 2.12 Champ disruptif vs. Distance à partir de l'âme conductrice [28]
B et D câbles après vieillissement, C et E avant vieillissement

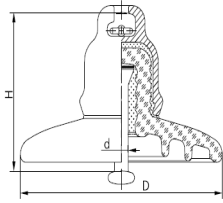
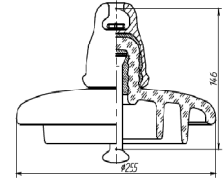
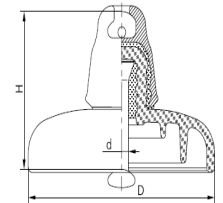
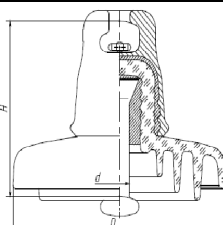
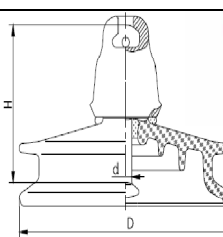
Ils ont constaté que :

- L'eau est un facteur qui accélère le vieillissement des câbles souterrains,
- Le champ disruptif est alors faible pour un câble vieilli,
- L'eau qui pénètre occupe les cavités dans l'isolant du câble et ensuite diminuer la rigidité diélectrique,
- L'effet significatif de la quantité de l'eau pénétrante et la direction de pénétration sur le taux de vieillissement.

2.8 Effet de la pluie sur la tension de tenue des isolateurs

Ces tests sont faits par le groupe « *Global Insulator* » [3]. Les résultats de l'étude est illustré dans un catalogue des produits pour l'année 2012. Ils ont fait plusieurs tests sur plusieurs types d'isolateurs en verre avec des géométries différentes. On a pris quelques résultats qui sont présentés dans le tableau (2.1)

Tableau 2.1 Influence de la pluie sur la tension de tenue pour différentes géométries d'isolateurs [3]

| Schéma | Référence | Géométrie | | | Test de la tension de tenue | |
|---|-----------|-----------|--------|--------|-----------------------------|-----------------|
| | | D (mm) | d (mm) | H (mm) | A sec (kV) | Sous pluie (kV) |
|  | U40B | 175 | 11 | 110 | 55 | 33 |
|  | U70BL | 255 | 16 | 146 | 72 | 42 |
|  | U160BL | 280 | 20 | 170 | 75 | 45 |
|  | U530B | 360 | 32 | 240 | 95 | 55 |
|  | PSD70E | 270 | 16 | 127 | 75 | 45 |

D'après les résultats présentés dans le tableau (2.1), on peut dire que la tension de tenue sous condition de pluie a diminué de 40% environ. Cela traduit que la pluie sous forme de gouttelettes déposées sur la surface d'un isolateur permettent de favoriser le passage du courant de fuite.

2.9 Effet de la géométrie des isolateurs sur leur efficacité

Une étude faite par *Rabah Chaarani* [29] consiste à voir l'influence des propriétés géométriques des isolateurs sur leur comportement vis-à-vis la tension de la tenue. A cet aspect, il s'est intéressé à étudier :

- L'influence du diamètre moyen de l'isolateur sur la tension de la tenue sous condition de givrage,
- L'influence de la répartition des intervalles d'air le long de l'isolateur sur la tension de la tenue,
- L'influence du taux d'accumulation de la glace sur la chaîne des isolateurs sur leur tenue.

Tous ces tests sont expliqués par un processus très important ; c'est la ligne de fuite que prene l'arc pendant son progression et par suite le claquage de l'intervalle d'air près de l'isolateur et enfin le disfonctionnement de son efficacité. Si ce phénomène persiste, il se peut que l'isolateur soit défectueux. Parmi les tests faits par ce chercheur, on peut citer le test de l'influence du diamètre de la glace sur la tenue de l'isolateur (Fig. 2.13)

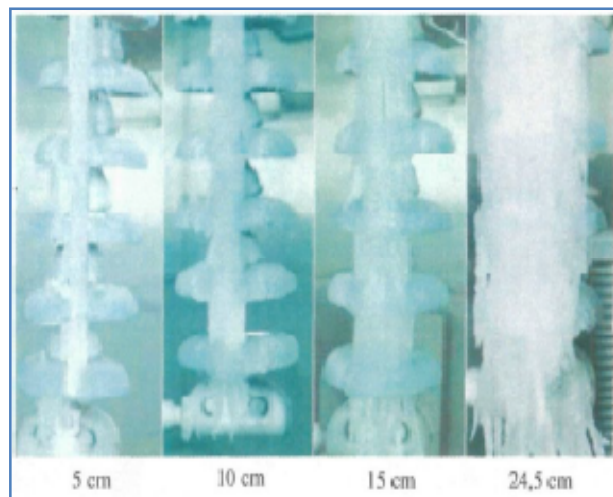


Fig. 2.13 Accumulation de glace de largeurs différentes sur une chaîne d'isolateurs [29]

Des mesures enregistrées concernant le courant pendant la phase de la tenue et après contournement. Dans la figure (2.14), on donne par exemple des mesures pour l'échantillon de 15cm de diamètre pour la glace

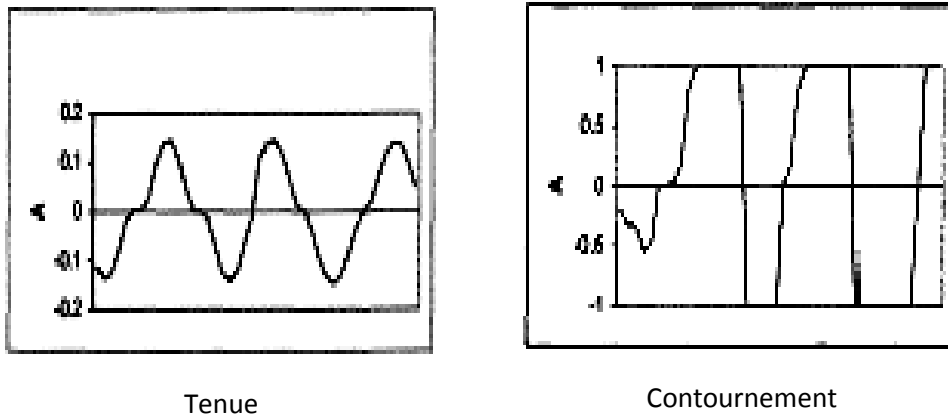


Fig. 2.14 Courants enregistrés pour les accumulations de glace [29]
 La glace ayant un diamètre moyen de 15 cm et une tension appliquée de 82.5 kV

On peut constater que plus la surface de la glace augmente plus la résistance diminue et plus devienne favorisant au passage d'un courant élevé. Ceci explique les valeurs enregistrées dans la figure (2.14).

2.10 Effet de la polarité de la tension sur les décharges des isolateurs

Des études faites par des chercheurs pour voir l'influence de la polarité de la tension sur le processus des décharges sur les surfaces des isolateurs. Parmi ces études, on cite celle de *Mohammed El-Amine Slama et al.* [30]. Dans cet aspect, ces chercheurs ont fait des tests dans le laboratoire (voir figure 2.15) sur des isolateurs pour voir le processus de décharge en appliquant une tension de choc de foudre avec des pollutions continues et discontinues.

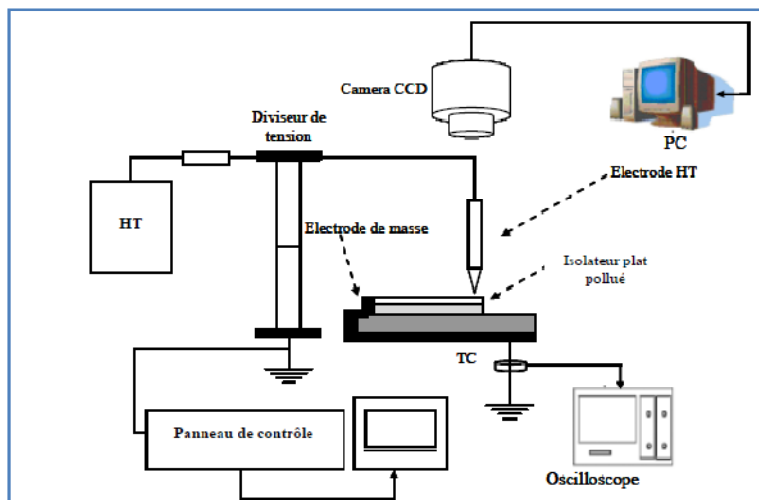


Fig. 2.15 Montage expérimental [30]

La tension utilisée est générée par un générateur de Marx (220kV-2kJ-1,2/50 μ s). L'observation des décharges est basée sur l'intégration des images capturées par une caméra CCD connectée à une carte d'acquisition vidéo. Des photos enregistrées (figure 2.16) présentent la décharge pour une polarité positive et une autre pour une tension négative.

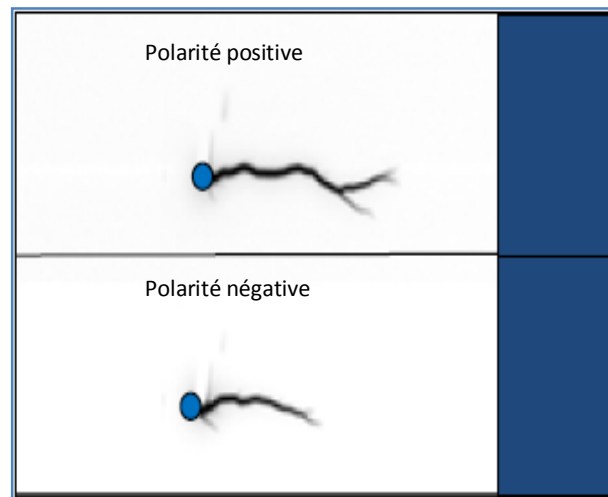


Fig. 2.16 Image de la décharge pour une pollution de 100 μ S/cm [30]

Ces chercheurs ont constaté que la décharge n'est pas droite et présente une tortuosité plus ou moins prononcée selon la polarité de la pointe. Elle est plus tortueuse avec une pointe positive qu'avec une pointe négative.

2.11 Tests chimiques sur les câbles souterrains

L'étude a été faite par *Petri Hyvönen* [31] et présentée dans une thèse préparée dans le cadre d'un doctorat en sciences à l'université de technologie d'Helsinki (Finlande). L'étude faite a été basée sur des projets de recherches effectuées au niveau du laboratoire de la haute tension et systèmes de puissance à l'université d'Helsinki. Le travail est basé sur une analyse chimique qui s'intéresse à l'étude microscopique des polymères tels que l'isolant XLPE. Des malformations des chaînes et des liaisons prennent naissance sous l'influence de plusieurs facteurs tels que :

- Température,
- Quantité d'oxygène (oxydation),
- L'arborescence accélérée par la pénétration de l'eau,
- Radiations telles que les U.V.

Tous ces processus vont provoquer des effets catalytiques qui peuvent accélérer le mécanisme de dégradation de l'isolant. Dans la figure (2.17) on montre l'arborescence sur toute la longueur de l'isolant.

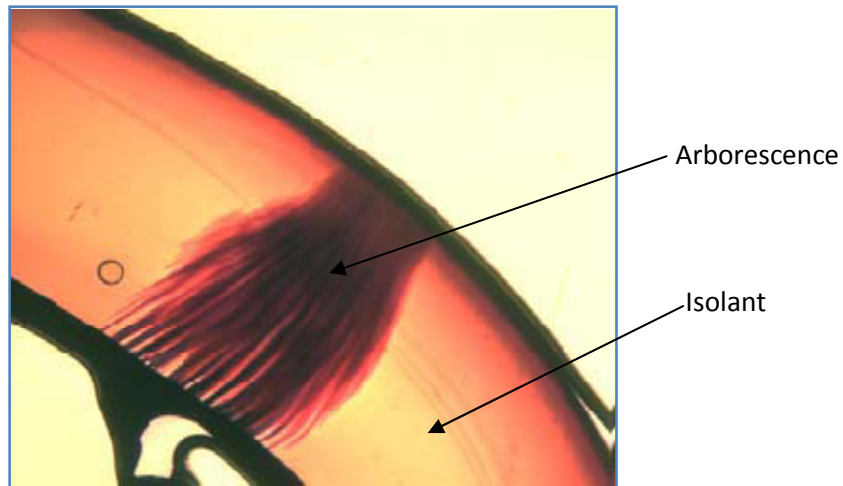


Fig. 2.17 Arborescence accélérée d'un isolant de type XLPE d'un câble souterrain [31]

2.12 Composantes furaniques dans l'isolation des transformateurs de puissance

Le travail fait par *Mezari Naouel* [32] présente l'utilité de voir l'influence des composantes furaniques sur le diagnostic des transformateurs de puissance. Elle explique que la connaissance de l'état d'huile et les gaz dissous dans ce dernier est une importance fondamentale pour assurer un bon fonctionnement des transformateurs. L'analyse des gaz dissous présentée dans son mémoire et dans une autre étude de *Dijana Vrsaljko et al.* [33] montre qu'il existe sept gaz à étudier et à quantifier. Ces gaz sont :

- Hydrogène (H_2),
- Méthane (CH_4),
- Ethane (C_2H_6),
- Ethylène (C_2H_4),
- Acétylène (C_2H_2),
- Dioxide de carbon (CO_2),
- Monoxide de carbon (CO).

Ces gaz sont quantifiés dans l'huile et dans le papier isolant. Les deux derniers gaz sont présents pendant la décomposition de la cellulose dans le papier isolant tel que le kraft. En plus le danger de ces gaz se trouve dans l'aspect inflammable en présence de l'oxygène. Pour l'analyse, il existe plusieurs critères qui donnent un aspect satisfaisant :

- Critère du triangle de Duval,
- Critère de Rogers.

2.12.1 Critère du triangle de Duval

Ce critère est basé sur une représentation graphique des composantes gazeuses dans un triangle (figure 2.18).

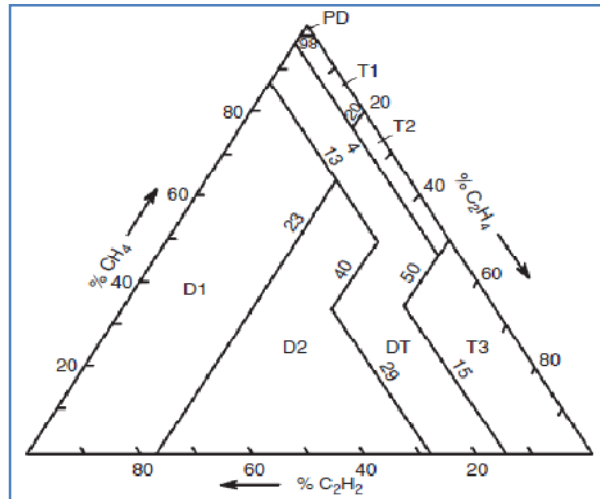


Fig. 2.18 Coordonnées et zones de défauts [34]

Les informations présentées dans la figure (2.18) montrent le taux des gaz dissous en fonction de la température et le taux des décharges. Les codes cités dans la figure sont :

- PD: décharge partielle,
- D1: décharge de basse énergie,
- D2: décharge de haute énergie,
- DT : combinaison d'un défaut thermique-électrique,
- T1: défaut thermique ($T < 300^{\circ}\text{C}$),
- T2: défaut thermique ($300^{\circ}\text{C} < T < 700^{\circ}\text{C}$),
- T3: défaut thermique ($T > 700^{\circ}\text{C}$).

D'après ce triangle, on peut dire que les données expérimentales sont placées dedans et voir la zone de défaut qui interprète l'état de l'isolant tel que l'huile.

2.12.2 Critère de Rogers

Ce critère est basé sur le calcul de quatre rapports : CH_4/H_2 , $\text{C}_2\text{H}_2/\text{C}_2\text{H}_4$, $\text{C}_2\text{H}_6/\text{CH}_4$, $\text{C}_2\text{H}_4/\text{C}_2\text{H}_6$. Des codes sont générés sur la base de ces rapports. Ils permettent de donner des informations concernant la qualité des isolants utilisés et leur degré de vieillissement. Les tableaux (2.2) et (2.3) montrent les codes et leurs interprétations.

Tableau.2.2 Rapport et intervalles et codes de Rogers [35]

| | Rapport des gaz | Intervalles | Codes |
|-------|-----------------|--------------------|-------|
| R_1 | CH_4/H_2 | ≤ 0.1 | 5 |
| | | >0.1 et ≤ 1 | 0 |
| | | ≥ 1 et <3 | 1 |
| | | ≥ 3 | 2 |
| R_2 | C_2H_2/C_2H_4 | <1 | 0 |
| | | ≥ 1 | 1 |
| R_3 | C_2H_6/CH_4 | <1 | 0 |
| | | ≥ 1 et <3 | 1 |
| | | ≥ 3 | 2 |
| R_4 | C_2H_4/C_2H_6 | <0.5 | 0 |
| | | ≥ 0.5 et <3 | 1 |
| | | ≥ 3 | 2 |

Tableau 2.3 Codes et interprétations selon Rogers [35]

| codes | | | | Interprétation |
|-------|-------|-------|-------|--|
| R_1 | R_2 | R_3 | R_4 | |
| 0 | 0 | 0 | 0 | Normale |
| 5 | 0 | 0 | 0 | Décharge partielle (DP) d'une faible énergie |
| 1-2 | 0 | 0 | 0 | Surchauffement léger $<150^\circ\text{C}$ |
| 1-2 | 1 | 0 | 0 | Surchauffement léger $150-200^\circ\text{C}$ |
| 0 | 1 | 0 | 0 | Surchauffement léger $200-300^\circ\text{C}$ |
| 0 | 0 | 1 | 0 | Surchauffement au conducteur |
| 1 | 0 | 1 | 0 | Echauffement causé par la circulation de courant dans les enroulements |
| 1 | 0 | 2 | 0 | Echauffement causé par la circulation de courant dans le noyau et le réservoir |
| 0 | 0 | 0 | 1 | Arc d'une faible énergie |
| 0 | 0 | 1-2 | 1-2 | Arc d'une grande énergie |
| 0 | 0 | 2 | 2 | Etincellement continu, Arc |
| 5 | 0 | 0 | 1-2 | Décharge partielle DP |

2.13 Mesure de la densité des glaces par la technique de fluorescence

Cette technique est utilisée par *Shigemasa Enomoto et al* dans leur travail [36]. La technique utilisée est basée sur une radiographie de type fluorescence. Ils ont utilisé un tube à rayons X de basse énergie avec un compteur proportionnel plein de gaz néon. Un analyseur multicanaux a été développé pour la mesure non destructive et rapide de la densité du sel déposé sur la surface d'un isolateur (figure 2.19).

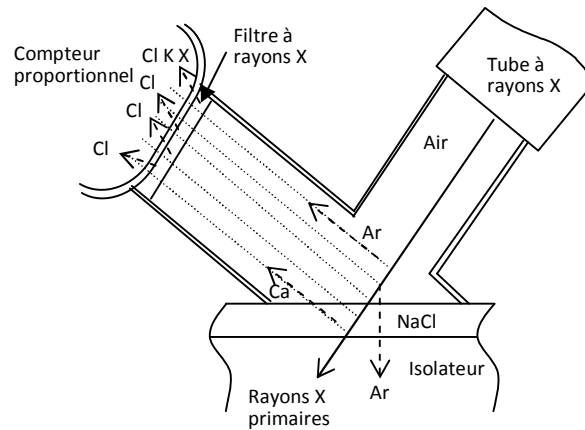


Fig. 2.19 Génération de Cl-K à rayons X pour un isolateur pollué avec NaCl [36]

L'isolateur utilisé dans l'expérience est de 250mm de diamètre produit de l'entreprise JIS au Japon. L'isolateur est relié à un moteur qui tourne à une vitesse de 10t/min, ce qui permet de mesurer:

- La densité des décharges partielles,
- La surface moyenne de l'isolateur.

Un compteur proportionnel rempli du Néon est placé avec un angle de 45° de la surface de l'isolateur. La distance entre la tête du tube à rayons X et la surface de l'isolateur est de 20cm. Ce tube est alimenté avec une tension 8kV et un courant de 15µA. Le signal à la sortie du compteur est transmis à un analyseur multicanaux qui permet de sélectionner les rayons X selon leur énergie. Enfin, Le signal observé base sur l'intensité des rayons X avec la quantité de Cl-K mesurée (figure 2.20)

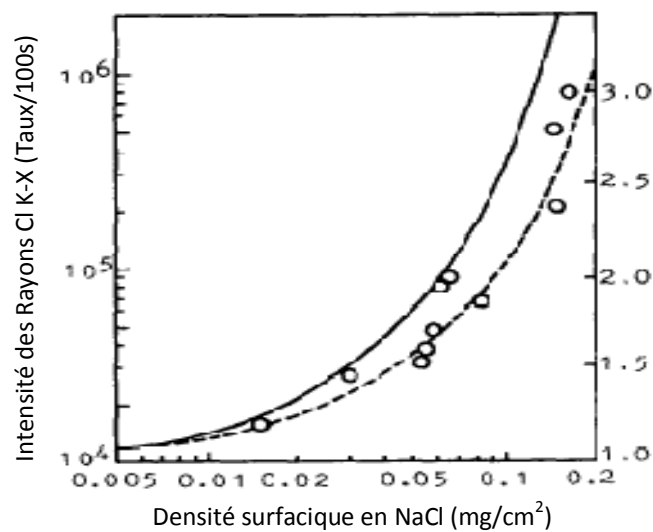


Fig. 2.20 Intensité des rayons Cl K-X vs. la densité surfacique en NaCl [36]

Les auteurs [36] ont constaté que :

- Les résultats obtenus par l'expérience sont en concordance avec les résultats théoriques,
- La détermination des données sont faciles pour la gamme de pollution de 0.01 à 0.1mg/cm²,
- Possibilité de déterminer d'une façon non destructive la position de la distribution de la pollution,
- Calculer le temps d'accumulation du dépôt de pollution avec certitude afin de bien calibrer les isolateurs dans telles situations.

2.14 Technique de la mesure des bruits ultrasoniques émis par les isolateurs

Cette technique est illustrée par V. Tarso et al. [37]. La méthode est basée sur une mesure estimée des bruits ultrasoniques émis par des isolateurs. L'expérience effectuée dans le laboratoire est présentée dans la figure (2.21). La figure (2.22) montre l'isolateur utilisé.

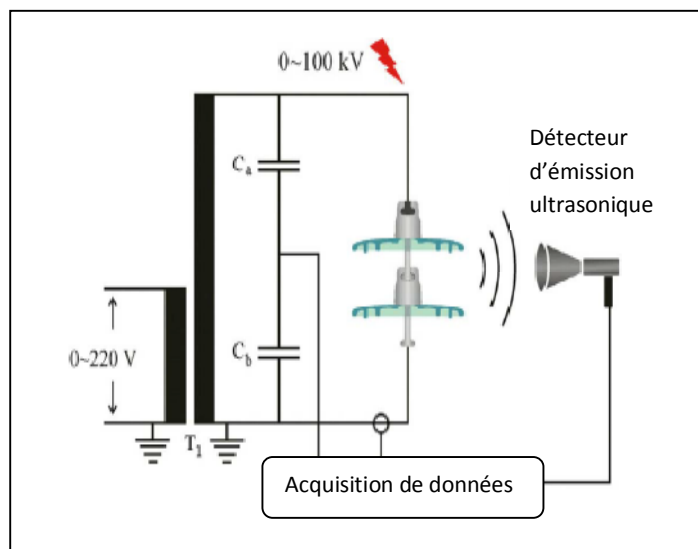


Fig. 2.21 Montage expérimental utilisé dans le laboratoire [37]

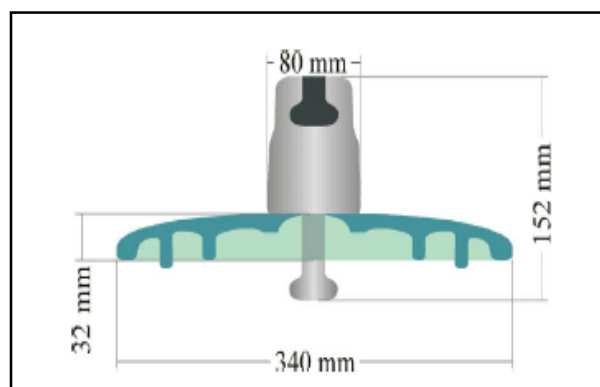


Fig. 2.22 Dimensions de l'isolateur en verre utilisé [37]

Pour la pollution, ils ont utilisé 5 gammes (voir le tableau 2.4).

Tableau 2.4 Taux de pollutions appliquées aux isolateurs [37]

| Classe | Classification | Densité de dépôt de pollution (mg/cm^2) |
|--------|------------------------------|---|
| 1 | Sans pollution significative | 0.00 – 0.032 |
| 2 | Pollution très basse | 0.032 – 0.038 |
| 3 | Pollution légère | 0.038 – 0.056 |
| 4 | Pollution forte | 0.056 – 0.123 |
| 5 | Pollution très forte | ≥ 0.123 |

La tension appliquée dans l'expérience est de 14kV. Cette tension permet de provoquer des décharges surfaciques et voir son influence sur le contournement des isolateurs. Les émissions acoustiques étaient enregistrées à travers un système d'acquisition de données. Plusieurs fichiers audio ont été enregistrés selon le degré de contamination et selon aussi le taux d'humidité du milieu. Les mesures enregistrées ont été divisés en plusieurs signaux en appliquant les transformées de Fourier rapides ce qui permet de tirer plusieurs informations sur l'aspect de la pollution des isolateurs. Parmi les résultats obtenus par ces chercheurs [37], on peut citer l'analyse spectrale illustré dans la figure (2.23)

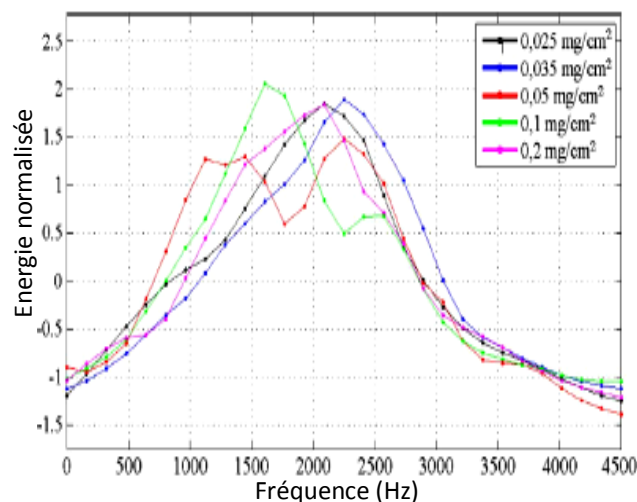


Fig. 2.23 Valeurs moyennes des spectres pour 80% d'humidité [37]

L'analyse spectrale des émissions acoustiques permet de quantifier en position et en géométrie les dépôts du sel sur la surface des isolateurs.

2.15 Méthode du courant de polarisation et de dépolarisation pour le diagnostic des isolants

Cette technique de mesure et de calcul permet aux chercheurs de voir la performance des isolants utilisés dans les équipements électriques tels que les câbles souterrains, transformateurs ou autres. Les isolants traités sont les papiers imprégnés d'huile. Parmi les chercheurs qui ont traité cet aspect, on trouve *Walter S. Zaengl* [38, 39] qui a éclairci le calcul des courants de polarisation et de dépolarisation dans le domaine temporel et fréquentiel. *Raj B. Jadav et al.* [40] ont montré l'importance d'une telle technique de mesure et son importance dans l'étude des transformateurs de puissance. L'isolant utilisé tel que l'huile ou le papier présente en aspect microscopique des moments dipolaires capables de s'orienter sous l'action d'un champ extérieur ce qui mène à la naissance d'un courant appelé courant de polarisation. Pendant la phase de relaxation un autre courant de décharge prend effet c'est le courant de dépolarisation. Ceci est interprété par l'effet capacitif de l'isolant.

Une autre étude faite par *I. Fofana et al.* [41] montre l'utilité de calcul de ces courants cités auparavant et voir le comportement des isolants des transformateurs de puissance en présence des facteurs influençant tels que la température. Ces chercheurs ont fait des tests en laboratoire sur un isolant en papier imprégné d'huile (Fig. 2.24) Le principe de mesure est présenté dans la figure 2.25

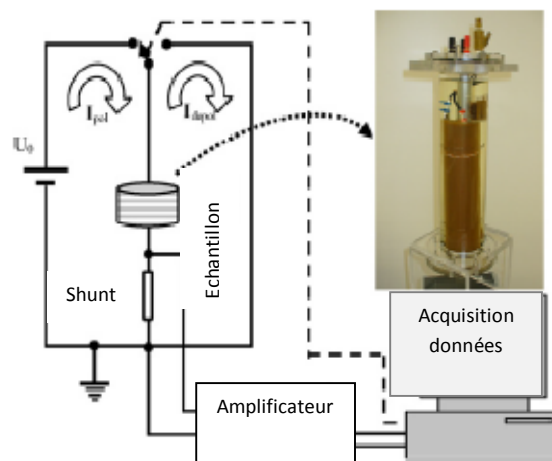


Fig. 2.24 Montage expérimental pour la technique de mesure des CPD [41]

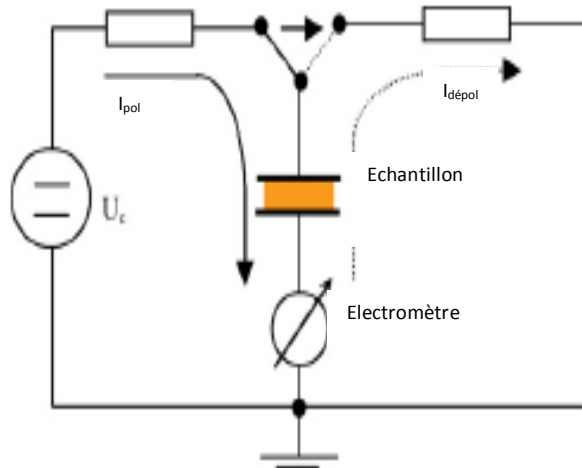


Fig. 2.25 Principe de test des courants de polarisation et de depolarisation [41]

Cette technique permet de voir le comportement des isolants. Elle justifie la possibilité d'un isolant de stocker l'énergie puis la dissiper interprétée par les phases de polarisation et de dépolarisation. Ceci peut envisager la qualité de l'isolant en termes de son réaction vis-à-vis les facteurs influençant et de la durée de vie des équipements électriques.

2.16 Méthode des différences finies

C'est une technique de calcul qui permet de trouver des valeurs inconnues de la tension par exemple dans des points en connaissant les valeurs des points voisins. Pour avoir des meilleurs résultats les points adjacents doivent être le plus proche possible. La technique des différences finies base sur les étapes suivantes :

- Désigner le maillage convenable selon les coordonnées (cartésiennes ou polaires),
- Discrétisation par différences finies des opérateurs de dérivation en utilisant par exemple les formules de Taylor,
- Critère de convergence en désignant le nombre de points ainsi que les distances entre eux.

Plusieurs chercheurs ont traité cette technique. Parmi eux, on cite *T. Seghier et al.* [42]. Dans leur recherche, ils présentent une étude qui traite les décharges partielles dans les cavités qui se trouvent dans l'isolant d'un câble souterrain. Le maillage utilisé est présenté dans la figure (2.26)

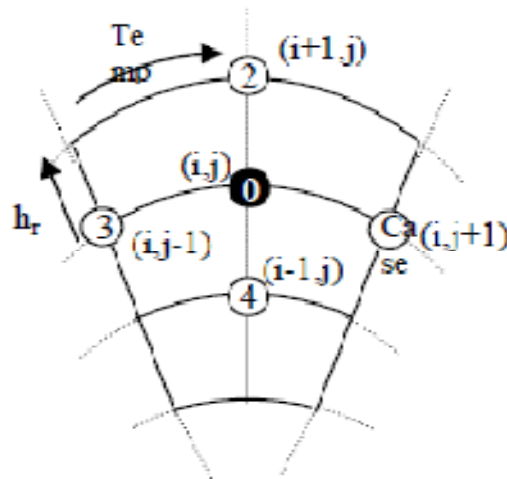


Fig. 2.26 Présentation d'un nœud intéressé [42]

Ils étaient intéressés par l'influence de la température sur la naissance des décharges partielles dans les cavités gazeuses ; c'est-à-dire sur le champ électrique local. L'équation qui traite le calcul de la température en utilisant les séries de Taylor est présentée par la formule (2.1). Cette équation est basée sur l'équation thermique de Wagner

$$\frac{\partial^2 T(i,j)}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial T(i,j)}{\partial r} + \frac{1}{r^2} \frac{\partial^2 T(i,j)}{\partial \theta^2} + \frac{(\omega \cdot \varepsilon_0 \cdot \varepsilon_r \cdot tg \delta + \sigma)}{K} E^2(i,j) = 0 \quad (2.1)$$

L'équation (2.1) est écrite en coordonnées polaires. Les paramètres écrits dans l'équation sont :

- T : Température (°C),
- r et θ : Coordonnées polaires,
- ω : Pulsation (rad/s),
- ε_0 : Permittivité du vide (F/m),
- ε_r : Permittivité relative de l'isolant,
- $tg \delta$: Facteur de perte diélectrique,
- σ : Conductivité électrique (S/m),
- E : Champ électrique (kV/m).

Le calcul de la température dans le point désigné par (i,j) est calculée en connaissant les valeurs de la températures des points adjacents $(i+1,j)$, $(i-1,j)$, $(i,j-1)$ et $(i,j+1)$, voir la figure (2.26). En plus, on doit connaître les conditions aux limites. La figure

(2.27) montre la variation de la température pour différents diamètres des cavités et en fonction de leur position

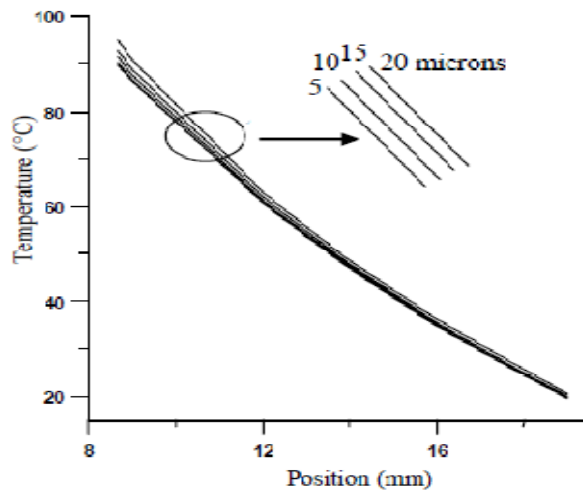


Fig. 2.27 Variation de la température pour différents diamètres de la cavité et pour différentes positions dans l'isolant [42]

D'après la courbe de la figure (2.27) on peut constater que :

- La température est proportionnelle au diamètre de la cavité,
- La température est plus significative près de l'âme conductrice et diminue en allant jusqu'à la gaine extérieure.

2.17 Méthode des éléments finis

Cette méthode est comparable à la méthode des différences finies mais plus robuste et plus fiable. Elle base sur un maillage par éléments. Les éléments les plus réponsus sont triangulaires ou rectangulaires mais ça n'empêche pas de choisir d'autres formes selon les cas à traiter et selon la complexité du problème. Ces éléments doivent être adjacents ce qui permet la continuité du maillage. Plus la taille des éléments plus petite, plus on obtient des résultats précis. Cette technique est appliquée dans plusieurs domaines et pour des systèmes mécaniques, thermodynamiques, électriques, acoustiques et autres. Parmi les recherches qui traitent cette méthode les travaux de Marina A. Tsili et al. [43], et l'étude proposée par *Muhsin Tunay Gençoğlu et Mehmet Cebeci* [44].

2.17.1 Travaux de Marina A. Tsili et al. sur la distribution de la température dans les enroulements et noyaux

Cette étude s'intéresse à la distribution de la température dans les éléments constituant un transformateur de puissance. La méthode des éléments finis est utilisée pour voir cette distribution. Le flux de chaleur est étudié depuis les enroulements où il y a la circulation des courants jusqu'à l'enceinte et ensuite le milieu environnant. L'équation qui gouverne le transfert de chaleur est donnée par la formule (2.2):

$$K_x \cdot \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + K_y \cdot \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} + K_z \cdot \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} = q \quad (2.2)$$

Où :

- K_x , K_y et K_z représentent les conductivités thermiques du matériau dans les directions x , y et z ($W/m.C$),
- T : est la température en chaque point du domaine considéré ($^{\circ}C$),
- q : est la source de chaleur dans le transformateur (W/m^3).

La discrétisation du transformateur est présentée dans la figure (2.28). Elle montre les domaines où on s'intéresse étudier le transfert de chaleur ; c'est-à-dire les enroulements HT, BT, les noyaux et l'enceinte externe.

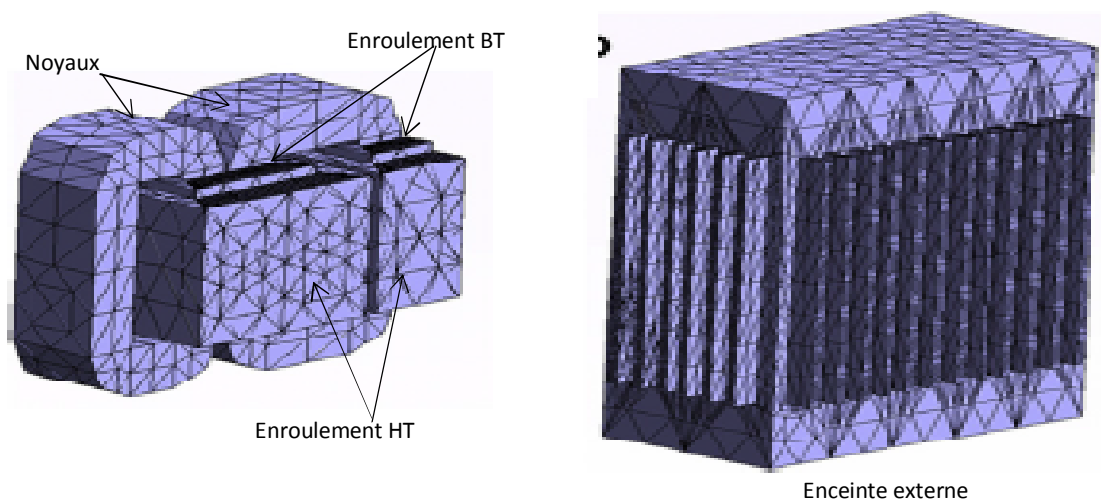


Fig. 2.28 Maillage des parties fondamentales du transformateur [43]

Parmi les résultats obtenus par ces chercheurs [43], on peut citer ceux présentés dans les figures (2.29) et (2.30)

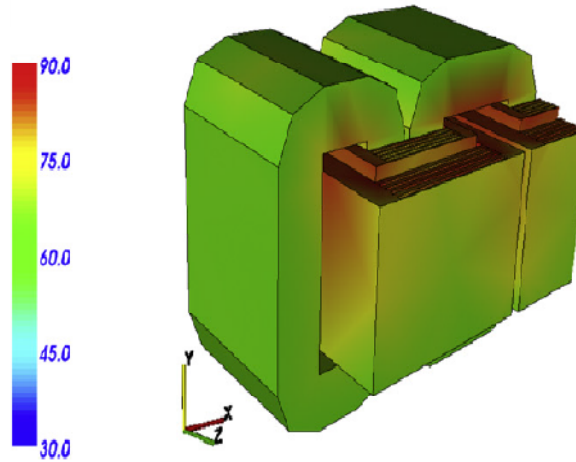


Fig. 2.29 Distribution de température dans les enroulements et noyaux [43]

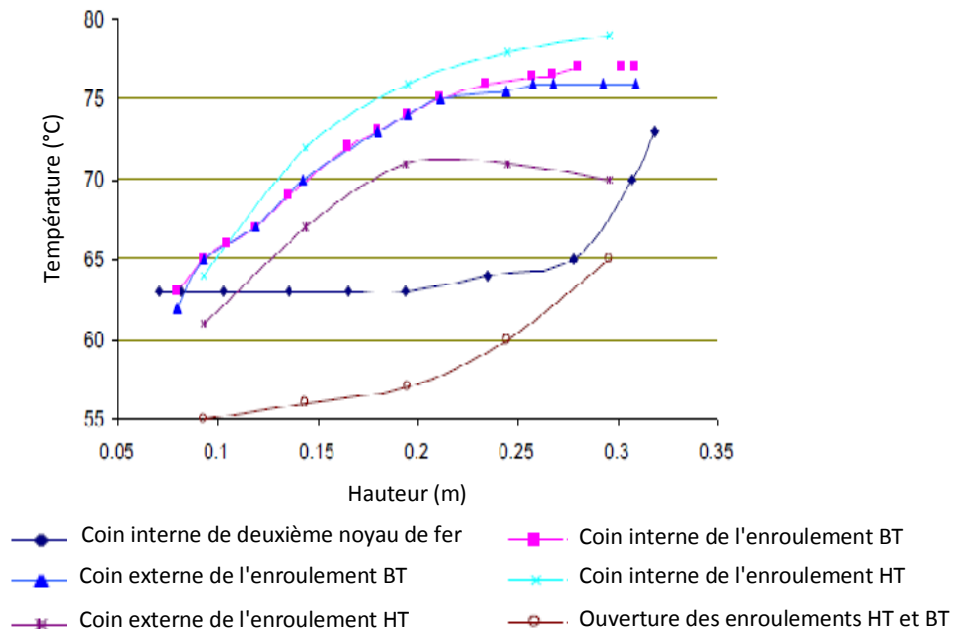


Fig.2.30 Variation de la température le long des enroulements et noyaux [43]

D'après la figure (2.30) on peut constater que :

- La température prend des valeurs supérieures pour les coins internes des enroulements HT et BT,
- La température du coin externe de l'enroulement BT est comparable avec celle du coin interne de l'enroulement HT,

- L'huile de refroidissement sert à évacuer la chaleur interne et par suite minimiser les températures et surtout des noyaux, ouverture des enroulements HT/BT et le coin externe de l'enroulement HT.

2.17.2 Travaux de Muhsin Tunay Gençoğlu et Mehmet Cebeci sur la distribution du potentiel dans les isolateurs pollués

La méthode des éléments finis est utilisée dans cette étude pour voir la distribution du potentiel le long de la surface des isolateurs et voir aussi la pollution sur cette distribution. Les isolateurs HT subissent une pollution de tout genre :

- Pollution causée par le dépôt du sel près des régions côtières,
- Pollution causée par le dépôt des déchets près des zones industrielles,
- Autres pollutions.

Cette pollution diminue l'efficacité des isolateurs et peut même à leur détérioration. L'étude présente cet objectif en utilisant l'aspect géométrique. La méthode des éléments finis dans ce cas est basée sur trois étapes essentielles :

- Choisir le maillage convenable à la géométrie des isolateurs,
- Connaitre les conditions aux limites,
- Calculer la distribution de la tension le long de la surface des isolateurs

Les chercheurs ont utilisé deux types d'isolateurs ; le premier est de type 7K3 et le deuxième U40BL. Le maillage est présenté dans la figure (2.31) où ils ont utilisé les éléments triangulaires.

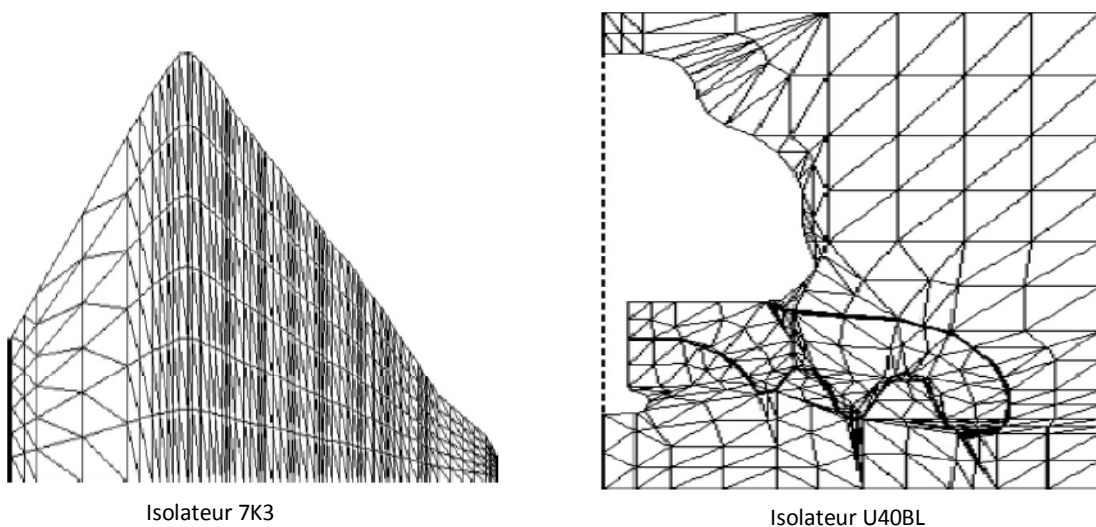


Fig.2.31 Maillage d'une moitié d'un isolateur de type 7K3 [44]

La méthode des éléments finis a permis aux chercheurs de calculer le potentiel en différents points des isolateurs et voir l'influence de la pollution sur cette distribution. La méthode a des limites et des contraintes. Pour améliorer la précision des résultats, on doit minimiser la taille des éléments et par suite prendre un temps d'exécution plus long. Donc il faut choisir un compromis afin d'aboutir aux résultats satisfaisants.

2.18 Méthode de la logique floue (FL)

C'est une des méthodes de prédiction qui donnent des résultats satisfaisants. La méthode de la logique floue est basée sur la théorie des ensembles. Si on veut simplifier le concept ; une technique de simulation doit avoir des entrées et des sorties. Les informations à traiter soient des zéros (niveau 0) ou des uns (niveau 1). L'avantage de la méthode de la logique floue ; ce qu'elle accepte des informations entre les deux niveaux d'un côté et d'un autre côté de poser une stratégie de contrôle basée sur un ensemble de règles linguistiques « si ... alors » facilement interprétables. Parmi les recherches qui ont traité cette méthode, on cite :

- Etude faite par *G.E. Asimakopoulou et al.* [45],
- Etude faite par *Sanjeeb Mohanty et Saradindu Ghosh* [46].

2.18.1 Travaux de G.E. Asimakopoulou et al.

L'étude présentée par ces chercheurs [45] à pour objectif de calculer la tension critique de contournement des isolateurs en utilisant la méthode de la logique floue. Les principes de base de cette méthode sont :

- La fuzzification,
- Le développement de règles de base,
- Le mécanisme de déduction,
- La défuzzification.

Ces auteurs ont appliqué la méthode de la logique floue et ils ont trouvé que leur objectif pour aboutir aux meilleurs résultats est de choisir trois ensembles pour l'apprentissage des données. Autre, pour la défuzzification prendre son optimum en choisissant la méthode de centre de gravité.

2.18.2 Travaux de Sanjeeb Mohanty et Saradindu Ghosh

Ces chercheurs [46] ont fait des tests en laboratoire sur un papier isolant de type « Minilex blanc » sous tension continue et alternative. L'objectif est de voir l'influence des cavités gazeuses sur le claquage de l'isolant. Les cavités étaient simulées par des cylindres ont pour variables d'entrées :

- Le diamètre du cylindre (cavité),
- L'épaisseur de la cavité.

En plus ils ont appliqué la méthode de la logique floue pour comparer les résultats. La tension comme variable de sortie n'est plus une valeur fixe mais une marge selon le pourcentage des tests dans les ensembles choisis. D'après les résultats obtenus, ils ont constaté qu'ils étaient satisfaisants ; ce qui rend la méthode de la logique floue en terme de simulation assez robuste et peut économiser du temps en comparant avec les tests expérimentaux.

2.19 Méthode d'optimisation par essaim de particules (PSO)

Au début, c'est une méthode inspiré des mouvements en groupe. Par exemple le mouvement des oiseaux, fourmis, abeilles ou autres. La méthode a été développée par *James Kennedy et Russell Eberhart* [47]. Cette métaheuristique s'appuie sur le concept d'auto-organisation qui aide les éléments ou particules du groupe à converger vers un minimum local. Au départ de l'algorithme chaque particule est donc positionnée (aléatoirement ou non) dans l'espace de recherche du problème. Chaque itération fait bouger les particules en fonction de trois composantes :

- Sa vitesse actuelle,
- Sa meilleure solution P_i ,
- La meilleure solution obtenue dans son voisinage P_g .

Donc c'est une méthode d'optimisation qui cherche à trouver des optima. Ces optima vont être utilisés directement ou injectés dans d'autres algorithmes pour optimiser d'autres problèmes. Plusieurs chercheurs ont traité cette technique tels que :

- *Ching-Jung Ting et al.* [48] : ils ont utilisé cette méthode pour traiter le problème de stockage et surtout près des ports lors du stockage des conteneurs,
- *Nasir A. Al-geelani et al.* [49] : ils ont combiné cette méthode avec la méthode des réseaux de neurones afin de caractériser les signaux acoustiques accompagnés aux décharges sur les surfaces des isolateurs HT. Ils ont trouvé des résultats satisfaisants en termes d'optimisation des paramètres de calcul.

2.20 Méthode des réseaux de neurones artificiels (ANN)

Les recherches basées sur la méthode des réseaux de neurones trouvent leur emplacement primordial dans les dernières années. Depuis 1943, quand *Warren McCulloch* et *Walter Pitts* ont proposé le premier modèle des neurones artificiels ; le développement de cette méthode ne cesse d'augmenter d'une décennie à une autre [50].

La méthode est une simulation approchée de l'activité du cerveau humain. Il existe des neurones et des liaisons entre eux. Ces liaisons permettent la diffusion de l'information bidirectionnelle. Donc, on a une ou plusieurs entrées et une ou plusieurs sorties avec des systèmes entre les deux. Ces systèmes gèrent les informations et permettent de les circuler facilement pour aboutir à des tâches précises. Le modèle de base est présenté en schéma dans la figure (2.32)

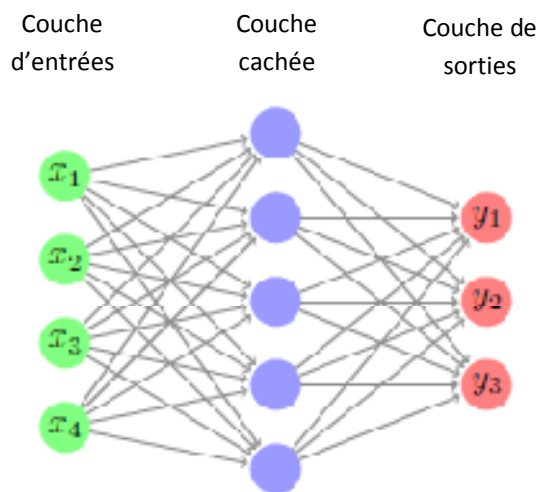


Fig. 2.32 Réseau de neurones simple [51]

Parmi les recherches qui ont utilisé cette méthode pour le diagnostic des isolants dans les systèmes électriques, on trouve :

- Etude faite par V.T. Kontargyri et al. [52],
- Etude faite par B. Zegnini et al. [81],
- Etude faite par BOUCHAOUI Lahcene [53],
- Etude faite par Nasser N. et al. [54].

2.20.1 Travaux de V.T. Kontargyri et al

La méthode a été utilisée dans cette étude [52] afin de prévoir la tension de contournement des isolateurs pollués. Ils utilisent dans leur algorithme de calcul des paramètres d'entrées tels que :

- Le diamètre de l'isolateur,
- La hauteur de cet isolateur,
- La distance de la ligne de fuite,
- Le facteur de forme des isolateurs,
- La densité de dépôt du sel sur la surface de l'isolateur.

Le résultat ou la sortie est la tension de contournement. Ils utilisent dans le calcul deux phases ; La première est la phase d'apprentissage où ils injectent des données des tests expérimentaux (quatre types d'isolateurs) et d'autres calculés analytiquement. Les données d'apprentissage et de test sont classées en trois catégories selon les cas étudiés. Ces données sont données dans le tableau 2.5

Tableau. 2.5 Données d'apprentissage et de test

| | Données d'apprentissage | Données de test |
|----------------------|---|---------------------------|
| 1 ^{er} cas | 140 données calculées d'après le modèle + 8 données réelles | 20 données expérimentales |
| 2 ^{ème} cas | 20 données expérimentales | 8 données expérimentales |
| 3 ^{ème} cas | 24 données expérimentales | 4 données expérimentales |

Le critère d'optimisation et de minimiser l'erreur quadratique moyenne (RMSE). Ils testent les résultats par le biais de l'erreur absolue moyenne en pourcentage (MAPE) pour l'apprentissage et le test. Les résultats sont illustrés dans le tableau 2.6

Tableau. 2.6 Evaluation statistique des résultats [52]

| | RMSE | MAPE % (apprentissage) | MAPE % (test) |
|----------------------|-------|------------------------|---------------|
| 1 ^{er} cas | 0.070 | 1.3 | 4.040 |
| 2 ^{ème} cas | 0.178 | 4.154 | 4.255 |
| 3 ^{ème} cas | 0.165 | 4.004 | 2.152 |

D'après ces résultats, les chercheurs ont constaté que :

- Les données utilisées qui combinent l'expérimental et le modèle mathématique ont donné des résultats meilleurs que les autres cas,
- L'augmentation de la base de données (en nombre de données) donne des résultats encourageants.

2.20.2 Travaux de B. Zegnini et al.

Zegnini et al. proposent dans leur étude un système intelligent qui permet de d'étudier le profil des isolateurs et la longueur de la chaîne et fait qu'il représente les meilleures performances dans les conditions de pollution du site étudié. La forme de l'isolateur est généralement conçue pour obtenir une ligne de fuite maximale entre les deux conducteurs. Afin de calculer la tension de contournement des isolateurs pollués ils ont donné un grand intérêt à l'étude de l'influence de divers facteurs météorologiques sur la sévérité de pollution en quantifiant le degré de pollution en suivant certaines méthodes spécifiques et en mettant en évidence une modélisation mathématique des conditions critiques du contournement en y introduisant les constants de l'arc A et n . En ajustant sur les paramètres d'optimisation tels que l'incertitude, le nombre de couches cachées et le nombre de neurones, ils ont obtenu des résultats très satisfaisants (la figure (2.33))[81]. La technique proposée permet de diminuer le travail expérimental et prédire les valeurs des paramètres d'influences caractérisant ce processus d'où un gain de temps considérable, et une diminution du nombre et de la durée des interruptions du réseau électrique.

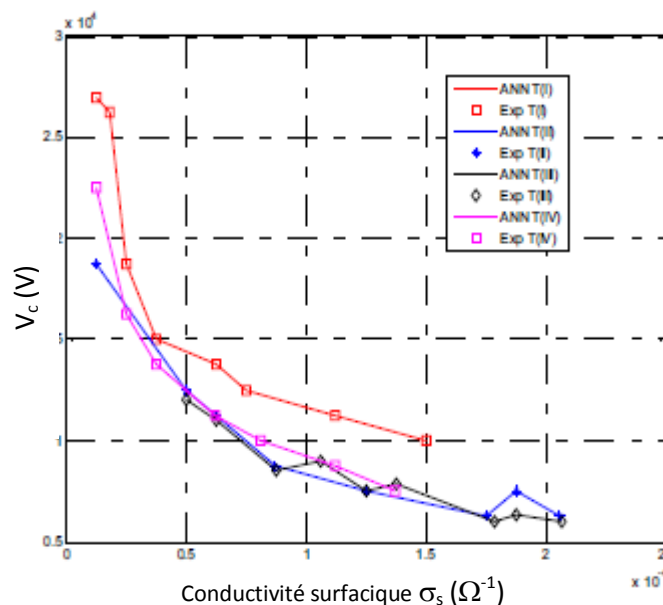


Fig. 2.33 Tension de contournement vs. Conductivité surfacique avec la technique des RNA

D'après la figure (2.33), ces auteurs ont constaté une bonne concordance entre les résultats expérimentaux et ceux trouvés par les RNA ; ceci peut permet de gagner du temps en vu de la maintenance et la protection des isolateurs contre le contournement.

2.20.3 Diagnostic des gaz dissous dans les huiles des transformateurs de puissance

Dans son mémoire présenté à l'université de Sétif, *L. Bouchaoui* [53] a utilisé la méthode des réseaux de neurones comme un moyen de simulation. L'objectif est faire le diagnostic des gaz dissous dans les huiles des transformateurs de puissance. Bouchaoui a noté que les méthodes conventionnelles d'analyse des gaz dissous présentent parfois des incohérences qui peuvent conduire à des erreurs fatales. En plus, La présence de défauts multiples peut être cachée par le défaut le plus apparent. Pour cela, l'utilisation des algorithmes basés sur l'intelligence artificielle est devenue une nécessité. Ces techniques peuvent aider à résoudre les problèmes et à présenter une meilleure tendance pour statuer sur la nature du défaut ou de la défaillance.

Le réseau de neurones illustré par Bouchaoui dans son étude est présenté dans la figure (2.34)

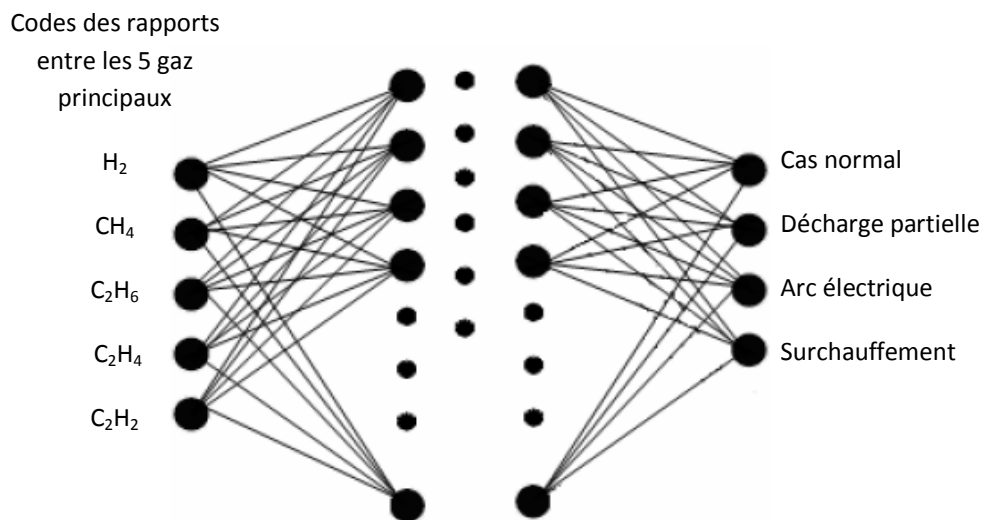
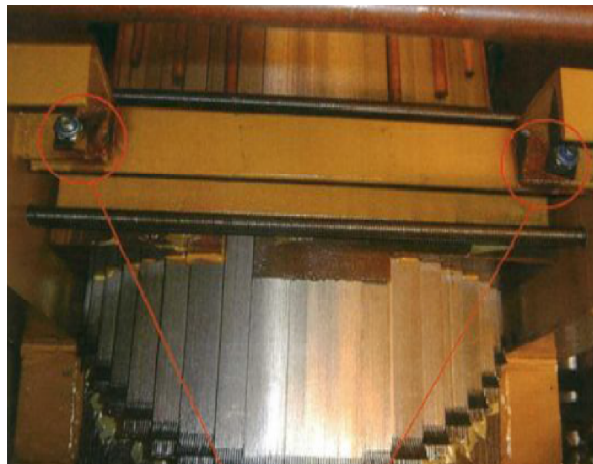


Fig. 2.34 Topologie du réseau de neurones utilisé [53]

Comme il est montré dans la figure (2.34), les données d'entrées sont les codes tirés d'après le calcul des rapports entre les différentes concentrations des gaz dissous dans les échantillons prélevés du transformateur. Les données des sorties sont 4 cas ou résultats :

- Cas normal,
- Décharge partielle de faible ou grande énergie,
- Arc électrique,
- Surchauffement.

Il a utilisé dans le diagnostic vingt échantillons. Un seul est trouvé après évaluation pas bon. Il a supposé que les valeurs proches de zéro supposé des zéros et les valeurs proches de un supposés des uns. Parmi les résultats justifiés par les tests expérimentaux c'est l'échauffement localisé au niveau du transformateur (voir la photo de la figure 2.35)



Fort échauffement localisé

Fig.2.35 Diagnostic expérimental du transformateur [53]

Les équipements électriques tels que les transformateurs de puissance sont soumis toujours à de fortes contraintes. Pour cela, leur diagnostic est devenu nécessaire afin d'éviter toute anomalie ou dysfonctionnement du réseau électrique. L'utilisation des méthodes basées sur l'intelligence artificielle aide à trouver des solutions plus vite, ce qui nous aide à gagner du temps.

2.20.4 Travaux de Nasser N. et al.

N. Nasser et al. [54] ont fait une inspection pratique sur des isolateurs de type non-céramique de tension 33kV ; sans et avec défauts. L'analyse pratique est basée sur la technique non destructive des micro-ondes des champs proches. Un système d'acquisition de données est utilisé afin d'enregistrer les données mesurées. D'après ces données, la méthode des réseaux de neurones est utilisée pour classer les différents types de défauts. D'après les résultats obtenus par ces chercheurs, ils ont confirmé que la méthode de la simulation a bien donné de bons résultats avec des taux de pertinence de 90% à 97.5%.

2.21 Méthode des machines à vecteurs de support (SVM)

La méthode des machines à vecteurs de support est l'une des méthodes robustes qui permet de résoudre des problèmes de classification ou de régression. Elle repose en tout cas sur des analyses statistiques. Elle permet de trouver une ou des relations entre plusieurs facteurs afin de trouver des liaisons communes qui permettent d'avoir un modèle compréhensible. Par exemple, parmi les domaines traités c'est la médecine ; on peut trouver une classification ou discrimination des facteurs influençant sur le

déséquilibre du rythme cardiaque. En plus, on peut trouver par approximation une fonction qui permet d'interpréter un phénomène physique en se basant sur des facteurs en liaisons. Cette méthode fera l'objet du troisième chapitre.

2.22 Autres modèles hybrides qui combinent entre deux ou plusieurs méthodes

On peut trouver des modèles qui combine entre :

- Un modèle expérimental et une méthode de simulation,
- Deux ou plusieurs méthodes de simulation,
- Un modèle expérimental et des analyses statistiques,
- Un modèle expérimental et des calculs analytiques.

Parmi les recherches qui touchent cet aspect, on trouve :

- *Wei Cai et al.* [55] utilisent un appareil permettant de mesurer l'énergie émise par un signal optique. En plus la méthode des réseaux de neurones est utilisée afin de trouver la relation entre les spectres lumineux émis et la densité de dépôt du sel sur des isolateurs Pollués,
- *Johnny Wardman et al.* [56] collectent des prélèvements de plusieurs quantités de dépôts du sel près des régions d'une activité volcanique. L'étude se base sur l'analyse statistique des données expérimentales afin de classer et voir les degrés de sévérité,
- *Tarso V. Ferreira et al.* [57] utilisent la technique d'enregistrement du spectre acoustique émis par la surface polluée d'un isolateur en céramique. En plus la méthode des réseaux de neurones est utilisée afin de prévoir des décisions d'interventions nécessaires,
- *Xiang Zhang et al.* [58] présentent une recherche basée sur des analyses statistiques. Des données expérimentales ont été prélevés au près d'une compagnie chinoise de l'est concernant des disjoncteurs placés dans le réseau électrique. L'analyses statistique a permet de trouver des solutions primordiales concernant la défaillance et le temps resté d'une utilisation convenable des disjoncteurs.

2.23 Conclusion

Toutes les méthodes présentées ont pour but de décrire le comportement des isolants dans les systèmes électriques vis-à-vis des circonstances de disfonctionnement. Les modèles expérimentaux peuvent être complétés par des modèles théoriques ou de simulation. Cette complémentarité aide à aboutir à des modèles qui décrivent les phénomènes physiques avec précision. Les méthodes de simulation aident aussi à gagner du temps dans des circonstances qui nécessitent un temps d'exécution rapide.

CHAPITRE 3

Présentation de la Méthode SVM

3.1. Introduction

Les réseaux et installations électriques sont toujours sous contraintes de natures différentes. Ces contraintes peuvent affecter le bon fonctionnement des différents équipements et matériels. Les essais expérimentaux sont devenus nuisant surtout lors des tests sur le champ. Pour cela on a pensé à trouver des solutions qui décrivent le fonctionnement des systèmes électriques d'un côté et voir le taux d'influence des contraintes sur leur fonctionnement. Parmi ces solutions, sont les méthodes intelligentes. Ces méthodes font une simulation des installations tout en incluant les différents paramètres de fonctionnement y compris les contraintes. Les méthodes intelligentes trouvent de jour en jour leur efficacité et importance et surtout pour l'optimisation des solutions dans le traitement des problèmes.

Dans ce chapitre, on va explorer la méthode des machines à vecteurs de support SVMs en se basant sur la théorie de l'apprentissage artificiel de Vapnik. L'avantage des SVMs est qu'un nombre restreint d'échantillon suffit à la détermination des vecteurs de support (SVs) permettant la discrimination entre les classes contrairement à l'estimation statistique. On va adapter cette approche aux problèmes de diagnostic de la dégradation des systèmes d'isolation des équipements du réseau électrique. Les informations issues de l'expérimentation récoltées sur les sites réels seraient fort utiles dans toute démarche visant à développer un système de surveillance en temps réel des postes dits stratégiques afin de permettre aux équipes d'entretien d'agir en conséquence et ainsi assurer la fiabilité du réseau électrique.

3.2. Historique

Les fondations théoriques de la méthode des machines à vecteurs de support ont été explorées par *Vapnik* et autres chercheurs dans les années 70. Ensuite, elle a été développée dans les années 90 à partir des considérations théoriques approfondies de *Vladimir Vapnik* sur le développement d'une théorie statistique de l'apprentissage appelée au plus tard « la Théorie de *Vapnik-Chervonenkis* ». Cette méthode a rapidement été adoptée pour sa capacité à travailler avec des données de grandes dimensions, le faible nombre d'hyper paramètres, le fait qu'elle soit bien fondée théoriquement, et ses bons résultats en pratique [59]. Depuis 1995, la méthode SVM est utilisée et généralisée en plusieurs applications et trouve un emplacement primordial dans les techniques intelligentes. Elle a bien aidé les chercheurs vis-à-vis le côté expérimental tout en gagnant du temps et de l'argent.

3.3. Théorie d'apprentissage statistique

Cette théorie est introduite depuis les années 60. Elle est devenue aujourd'hui la base des algorithmes d'apprentissage des machines et surtout dans le domaine de l'intelligence artificielle. On s'intéresse dans cette théorie à trouver une cible d'après une

ou plusieurs données dans un espace conceptuel. On doit envisager des hypothèses afin d'arriver à l'objectif avec certitude. Les algorithmes d'apprentissage peuvent se catégoriser selon le mode d'apprentissage qu'ils emploient [60] :

- Apprentissage supervisé : si les classes sont prédéterminées et les exemples connus, le système apprend à classer selon un modèle de classement ; on parle alors d'apprentissage supervisé (ou d'analyse discriminante),
- Apprentissage non-supervisé : quand le système ne dispose que d'exemples, mais non d'étiquettes, et que le nombre de classes et leur nature n'ont pas été prédéterminés, on parle d'apprentissage non supervisé,
- L'apprentissage semi-supervisé : effectué de manière probabiliste ou non, il vise à faire apparaître la distribution sous-jacente des « exemples » dans leur espace de description. Il est mis en œuvre quand des données manquent Le modèle doit utiliser des exemples non-étiquetés pouvant néanmoins renseigner,
- L'apprentissage partiellement supervisé : Quand l'étiquetage des données est partiel,
- L'apprentissage par renforcement : L'algorithme apprend un comportement étant donné une observation. L'action de l'algorithme sur l'environnement produit une valeur de retour qui guide l'algorithme.

Steve R. Gunn [61] et Vapnik [62] et d'autres chercheurs ont discuté la notion de minimisation du risque empirique (ERM) et l'introduction d'un nouveau concept opposé à ERM c'est la minimisation du risque structurel (SRM). Pour cela on a défini trois erreurs (figure 3.1) :

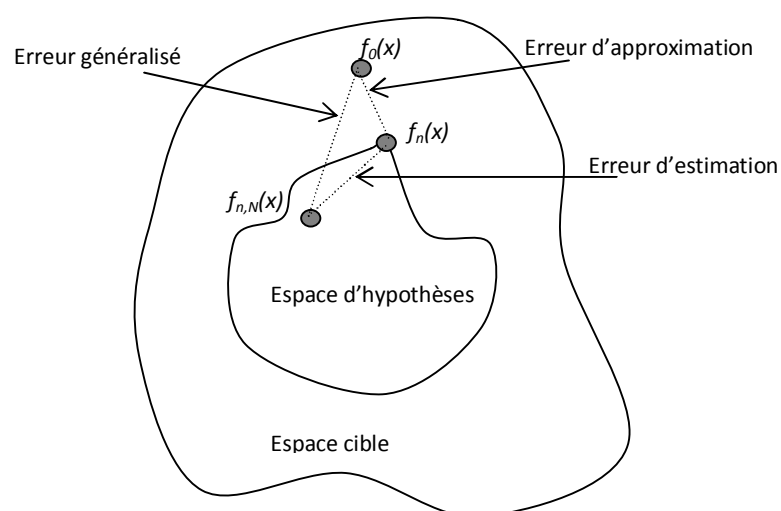


Fig.3.1 Modèles d'erreurs [61]

- Erreur d'approximation : est définie comme la différence entre une valeur exacte d'une variable et une autre valeur approchée. Cette erreur justifie que l'espace d'hypothèses est plus petit que l'espace cible,
- Erreur estimée : cette erreur est générée lors de l'apprentissage où les résultats sont sélectionnés pendant la phase d'un modèle non-optimal,
- Erreur généralisée : d'après la figure (3.1), on voit que cette erreur est une distance qui lie les deux autres erreurs citées auparavant. Mathématiquement, si les distances (des erreurs) deviennent très petites, on peut dire que cette erreur est l'erreur quadratique moyenne.

3.4. Principes de base de la méthode

La méthode des SVM se situe dans la gamme des techniques d'apprentissage. Cette nouvelle méthode a bien donné un univers robuste comparant aux méthodes utilisées avant comme la méthode des réseaux de neurones. Cet univers a permis de trouver un compromis entre la capacité du modèle à apprendre (liée à sa complexité) et son aptitude à généraliser. Du point de vue conceptuel, la notion de risque structurel introduite par *Vladimir Vapnik* [62] donne une borne de l'erreur de test en fonction de l'erreur d'apprentissage et de la complexité du modèle. En pratique, cette méthode offre un moyen opérationnel pour minimiser le risque structurel, ce qui explique l'engouement suscité dans la communauté scientifique.

La méthode SVM a permis de traiter deux sortes de problèmes :

- Les problèmes de classification,
- Les problèmes de régression.

La méthode SVM repose sur la technique des séparateurs à vastes marges. Elle introduit une technique d'apprentissage qui permet de résoudre des problèmes de discrimination. Le principe de classification permet de voir une idée sur l'appartenance d'un échantillon ou d'un élément à une classe précise.

Cette nouvelle technique unifie deux théories [60] :

- Minimisation du risque empirique,
- Capacité d'apprentissage d'une famille de fonctions.

La technique des séparateurs à vastes marges repose sur deux points essentiels :

- La notion de la marge maximale,
- La notion de la fonction noyau.

L'élaboration théorique de la méthode SVM suit deux étapes :

- La transformation non linéaire des exemples de l'espace d'entrée vers un espace dit de redescription de grande dimension muni d'un produit scalaire (espace de Hilbert), donc L'idée objective de la méthode SVM est de transformer un problème de séparation non linéaire en un problème de séparation linéaire

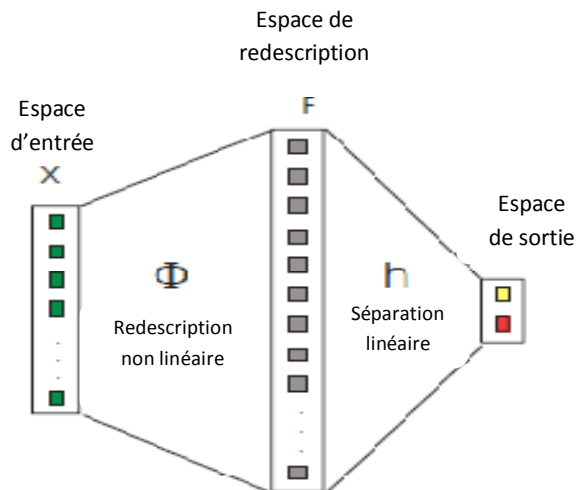
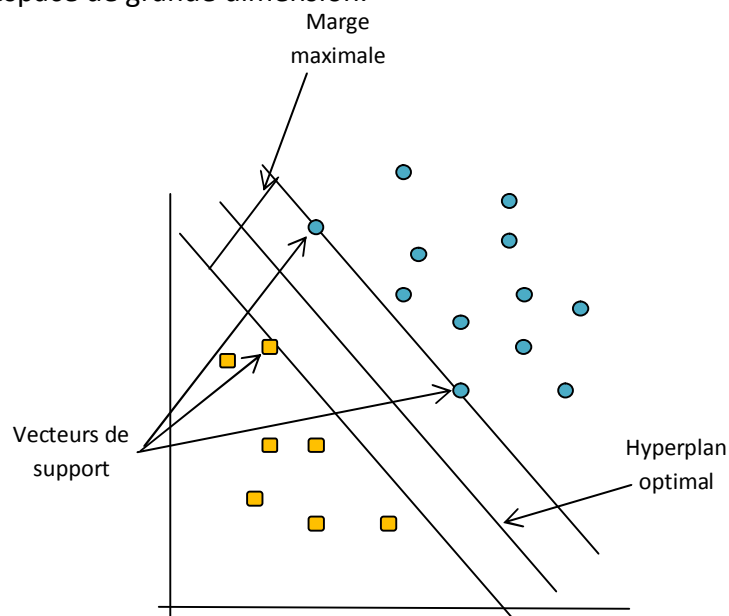


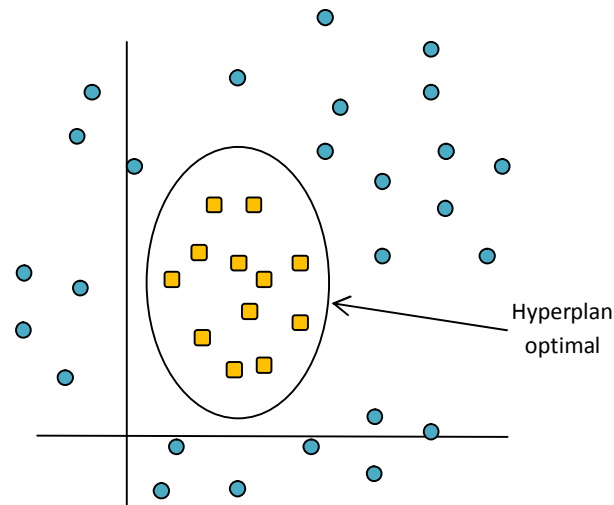
Fig.3.2 Transformation non linéaire des données [63]

- La détermination d'un hyperplan permettant une séparation linéaire optimale dans cet espace de grande dimension.



**Fig.3.3 Hyperplan séparateur dans l'espace de redescription
Discrimination à deux classes avec séparation linéaire**

La figure (3.3) montre un hyperplan optimal qui permet la séparation de deux classes par un séparateur linéaire. La figure (3.4) montre un séparateur non linéaire sous forme d'un cercle en considérant un plan de deux dimensions.



**Fig.3.4 Hyperplan séparateur dans l'espace de redescription
Discrimination à deux classes avec séparation non linéaire**

3.4.1. Minimisation du risque empirique (ERM)

La classification la plus simple est la classification binaire qui repose sur deux classes différentes nommées : classe (+1) et classe (-1). Le problème d'apprentissage s'intéresse éventuellement à un phénomène f qui est dans la majorité des cas non-déterministe. On doit trouver une sortie au moins y qui dépend d'un ensemble d'entrées x

$$y = f(x) \quad (3.1)$$

Le but est de retrouver f à partir de la seule observation d'un certain nombre de couples entrée-sortie

$$(x_i, y_i), \quad i = 1, \dots, n \quad (3.2)$$

Une machine efficace d'apprentissage est une machine qui apprend de l'ensemble d'entraînement une fonction qui minimise les erreurs de classification sur l'ensemble lui-même [64].

On appelle le risque empirique $R_{emp}[f]$ le taux d'erreurs effectuées par la fonction f sur l'ensemble d'entraînement (formules 3.3 et 3.4)

$$R_{emp}[f] = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n L(x_i, f(x_i)) \quad (3.3)$$

Avec

$$L = \begin{cases} 1 & \text{si } y_i = f(x_i) \\ 0 & \text{si non} \end{cases} \quad (3.4)$$

Afin de minimiser le risque empirique, on utilise la relation (3.5)

$$\hat{f}_n(x) = \arg \min R_{emp} [f] \quad (3.5)$$

Cette minimisation n'est possible que si la condition de la formule (3.6) est justifiée

$$\lim_{n \rightarrow \infty} R_{emp} [f] = R[f] \quad (3.6)$$

Pour arriver à des résultats efficaces, on doit généraliser la fonction en introduisant un ensemble de test. Donc, on a en tout deux ensembles :

- Un pour l'apprentissage,
- L'autre pour le test.

3.4.2. Dimensions VC

Cette notion notée h est apparue aux deux chercheurs *Vapnik* et *Chervonenkis*. *Steve R. Gunn* [61] a mentionné que cette dimension d'un ensemble de fonctions est le nombre maximal de points qui peuvent être séparés de toutes les manières possibles. D'une autre façon cette dimension peut nous donner une idée sur la capacité d'un ensemble de fonctions.

3.4.3. Minimisation du risque structurel (SRM)

Vu la complexité des problèmes, la notion de la minimisation du risque empirique ne donne pas une bonne explication interprétée par les dimensions VC. Donc, on était obligé d'introduire une autre notion qui s'appelle minimisation du risque structurel. La notion du SRM est basée sur l'introduction d'une structure nommée S_h dans l'espace d'hypothèses en tenant compte des dimensions VC notées h . ce qui justifie la relation (3.7)

$$S_1 \subset S_2 \subset S_3 \dots S_\infty \quad (3.7)$$

SRM consiste à résoudre un problème de la formule (3.8) avec la probabilité $(1-\delta)$:

$$\min_{S_h} R_{emp} [f] + \sqrt{\frac{h \ln\left(\frac{2n}{h}+1\right) - \ln\left(\frac{\delta}{4}\right)}{n}} \quad (3.8)$$

Marref Nadia [60] a constaté qu'il est difficile de généraliser à partir d'un échantillon de petite taille. Plus n est petit, plus la différence entre le risque structurel et le risque empirique n'est susceptible d'être élevée. Donc plus on arrive à des valeurs très petites du risque structurel, plus on aura de bons résultats.

3.5. SVM et problèmes de régression

Les problèmes de régression imposent à une fonction d'avoir plus de valeurs hors 0 et 1 traitées pour les problèmes de classification. Comme dans les autres techniques d'apprentissage, SVM suit la même procédure. Pour justifier la fiabilité de la méthode, on doit comme on a dit auparavant tester avec d'autres valeurs hors les valeurs utilisées dans la phase d'apprentissage. On distingue deux types de régression selon les cas à traiter :

- Régression linéaire,
- Régression non linéaire.

3.5.1. Régression linéaire

L'objectif de cette régression est de trouver une fonction estimée (relation 3.9) :

$$y = \hat{f}_n(x) \quad (3.9)$$

Dans la phase d'apprentissage la machine essaye de trouver une relation qui lie des entrées ou le vecteur d'observations x et la sortie qui est dans notre cas y . Plus le vecteur d'observations comprend plus de points plus l'apprentissage donne de bons résultats. L'espace d'hypothèses doit être contrôlé afin de ne pas confronter le problème de sur-apprentissage. Une bonne estimation de la fonction f consiste à trouver des paramètres (a_1, a_2, \dots, a_m) qui justifient les relations suivantes :

$$\begin{cases} y_1 = f_{a_1, \dots, a_m} + e_1 \\ \vdots \\ y_n = f_{a_1, \dots, a_m} + e_n \end{cases} \quad (3.10)$$

Où :

- $\varepsilon = \{e_1, \dots, e_n\}$ est appelé espace d'erreurs que doivent être les minima possibles.

Le vecteur d'entrées x avec la dimension d est transformé dans l'espace de redescription à un vecteur de plus grande dimension d' . Donc, l'approximation linéaire suit la loi mentionnée dans la formule (3.11) :

$$f(x) = \langle w, x \rangle + b \quad (3.11)$$

Où : b et w sont respectivement le biais et le poids comme les paramètres utilisés dans la méthode des réseaux de neurones. La fonction de régression optimale est donnée par le minimum de la fonction suivante :

$$\phi(w, \xi) = \frac{1}{2} \|w\|^2 + C \sum_{i=1}^n (\xi_i^- + \xi_i^+) \quad (3.12)$$

Où :

- C : un paramètre de régularisation,
- ξ_i^- et ξ_i^+ : sont des valeurs introduites par le processus d'apprentissage pour des valeurs qui ne se trouvent pas dans l'espace d'observation.

En introduisant les multiplicateurs de Lagrange, on va passer à un problème dual. Ce passage est nécessaire puisqu'ils existent plusieurs natures de problèmes. Ces multiplicateurs mènent à classer la régression en plusieurs modèles :

- Fonction de perte ε -insensible,
- Fonction de perte quadratique,
- Fonction de perte d'Huber.

3.5.2. Régression non linéaire

Les fonctions pertes cités auparavant (formule 3.12) peuvent être utilisées pour résoudre des problèmes non linéaires et donner des résultats proches qu'on veut les trouver. La plus utilisée est la fonction de perte quadratique. Par l'amélioration de la technique d'apprentissage, on a introduit la technique des séparateurs à vastes marges par l'introduction de l'optimisation par les moindres carrés (LS-SVM). Cette technique a abouti à une amélioration en termes de minimisation des erreurs. Dans ce cas la formule (3.11) est écrite sous une autre forme :

$$f(x) = w^T \phi(x) + b \quad (3.13)$$

Il est nécessaire de minimiser une fonction dite « fonction de coût » qui contient les erreurs à minimiser :

$$\min C(w, e) = \frac{1}{2} w^T w + \frac{1}{2} \gamma \sum_{i=1}^n e_i^2 \quad (3.14)$$

Avec γ est le terme de régularisation. Pour aboutir à des résultats rapidement, on peut utiliser la technique de normalisation. Le but est d'arriver à l'égalité mentionné dans la formule (3.15) :

$$y_i = w^T \phi(x_i) + b + e_i \quad (3.15)$$

Pour résoudre ce problème d'optimisation, on peut utiliser la fonction de Lagrange :

$$L(w, b, e, \alpha) = \frac{1}{2} \|w\|^2 + \gamma \sum_{i=1}^n e_i^2 - \sum_{i=1}^n \alpha_i \{w^T \phi(x_i) + b + e_i - y_i\} \quad (3.16)$$

Où :

- α_i sont les multiplicateurs de Lagrange.

La solution de l'équation (3.16) est obtenue par l'utilisation des différences partielles. La solution justifie le suivant :

$$w = \sum_{i=1}^n \alpha_i \phi(x_i) = \sum_{i=1}^n \gamma e_i \phi(x_i) \quad (3.17)$$

Par l'introduction de la notion de la fonction noyau (Kernel), on peut écrire :

$$K(x_i, x_j) = \phi(x_i)^T \phi(x_j) \quad (3.18)$$

Cette approche a bien nous guider de dire que les poids w peuvent être écrits avec des expressions linéaires en fonction des multiplicateurs de Lagrange. On introduit le résultat de la formule (3.17) dans la formule (3.13) et pour chaque valeur y_j , on peut écrire :

$$y_j = \sum_{i=1}^n \alpha_i \phi(x_i)^T \phi(x_j) + b \quad (3.19)$$

Finalement, on peut arriver à la formule suivante :

$$y_j = \sum_{i=1}^n \alpha_i K(x_i, x_j) + b \quad (3.20)$$

3.6. Types de fonctions de noyaux et la méthode LS-SVM

Il existe plusieurs types de fonctions noyaux. Ce noyau est un scalaire calculé introduit dans l'espace de redescription. Le type de la fonction noyau influe sur la qualité d'optimisation. En plus l'utilisation d'un tel type de noyau est choisie en fonction de la complexité du problème à traiter. Parmi ces fonctions noyaux, on peut citer les plus utilisées:

- Fonction linéaire : est un simple produit scalaire

$$k(x_i, x_j) = \langle x_i, x_j \rangle \quad (3.21)$$

- Fonction polynomiale : représenter les frontières de décision par des polynômes de degré d

$$k(x_i, x_j) = (a + \langle x_i, x_j \rangle \cdot b)^d \quad (3.22)$$

- Fonction basique radiale (RBF) : le noyau le plus utilisé

$$k(x_i, x_j) = \exp\left(-\frac{\|x_i - x_j\|^2}{2\sigma^2}\right) \quad (3.23)$$

- Fonction de perception à multicouches (MLP):

$$k(x_i, x_j) = \tanh(\kappa \cdot \langle x_i, x_j \rangle + \vartheta) \quad (3.24)$$

Note : d , σ , κ et ϑ sont des hyper-paramètres ajustés pendant la phase d'apprentissage de l'algorithme de calcul.

3.7. Applications de la méthode SVM

Actuellement, LS-SVM est utilisée vastement au lieu de la méthode de base SVM. Beaucoup de chercheurs ont bénéficié de cette technique afin de résoudre des grands problèmes. L'efficacité de la méthode LS-SVM a trouvé son intérêt pour le traitement des ensembles à grandes dimensions. Les applications de cette méthode sont diverses et touchent plusieurs domaines tels que :

- La médecine et secteurs annexés,
- Le traitement de données dans les applications informatiques,
- Le traitement des données dans le secteur économique,
- Le secteur industriel (exemple : réseau de transport d'énergie).

3.7.1. Applications dans le domaine de la médecine et secteurs annexés

Plusieurs applications ont trouvé succès dans le secteur médical. Parmi les chercheurs qui ont traité des problèmes en utilisant la méthode de LS-SVM, on trouve :

- *Xiaoyi Xu et al.* [65] ont trouvé que plus de 70 gènes sont responsables au cancer du sein chez les femmes. Par l'application de LS-SVM comme un moyen de classification, ils ont bien trouvés des facteurs favorisants qui lient plusieurs gènes à causer un tel type de cancer,
- *Shibiao Wan et al.* [66] ont utilisé la méthode SVM pour bien traiter la teneur en protéines dans certains médicaments en la combinant avec une technique médicale appelée ontologie génique,
- *Ali El Akadi* [67] dans sa thèse de doctorat a fait une recherche génétique en utilisant un classifieur SVM pour l'évaluation de la pertinence des sous-ensembles candidats. Son contribution concerne la proposition d'une approche hybride pour la sélection de gènes dans le cadre de la classification de différents types de tumeurs (tissu cancéreux ou distinction entre différents types de cancers). El. Akadi a bien constaté que Le problème de la sélection de variables en classification se pose généralement lorsque le nombre de variables pouvant être utilisé pour expliquer la classe d'un individu est très élevé. La méthode SVM a bien résoudre ce problème avec succès,
- *Rajesh Kumar Tripathy et al.* [68] ont proposé dans leur étude l'application de la méthode SVM pour l'analyse de la synthèse catalytique de Lipase d'Ester d'Alcool de Sucre. Ces chercheurs ont bien fait une comparaison entre cette méthode et la méthode ANN en utilisant Un classifieur perceptron multicouche issu d'un réseau de neurones (MFNN). Ils ont bien constaté que la méthode SVM a donné de bons résultats en termes de précision.

3.7.2. Applications pour le traitement de données dans les applications informatiques

Plusieurs recherches et applications de la méthode SVM dans le domaine informatique et ses environnements tels que l'internet. On cite ici deux études :

- *Muamer N. Mohammed et Norrozila Sulaiman* [69] ont traité les problèmes de circulation de l'information dans l'internet et surtout le problème du piratage. Ces chercheurs ont essayé d'introduire un système en utilisant la méthode SVM qui permet de classer et différencier les différents types d'attaque dans le réseau sans fil (WLAN). La méthode a bien donner des résultats satisfaisants en donnant un facteur de tolérance permettant de juger la nature d'entrée et prendre la décision en faisant alarme ou non.

- *Harris Drucker et al.* [70] s'intéressaient à l'application de la méthode SVM pour la classification des messages informatiques (e-mails) en les considérant comme un courrier électronique indésirable ou non (spam). Ces auteurs ont comparé cette méthode avec d'autres algorithmes de classification tels que : Rocchio et l'arbre décisionnel. Ils ont trouvé de bons résultats avec une erreur minimale. Aussi, ils ont constaté que la robustesse de la méthode SVM consiste à traiter beaucoup d'information en termes de taille et en plus en un temps très court en la comparant avec les autres algorithmes cités auparavant.

3.7.3. Applications pour le traitement de données dans le secteur économique

Aujourd'hui, la méthode SVM trouve son emplacement primordial pour le traitement des données dans le secteur économique. Parmi les applications, on trouve :

- *Sheng Lu et al.* [71] ont utilisé une méthode hybride en combinant les algorithmes génétiques et la méthode SVM pour le traitement avec précision des taxes sur les revenus dans le marché économique. Ces chercheurs ont bien constaté que la méthode SVM a donné des résultats magnifiques puisque les problèmes traités étaient sous contrainte d'un phénomène non-linéaire. Ils ont bien réussi à établir un modèle de prédiction qui peut gérer les décisions rapidement pour des ensembles de petite à grande taille,
- *EL Asli* [72] a dit dans son mémoire que l'estimation du coût des produits est une étape cruciale pour les entreprises manufacturières d'aujourd'hui; surtout, en phase de conception, lorsque les conditions et les moyens de fabrication ne sont pas encore complètement connus. Dans son approche proposée, une méthode hybride qui combine la méthode SVM avec les algorithmes génétiques est utilisée pour faire une approximation de la relation entre les conditions de conception et les paramètres du produit dans le cas d'estimation du coût. El Asli a bien constaté la robustesse de la méthode SVM puisque qu'elle a aidé à la décision flexible et qu'elle est capable d'estimer le coût de fabrication d'un produit lorsque ce dernier n'est pas encore complètement défini. Cette satisfaction est basée sur la comparaison avec la méthode des réseaux de neurones.

3.7.4. Applications dans le secteur industriel

Puisque le secteur industriel touche les différents domaines de notre vie quotidienne, on voit qu'il est si important de voir l'application de la méthode SVM dans ce secteur. Plusieurs recherches ont été traitées telles que :

- *Xi-Mei Liu et al.* [73] ont traité l'application de l'approche de la méthode SVM pour le traitement des systèmes en haute tension. Ils ont intéressé dans leur étude à la

détection des défauts dans un système en inspectant les courants qui circulent dans le réseau électrique. Ces chercheurs ont bien constaté que l'utilisation de la méthode SVM est efficace pour ce genre de traitement,

- *Okan Ozgonenel et al.* [74] ont constaté dans leur étude que le contrôle d'écoulement d'énergie dans un réseau électrique est un facteur important en termes de la qualité du service des fournisseurs d'électricité. La méthode SVM est appliquée pour ce traitement. Ils ont trouvé son efficacité de bien faire la classification des différents points du réseau électrique en indiquant avec précision les points de déséquilibre. Ils ont constaté que cette méthode a donné des résultats très satisfaisants en la comparant avec d'autres approches de classification qui utilisent le mode de la décomposition empirique des ensembles (EEMD) et la technique de transformation de *Hilbert Huang* (HHT),
- *Dongfeng Shi et Nabil N. Gindy* [75] ont traité le problème d'usure des machines par exemples dans l'industrie. Donc, ils ont pensé à trouver un système de contrôle qui permet de donner à tout moment l'état des machines utilisées. Pour cela les tests faits décrivent qu'ils ont utilisé des capteurs de mesures et ensuite utiliser ces données dans un programme basé sur l'approche la méthode SVM. L'avantage constaté par l'utilisation de cette approche réside dans le bon calcul malgré le peu des échantillons dès fois d'un côté ; et d'un autre côté les résultats très satisfaisants en la comparant avec une technique expérimentale qui utilise le microscope de feuilletage optique,
- *Betul Bektas Ekici* [76] a montré que le taux d'ensoleillement dans une région est un facteur vital pour les centrales solaires. Elle a utilisé la méthode LS-SVM où elle a permis d'élaborer un système expert de calcul capable de prédire avec exactitude (plus que 90%) le taux d'ensoleillement du lendemain en se basant sur les données réelles collectées avant dans les stations de mesure,
- *Muhsin Tunay Gençoğlu et Murat Uyar* [77] ont traité le problème de l'influence de la pollution sur les isolateurs utilisés dans les réseaux électriques. Ce problème prend importance à cause de la tension élevée puisque plusieurs phénomènes se manifestent lors de l'utilisation de la haute tension (vieillesse des isolants). Muhsin et son collègue propose un modèle dynamique de simulation de la tension de contournement des isolateurs en utilisant l'approche de la régression par la méthode LS-SVM. Ils ont utilisé des paramètres d'entrée et autre de sortie. Les entrées sont des paramètres décrivant la géométrie des isolateurs tels que le diamètre, la hauteur, la ligne de fuite et le facteur de forme tandis que la sortie est la tension de contournement. L'utilisation de cette approche a donné de bons résultats. Cette conclusion est tirée d'après la comparaison des résultats avec ceux de la méthode MFNN. Ils ont constaté que la méthode LS-SVM est une méthode robuste et puissante et permet d'éviter des problèmes tels que le problème d'optimum local,

- *Velaga Sreerama Murthy et al.* [78] ont proposé une approche hybride en utilisant la méthode d'analyse de multi-résolution des ondelettes (WMRA) et la méthode SVM. Cette approche est divisée en deux étapes ; la première consiste à utiliser la méthode WMRA afin d'identifier des images des isolateurs et faire une base de données. La deuxième étape est d'utiliser cette base de données dans l'approche SVM et faire des traitements de classification en donnant les résultats de l'état des isolateurs. Selon l'indice proposé par ces auteurs, trois états données ; état sain, état marginal et état risqué. Ces auteurs ont constaté que cette approche hybride a donné de bons résultats. En plus, cette approche peut donner des résultats en temps réel en utilisant des caméras aux près des pylônes. Ceci peut éviter des dépenses et gagner du temps ; puisque la méthode classique consiste à utiliser des hélicoptères de surveillance,

3.8. Application de la méthode SVM dans le diagnostic des systèmes

L'objectif est d'appliquer la méthode SVM dans le diagnostic les systèmes d'isolation des équipements de production et transport d'énergie électrique.

Les études de cas traitées dans le cadre de cette thèse :

- Calcul général par classification,
- Calcul général par régression,
- Calcul par régression de la tension de contournement des isolateurs pollués par le dépôt du sel,
- Calcul de la tension de contournement des isolateurs en verres dans les conditions météorologiques secs et sous pluie,
- Calcul des composantes furaniques dans les transformateurs de puissance.

Les deux premiers cas sont illustrés dans ce chapitre tandis que les trois autres cas seront présentés dans le chapitre suivant.

3.9. Calcul général par classification

On s'est basé dans la phase de la simulation sur des problèmes de régression. Mais néanmoins, on a appliqué la méthode LS-SVM pour des exemples de classification regroupés en deux catégories selon le mode de classification:

- Classification linéaire,
- Classification non linéaire.

3.9.1. Classification linéaire

Deux exemples sont traités; le premier exemple utilise une base de données de 150 éléments générés aléatoirement. L'exemple faire une classification des données en deux classes en utilisant comme fonction noyau du type polynomiale. L'algorithme de calcul suit les étapes suivantes :

- Chargement des données,
- Séparer les données en ensemble d'apprentissage et ensemble de test,
- Faire la classification en utilisant dans le programme les instructions nécessaires comme « svmclass »,
- Affichage des résultats.

Le premier exemple traite la classification linéaire de deux classes, tandis que le deuxième exemple traite une classification de type linéaire à trois classes différentes. Ce deuxième exemple utilise la méthode avec l'utilisation de plusieurs valeurs du coefficient de pénalisation asymétrique C . Ceci a pour effet que le programme donne des résultats différents à chaque fois que l'on exécute.

3.9.1.1. Classification linéaire de deux classes

Cet exemple traite la classification d'une matrice de 150 lignes et 2 colonnes. Ces éléments sont générés d'une façon aléatoire en utilisant l'instruction « randn ». Cette instruction et autres sont préinstallées dans l'outil de programmation. Ensuite on fait la classification par l'instruction « svmclass ». On note ici que la classification utilisée est la plus simple traitée dans la littérature [64] c'est la classification binaire. On utilise dans cette classification deux ensembles ; une noté (+1) et l'autre noté (-1). Les résultats de cette simulation sont présentés dans la figure (3.5) :

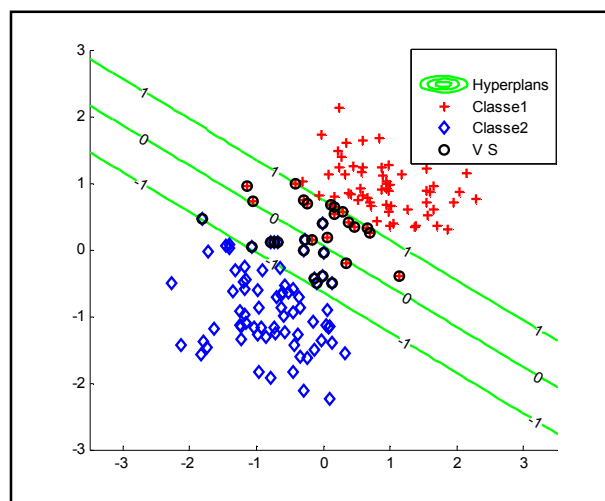


Fig. 3.5 Classification linéaire binaire

Dans la figure (3.5), la première classe est en (+) rouge et la deuxième classe est en (◇) bleu. VS signifie « Vecteurs de Support ». On remarque aussi trois hyperplans :

- Hyperplan 1
- Hyperplan -1
- Hyperplan optimal 0

3.9.1.2. Classification linéaire de trois classes

Dans cet exemple, on a fait la classification linéaire en séparant trois classes. Les résultats sont présentés dans la figure (3.6) :

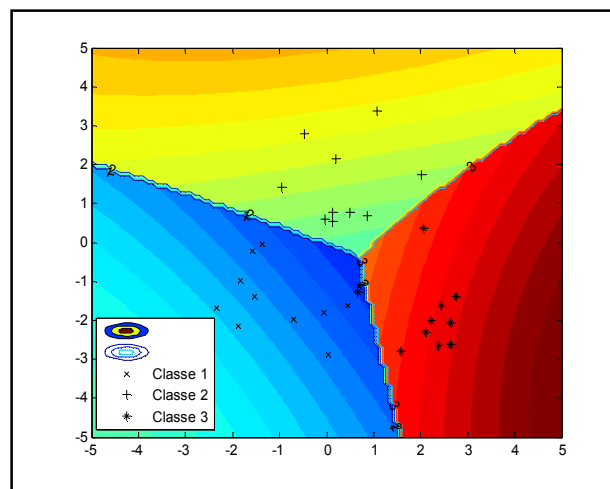


Fig. 3.6 Classification linéaire de trois classes

La classification faite dans cet exemple se base sur des vecteurs de support à marge souple [64]. Le coefficient de détermination est de l'ordre 96.67%.

3.9.2. Classification non linéaire

Les exemples traités dans ce contexte sont deux ; un pour une classification non linéaire de deux classes et l'autre pour trois classe différentes.

Chaque problème traité impose la classification appropriée. Le but est aboutit lorsqu'on aura plusieurs classes d'une façon supervisée ; c'est-à-dire imposer les critères de classification ou non supervisée dans le cas contraire.

3.9.2.1. Classification non linéaire de deux classes

Cet exemple traite une matrice « 100 x 2 ». La classification est d'une façon non linéaire d'un exemple d'une distribution aléatoire des points. Les résultats sont mentionnés dans la figure (3.7) :

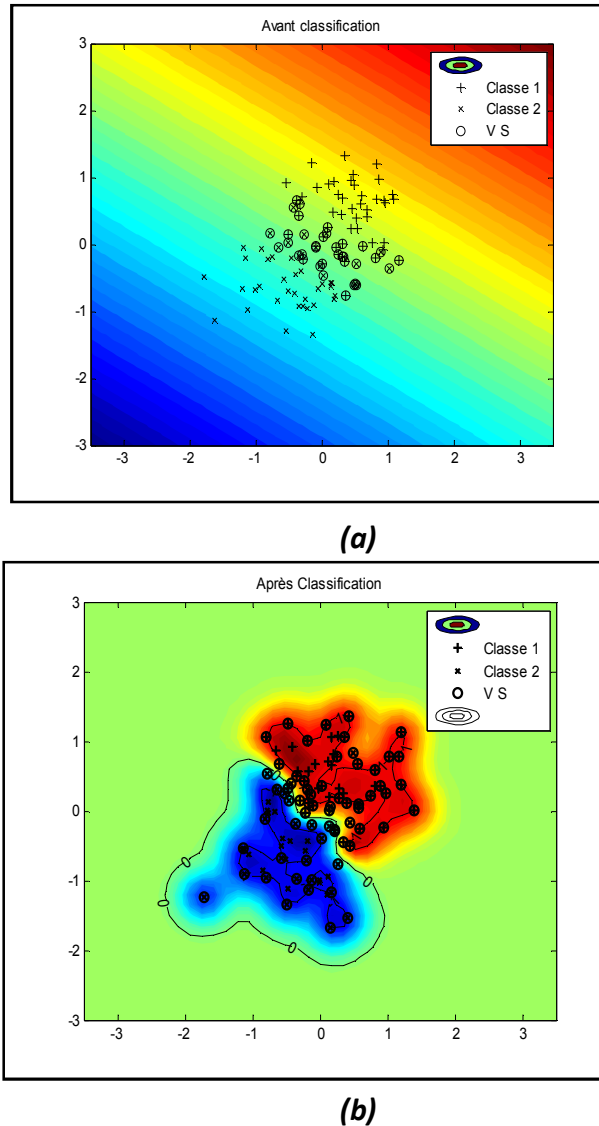


Fig. 3.7 Classification non linéaire de deux classes

On remarque dans la figure (3.7) que la classification est faite en deux étapes. La première étape est d'obtenir les vecteurs de support (V S) ; ils sont mentionnés dans la figure (3.7a) par des cercles en noir. Ensuite dans la deuxième étape la classification est aboutie en désignant l'hyperplan optimal (la ligne noire avec 0 dans la figure 3.7b). Les résultats ont pour valeurs comme suivant :

- 21 vecteurs de support,
- Coefficient de détermination $R^2 = 94.45\%$.

3.9.2.2. Classification non linéaire de trois classes

On a fait la classification de 60 points distribués aléatoirement d'une façon non linéaire. Le résultat est abouti en faisant trois classes avec 8 vecteurs de support et une exactitude de 99.34%. Les résultats sont présentés dans la figure (3.8) :

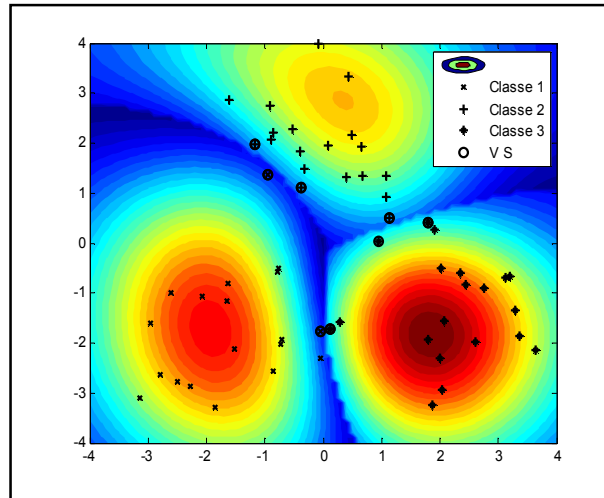


Fig. 3.8 Classification non linéaire de trois classes

On remarque dans la figure (3.8) le suivant :

- Les limites qui séparent les classes sont en bleu,
- La dégradation de couleur interprète la densité de dispersion dans chaque classe.

3.10. Calcul général par régression

On donne ici un exemple simple pour voir la régression effectuée par la méthode SVM. L'exemple est une base données composée de 20 points (x, y) ; 10 points sont utilisés dans la phase d'apprentissage et le reste pour le test. Les points sont présentés dans le tableau (3.1) :

Tableau 3.1 Données utilisées pour la régression

| | Apprentissage | | | | | Test | | | | |
|---|---------------|-----|-----|-----|-----|------|-----|-----|-----|-----|
| X | 10 | 20 | 80 | 130 | 160 | 50 | 60 | 100 | 220 | 260 |
| Y | 556 | 483 | 412 | 390 | 287 | 465 | 438 | 395 | 233 | 204 |
| X | 170 | 200 | 280 | 300 | 400 | 350 | 430 | 460 | 490 | 520 |
| Y | 279 | 254 | 185 | 172 | 124 | 161 | 115 | 102 | 95 | 88 |

Les résultats de simulation sont présentés dans les figures (3.9) et (3.10). La figure (3.9) présente l'erreur rmse en fonction des paramètres d'optimisation (σ^2 et γ) tandis que la figure (3.10) illustre le modèle calculé par la méthode SVM en faisant une régression avec une fonction noyau RBF.

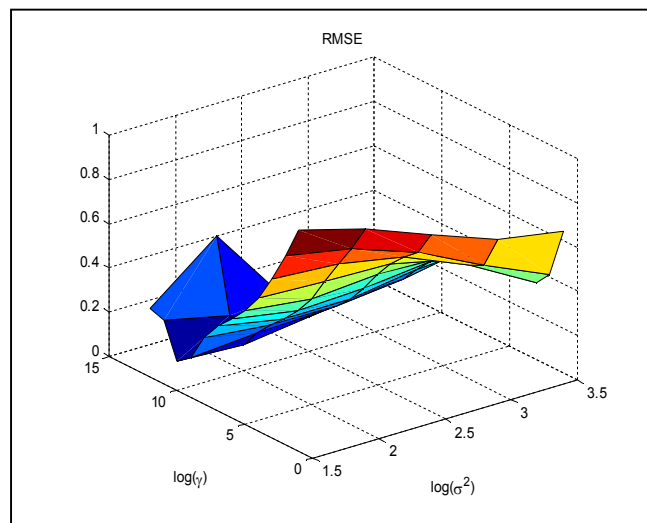


Fig. 3.9 RMSE vs. Paramètres de régularisation

Les paramètres d'optimisation calculés sont :

- Le paramètre de la fonction noyau $\sigma^2 = 11.3137$,
- Le paramètre de régularisation $\gamma = 4096$.

Le calcul est effectué avec un coefficient de détermination R^2 égale à 99.26%.

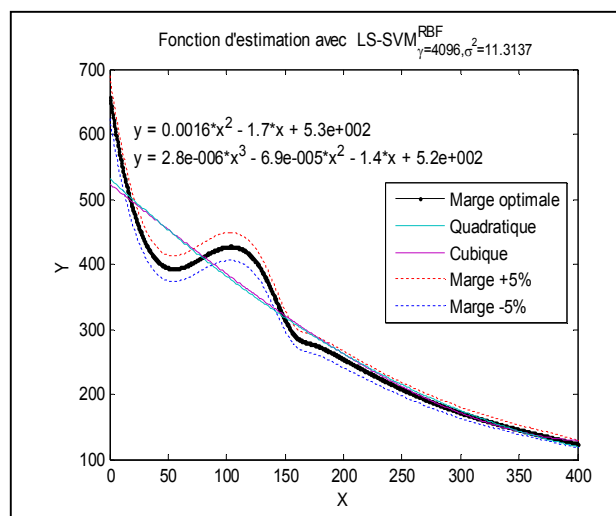


Fig. 3.10 Fonction d'estimation de la régression
 $\gamma = 4096, \sigma^2 = 11.3137$

La figure (3.10) montre la régression avec les marges optimales de variation en prenant en considération les marges d'erreur (+5%) et (-5%). En plus, on voit les fonctions après le lissage. On cite ici deux types de lissage, un lissage quadratique (la première équation en haut de la figure) et un lissage cubique (la deuxième équation).

3.11. Conclusion

La plupart des techniques d'apprentissage éprouvent de grandes difficultés à traiter les données de très haute dimension. Pour surmonter ce problème, on procède souvent par la sélection d'une partie des attributs des données pour réduire la dimension de l'espace d'entrée. Mais dans ce cas on aura besoin d'utiliser des hypothèses simplificatrices qui ne se vérifient pas toujours en pratique. Par ailleurs, SVM est un modèle discriminant qui tente de minimiser les erreurs d'apprentissage tout en maximisant la marge séparant les données des classes. Bien que récemment proposée, cette approche a fait l'objet d'un nombre important de publications.

CHAPITRE 4

L'Approche des Machines à Vecteurs de Support (SVM) pour la Prédiction des Performances Electriques des Isolants

4.1. Introduction

Dans ce chapitre, on va traiter quelques résultats de simulation obtenus. On discute ces résultats en les comparant avec des travaux antérieurs pour la même méthode et avec d'autres modèles basés sur d'autres outils de simulation. La méthode utilisée dans la simulation est la méthode LS-SVM. On a traité deux systèmes d'isolation :

- Les isolateurs dans les systèmes à haute et très haute tension,
- Les isolants dans les transformateurs de puissance.

4.2. Simulation de la tension de contournement dans les isolateurs pollués

Des études antérieures établies par nos chercheurs consistent à estimer la tension de contournement des isolateurs pollués par l'utilisation des approches basées sur les algorithmes génétiques [80] et les réseaux de neurones artificiels [81]. Le calcul consiste à établir une relation entre les paramètres d'entrée des isolateurs et la tension de contournement comme un paramètre de sortie. Les paramètres d'entrée sont :

- La ligne de fuite « L (mm) »,
- La hauteur de l'isolateur « H (mm) »,
- Le diamètre de l'isolateur « D_m (mm) »,
- Le facteur de forme « F »,
- La densité de dépôt du sel « C (mg/cm^2) »,
- La densité surfacique de l'isolateur en fonction de la densité du dépôt du sel « σ_s (Ω^{-1}) ».

$$\sigma_s = (369.05 \cdot C + 0.42) \cdot 10^{-6} \quad (4.1)$$

Le paramètre de sortie est la tension de contournement « U_c (kV) ». Cette tension peut être calculée par la relation (3.27) [52, 79] :

$$U_c = \frac{A}{n+1} \cdot (L + \pi \cdot n \cdot D_m \cdot F \cdot K) \cdot (\pi \cdot A \cdot D_m \cdot \sigma_s)^{-\left(\frac{n}{n+1}\right)} \quad (4.2)$$

Où :

- A, n : Constantes d'arc,
- L : distance entre électrodes (voire figure 4.1),
- D_m : diamètre maximal de l'isolateur.

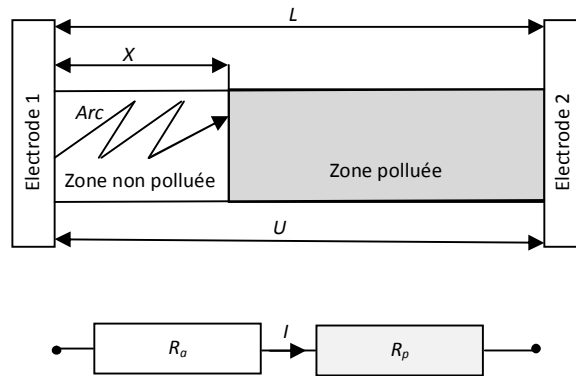


Fig. 4.1 Circuit équivalent d'un isolateur pollué [79]

Le facteur K est calculé par la relation suivante :

$$K = \frac{N(n+1)}{2 \cdot \pi \cdot n \cdot F} \left(\ln \left(\frac{4 \cdot L}{\pi \cdot N \cdot R} \right) - \ln \left(\tan \left(\frac{\pi}{2 \cdot (n+1)} \right) \right) \right) \quad (4.3)$$

Où N désigne le nombre de la chaine d'isolateurs

Avec R est calculé par la relation suivante :

$$R = 0.469 \cdot (\pi \cdot A \cdot D_m \cdot \sigma_s)^{\left(\frac{1}{2 \cdot (n+1)}\right)} \quad (4.4)$$

D'après la figure (4.1), on désigne par R_a la résistance de simulation de l'arc et R_p représente la résistance de la zone polluée de l'isolateur. La tension U atteint une valeur dite critique (U_c), lorsque la distance x prenne une valeur dite distance critique de l'arc ($x = l_c$). La distance critique de l'arc est calculée par la formule suivante :

$$l_c = \frac{L}{n+1} \quad (4.5)$$

Belkheiri et al. [80] propose un modèle basé sur les algorithmes génétiques où ils ont essayé d'optimiser les paramètres A et n qui donnent les meilleurs résultats. Après le calcul, ces paramètres ont pour valeurs : $A = 177,22$ et $n = 0,510$. L'inconvénient constaté par ces chercheurs c'est que lorsqu'on augmente la taille de la base de données, on aura une influence majeure sur le nombre d'itération et par conséquent sur la convergence du modèle. Dans une deuxième approche, *Zegnini et al.* [81] introduisaient les réseaux de

neurones artificiels pour calculer cette tension de contournement. Ils ont élaboré un modèle basé sur l'utilisation des différents nombres de neurones (2 à 12) et d'utiliser plusieurs fonctions d'activation telles que : fonction linéaire, logistique et hyperbolique. Ils ont constaté que l'utilisation de deux couches cachées donne de bons résultats. A cet effet, on a aimé bien utiliser l'approche des SVMs afin de bien faire une comparaison entre les résultats antérieurs.

Tous les exemples traités dans ce contexte suivent les étapes suivantes :

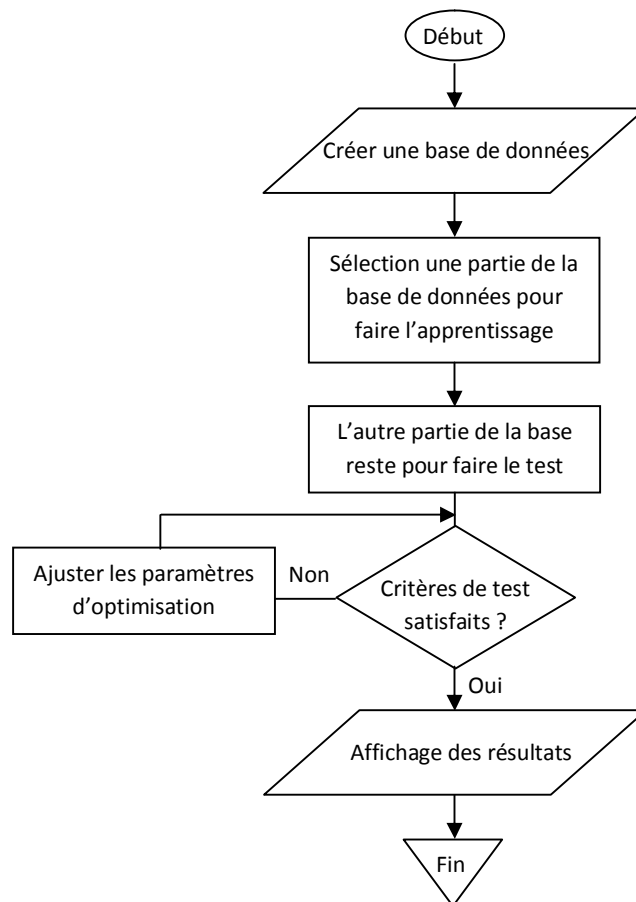


Fig. 4.2 Organigramme de calcul

On a traité les exemples suivants :

- Calcul pour différents types d'isolateurs avec une fonction noyau RBF,[82, 83]
- Calcul de la tension de contournement des isolateurs avec la variation de la température,[84, 85]
- Calcul pour différents types de fonctions de noyau (RBF, Poly et MLP) [86].

4.3. Calcul de la tension de contournement pour quatre isolateurs pollués

On a fait dans cet exemple le calcul de la tension de contournement de quatre types d'isolateurs en utilisant comme fonction noyau de type RBF. On fait donc varier la densité de dépôt du sel (pollution) et voir son influence sur la valeur de la tension critique de décharge. Les caractéristiques des quatre isolateurs sont présentées dans le tableau (4.1) :

Tableau. 4.1 Caractéristiques des isolateurs étudiés [82, 83]

| Isolateur Caractéristiques | Type (T1) | Type (T2) | Type (T3) | Type (T4) |
|---------------------------------|-----------|-----------|-----------|-----------|
| Diamètre maximal D_m (mm) | 254 | 254 | 254 | 254 |
| Distance entre centres H (mm) | 146 | 146 | 146 | 146 |
| Ligne de fuite L (mm) | 431 | 279 | 279 | 305 |
| Facteur de forme F | 0.916 | 0.684 | 0.680 | 0.696 |

Les résultats de programmation sont illustrés dans les figures (4.3) et (4.4a) pour la méthode de LS-SVM et la figure (4.4b) pour la programmation par les réseaux de neurones artificiels :

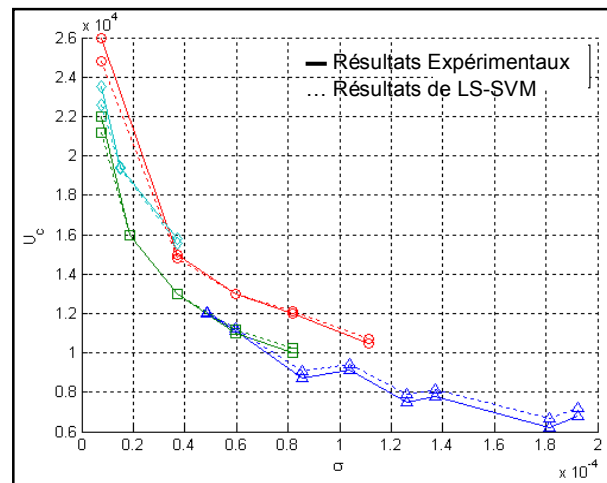
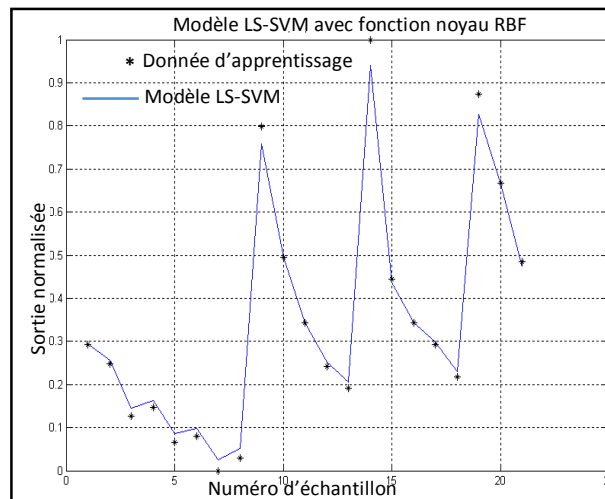
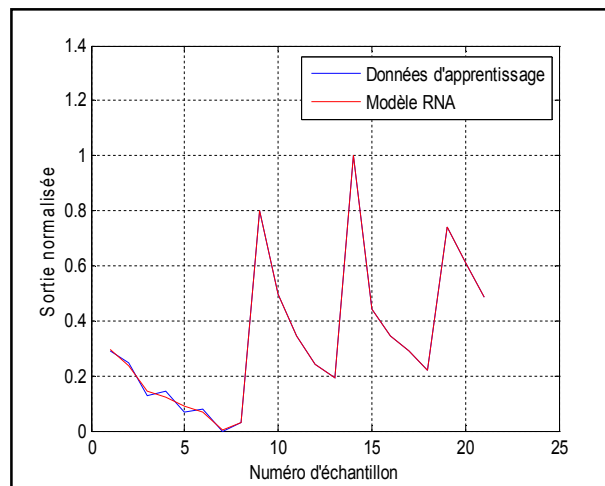


Fig. 4.3 Tension du contournement en fonction de la densité surfacique de la pollution



(a)



(b)

Fig. 4.4 *Modèle normalisé pour quatre types d'isolateurs*

La base de données utilisée comporte 24 échantillons ; 21 utilisés dans la phase d'apprentissage et 3 échantillons pour le test. Pour la méthode LS-SVM les paramètres d'optimisation étaient :

- Paramètre de la régularisation $\gamma = 1.9252$,
- Paramètre de la fonction du noyau RBF, $\sigma^2 = 0.0437$.

Pour le modèle des réseaux de neurones artificiels (ANN), les paramètres du programme étaient :

- Nombre d'itération : 1000 (Epochs),
- Nombre de neurones : 5,

- Nombre de couches : 2,
- Erreur d'apprentissage : 1e-10.

On a fait une comparaison de quelques paramètres statistiques traduits par les équations suivantes :

- Erreur quadratique moyenne (RMSE) :

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{k=1}^N (V_{test,k} - V_{prévue,k})^2} \quad (4.6)$$

- Exactitude traduite par le coefficient de détermination R^2 :

$$R^2 = 1 - \sum_{k=1}^N \left[\frac{Norm(V_{test,k} - \bar{V}_{prévue,k})^2}{Norm(V_{test,k} - V_{prévue,k})^2} \right] \quad (4.7)$$

Où :

- N : taille du vecteur d'échantillon,
- K : numéro de la donnée dans le vecteur,
- Prévues : calculé par la simulation,
- Norm : résultat normalisé.

- Erreur moyenne absolue en pourcentage (MAPE) :

$$MAPE = \frac{100\%}{N} \sum_{k=1}^N \left| \frac{V_{test,k} - V_{prévue,k}}{V_{test,k}} \right| \quad (4.8)$$

D'après les calculs effectués, on donne les résultats dans le tableau (4.2) :

Tableau. 4.2 Résultats statistiques de comparaison

| | RMSE apprentissage | RMSE Test | R^2 % apprentissage | R^2 % Test | MAPE apprentissage | MAPE Test |
|--------|-----------------------|--------------|--------------------------|-----------------|-----------------------|--------------|
| RNA | 0.01510 | 0.2674 | 99.25 | 99.24 | 8.7726 | 4.3454 |
| LS-SVM | 0.00025 | 0.2110 | 99.37 | 99.97 | 0.0012 | 1.1455 |

D'après le tableau (4.2), on voit clairement que la méthode LS-SVM a donné des résultats meilleurs que celle du RNA ; si on prend par exemple le coefficient de détermination, on trouve qu'il est égal à 99.24% pour RNA tandis qu'il est 99.97% pour LS-SVM. Les résultats sont en concordance avec ceux présentés par beaucoup de chercheurs comme *Muhsin Tunay* [77]. Donc les résultats étaient satisfaisants et on note que :

- La tension critique de contournement diminue avec l'augmentation de la densité de la pollution,
- L'augmentation de la ligne de fuite influe sur la tension de contournement puisque cette augmentation cause l'élévation de la résistance de la zone non polluée (Figure 4.1) et par conséquent ceci va augmenter la tension du claquage.

4.4. Influence de la température sur la tension de contournement

Dans cet exemple, on s'intéresse à voir l'influence de la variation de la température spécialement et autres paramètres sur la valeur de la tension à la disruption. Le programme utilisé a pour données comme suivant :

- 6 types d'isolateurs selon leur géométrie [84, 85],
- 45 échantillons au total,
- 38 échantillons dans la phase d'apprentissage,
- 7 échantillons pour le test,
- Paramètre de régularisation $\gamma = 10$,
- Paramètre de la fonction du noyau RBF $\sigma^2 = 0.04$.

Le travail élaboré expérimentalement par *M.A. Salam* [85] est d'ajouter de l'eau distillée à différentes quantités du sel considérées comme la pollution déposée sur les isolateurs. Le résultat est d'avoir une solution salée avec plusieurs concentrations. La variation de la température va influe directement sur la valeur de la conductivité surfacique de la pollution (solution salée) comme suivant :

$$\sigma_{20} = \sigma_{\theta} \cdot [1 - b(\theta - 20)] \quad (4.9)$$

Où :

- θ : température de la solution ($^{\circ}\text{C}$),
- b : facteur dépend de la température (tableau 4.3)

Tableau 4.3 Valeurs de b avec différentes températures [85]

| θ ($^{\circ}\text{C}$) | b ($^{\circ}\text{C}^{-1}$) |
|---------------------------------|---------------------------------|
| 5 | 0.03156 |
| 10 | 0.02817 |
| 20 | 0.02277 |
| 30 | 0.01905 |

Les résultats de simulation sont présentés dans la figure (4.5) :

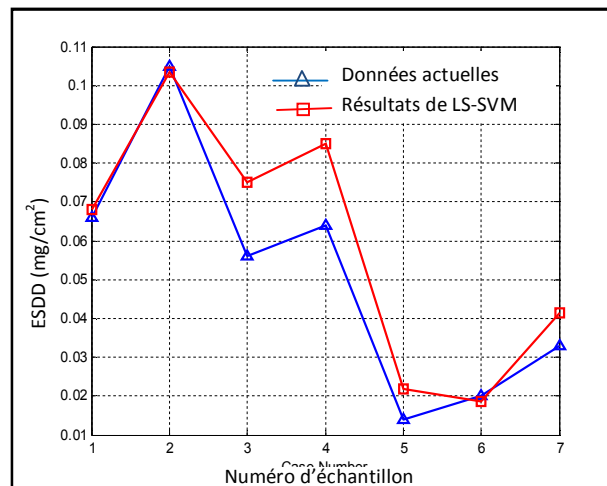


Fig. 4.5 Variation de la densité de la pollution en fonction des échantillons [84]

Les résultats montre une concordance satisfaisante entre les données expérimentales appliquées et celles obtenues par l'application du modèle basé sur LS-SVM. Les valeurs d'optimisation (γ , σ^2) jouent un rôle très important sur l'incertitude des résultats.

La tension de contournement est influencée par plusieurs paramètres. Des chercheurs comme *MA Salam* [85] ont bien illustré cet aspect. La figure (4.6) montre la contribution en pourcentage des différents paramètres sur la tension de contournement des isolateurs :

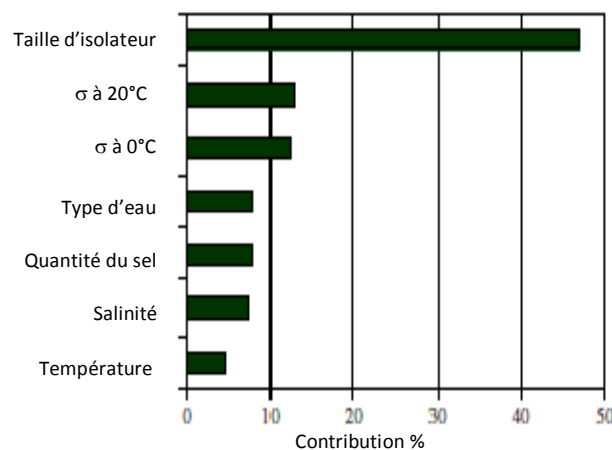


Fig. 4.6 Contribution des différents paramètres sur la tension du contournement des isolateurs [85]

D'après la figure (4.6), on voit clairement que la contribution significative est celle de la taille d'isolateur.

4.5. Calcul de la tension de contournement pour différentes fonctions noyaux

Dans cet exemple, on a fait un calcul de la tension de contournement des isolateurs en utilisant trois types de fonctions de noyaux (RBF, Poly et MLP). La base de données utilisée comporte deux parties :

- Une partie des données calculées en se basant sur la formule (4.2) avec dix échantillons,
- Une autre partie basée sur des données expérimentales avec deux échantillons.

Les résultats sont présentés comme suivant :

- La figure (4.7a) présente les résultats avec la fonction noyau RBF,
- La figure (4.7b) présente les résultats avec la fonction noyau Polynomiale (Poly),
- La figure (4.7c) présente les résultats avec la fonction noyau MLP.

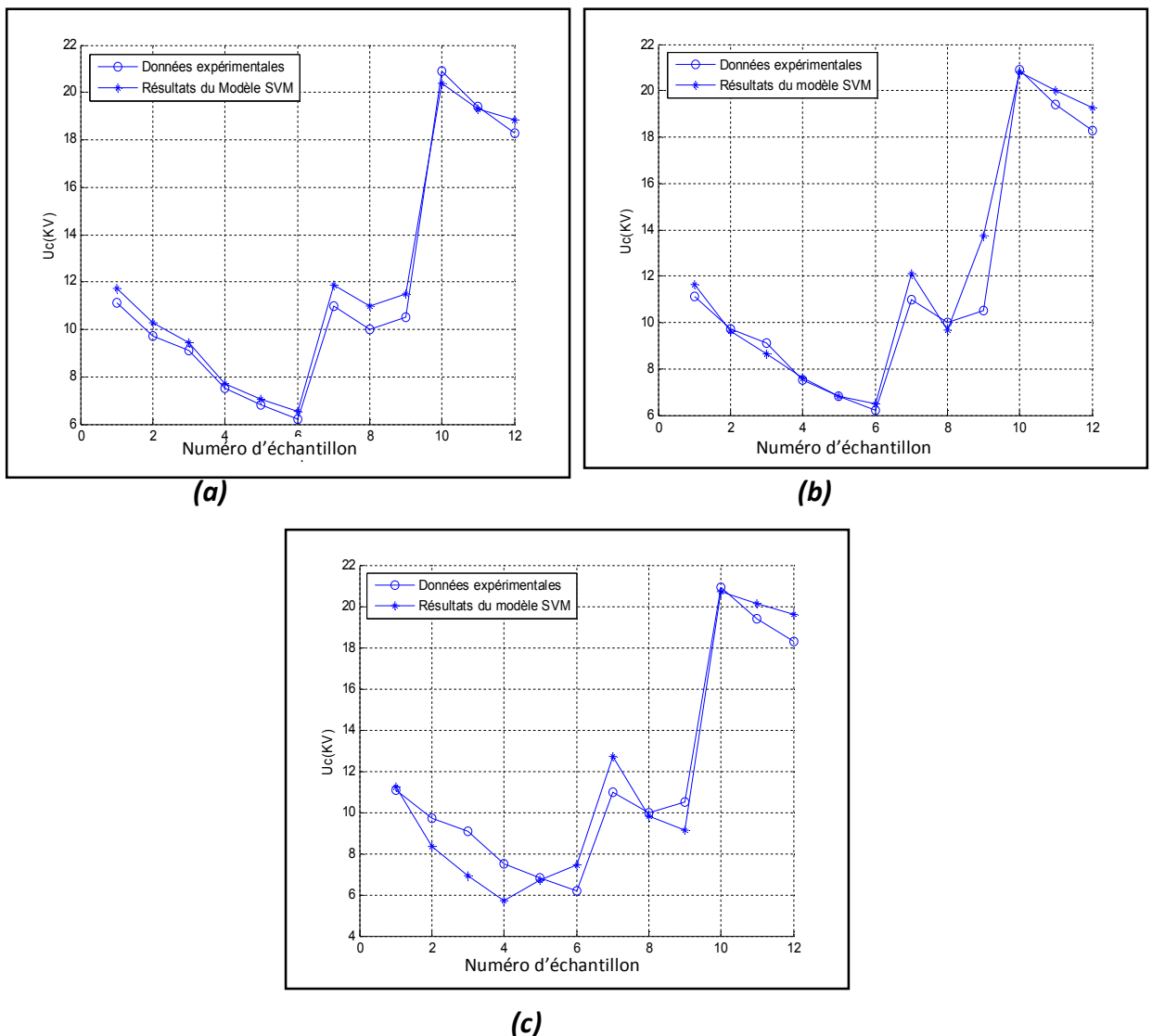


Fig. 4.7 Variation de la tension du contournement en fonction des échantillons avec trois types de fonctions de noyau [86]

D'après ces figures illustrées, on peut constater que les fonctions noyau RBF et Poly (figure 4.7a et 4.7b) donnent des résultats satisfaisants par rapport à la fonction noyau MLP. En plus l'utilisation de la fonction noyau RBF est très populaire dans les travaux de recherche.

4.6. Tension de contournement des isolateurs en verre sous condition de pluie

Dans ce cas, on a essayé de prédire la tension de contournement des isolateurs en verre. La base de données utilisée est tirée d'après les tests expérimentaux faits par Global Insulator Group [3]. Les tests expérimentaux ont été réalisés dans des conditions météorologiques sous un temps sec et sous pluie. L'eau influe sur la densité équivalente de dépôt du sel (ESDD). Pour calculer cette densité, on utilise la relation suivante [85, 87] :

$$ESDD = \frac{S_a \cdot Q_e}{A_i} \quad (4.10)$$

Où

- S_a : Salinité (kg/m^3),
- Q_e : quantité de l'eau (cm^3),
- A_i : surface de l'isolateur (cm^2).

Nous avons utilisé une base de données composée de douze isolateurs différents dont les caractéristiques sont mentionnées dans le tableau (4.4) :

Tableau 4.4 Caractéristiques des isolateurs examinés [3]

| Type d'isolateur | U70BS | U160 BS | U300B | U400B | U530B | U160 BSP | U300 BP | U120 AD | U160 AD | U210 AD | 52-3 | 52-8 |
|----------------------------------|-----------------|---------|-------|-------|-------|----------|---------|---------|---------|---------|------|------|
| Caractéristiques | | | | | | | | | | | | |
| D_m (mm) | 255 | 285 | 320 | 360 | 360 | 320 | 360 | 380 | 420 | 420 | 255 | 280 |
| H (mm) | 127 | 146 | 195 | 205 | 240 | 146 | 195 | 127 | 146 | 170 | 146 | 146 |
| L (mm) | 320 | 385 | 390 | 550 | 600 | 545 | 617 | 365 | 400 | 400 | 320 | 385 |
| Nombre d'éléments dans la chaîne | Varie de 2 à 30 | | | | | | | | | | | |

Les résultats sont mentionnés dans les figures suivantes :

- Condition en temps sec (figure 4.8a),
- Condition en temps de pluie (figure 4.8b).

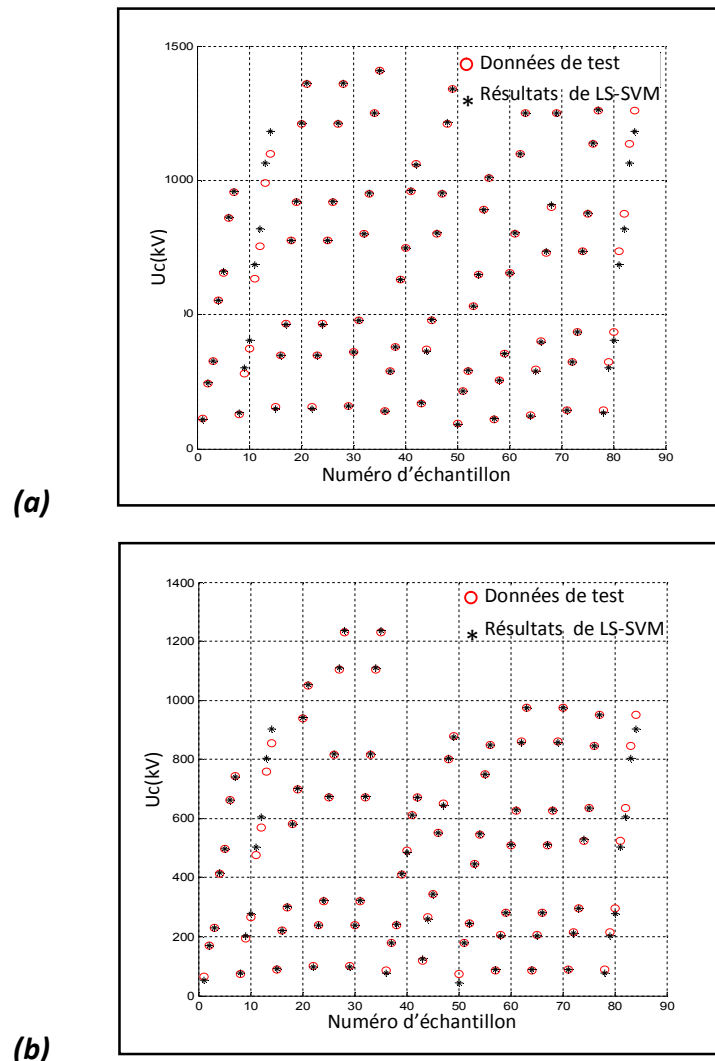


Fig. 4.8 Tension du contournement en fonction des échantillons pour différentes valeurs des éléments de la chaîne d'isolateurs en deux conditions météorologiques

D'après la figure (4.8), on peut constater le suivant :

- La tension de contournement des isolateurs varie proportionnellement avec le nombre d'éléments de la chaîne d'isolateur,
- La tension du contournement est inférieure en temps de pluie à celle en temps sec pour le même échantillon. A titre d'exemple pour l'échantillon N°4 avec le maximum d'éléments, la tension en temps sec est autour de 1400 kV tandis que en temps de pluie est autour de 1200 kV,
- L'exactitude atteinte est de l'ordre de 99.70% pour le test en temps sec et 99.83% en temps de pluie,
- Le rapport entre la tension en temps sec et en temps de pluie est traduit par la formule suivante :

$$\frac{V_{sec}}{V_{pluie}} \approx 1.362 \quad (4.11)$$

4.7. Simulation de la tenue des isolants dans les transformateurs de puissances

On sait que l'efficacité des transformateurs de puissance se diminue après des années d'utilisation. Parmi les éléments essentiels interprétant l'état de ces transformateurs sont les isolants utilisés que se soit liquide (huile) ou solide (carton). Plusieurs facteurs qui peuvent affecter leur bon fonctionnement. Ils existent plusieurs techniques de diagnostic des transformateurs telles que :

- Analyse des gaz dissous (DGA),
- Mesure des composantes furaniques,
- Mesure du degré de polymérisation des isolants.

On collecte des données à partir des gaz dissous dans les huiles des transformateurs et les composantes furaniques émises. On fait un calcul avec des proportions entre ces éléments pour indiquer l'état d'un transformateur quelconque. Plusieurs auteurs [33, 34, 86, 89, 90] ont indiqué l'importance d'étude de ces composantes furaniques.

Dans notre travail, une base de données composée de deux entrées et une sortie a été élaborée. Les entrées sont : les gaz CO et CO₂ (ppm). La sortie représente le furane en sa composante effective qui est 2-Furfural Aldéhyde (2FAL) (ppm). Ces données présentent les mesures effectuées sur 116 transformateurs des puissances (tableau 4.5 [89]) qui varient de 20 à 40MVA [91]. Les données sont réparties en données d'apprentissage et de test selon trois cas. Ces trois cas sont mentionnés dans le tableau (4.6).

Tableau 4.5 Mesures effectuées sur les transformateurs [91]

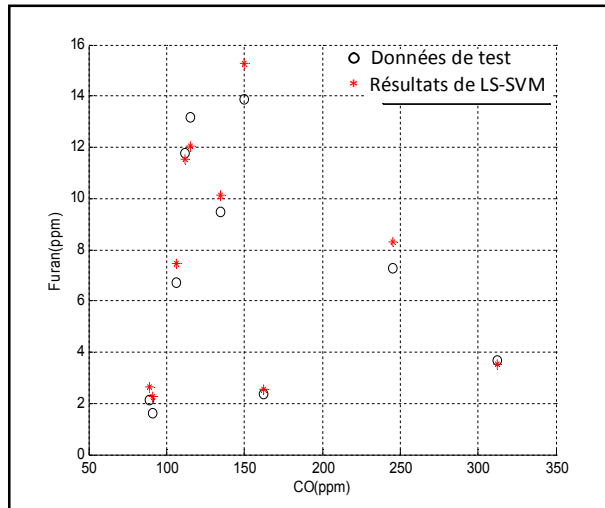
| | Tr1 | Tr5 | Tr12 | Tr21 | Tr32 | Tr49 | Tr72 | Tr96 | Tr106 | Tr116 |
|--------------|------|-------|-------|------|-------|------|------|------|-------|-------|
| CO (ppm) | 96 | 477 | 150 | 172 | 141 | 106 | 389 | 98 | 224 | 1062 |
| CO2 (ppm) | 1383 | 6747 | 3670 | 1578 | 3491 | 1019 | 1936 | 877 | 1368 | 3885 |
| Furane (ppm) | 1.44 | 27.34 | 13.88 | 6.96 | 14.17 | 0.56 | 2.45 | 0.09 | 4.35 | 15.80 |

Tableau 4.6 Nombre de données selon les cas d'étude

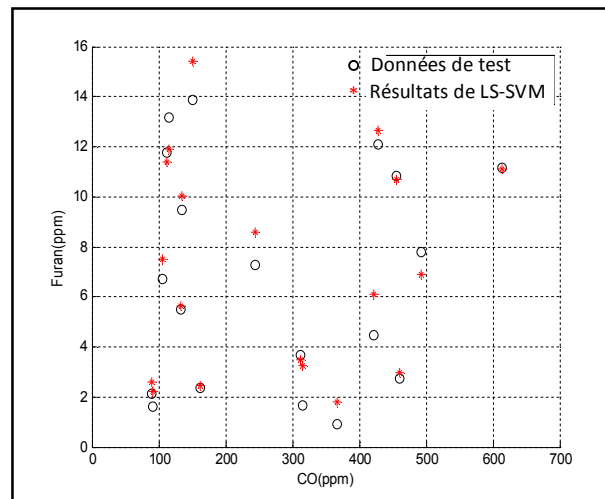
| | Données d'apprentissage | Données de test |
|----------------------|-------------------------|-----------------|
| 1 ^{er} cas | 106 | 10 |
| 2 ^{ème} cas | 96 | 20 |
| 3 ^{ème} cas | 86 | 30 |

Les résultats de simulations sont mentionnés dans la figure (4.11) pour le furane en fonction de la quantité du CO et dans la figure (4.12) pour le furane en fonction de la quantité du CO₂. Les résultats sont présentés selon les cas donnés dans le tableau (4.6) :

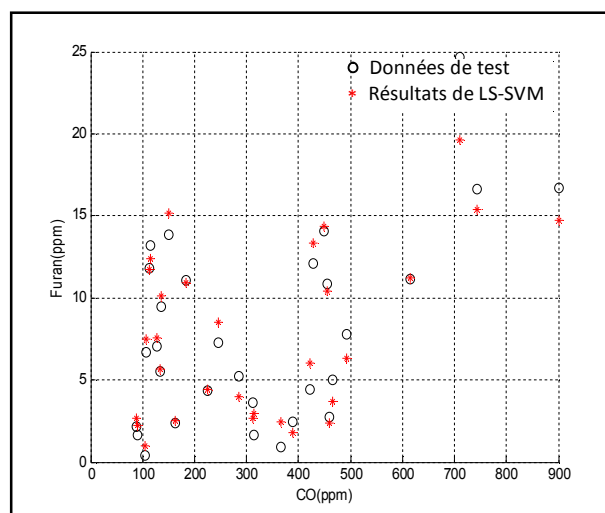
(a. 1^{er} cas, b. 2^{ème} cas, c. 3^{ème} cas)



(a)

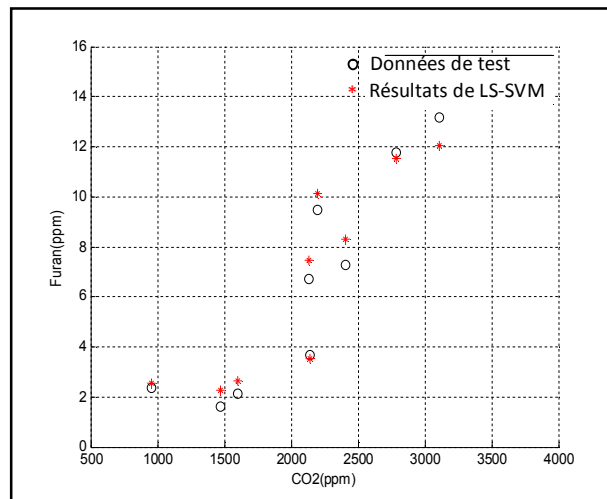


(b)

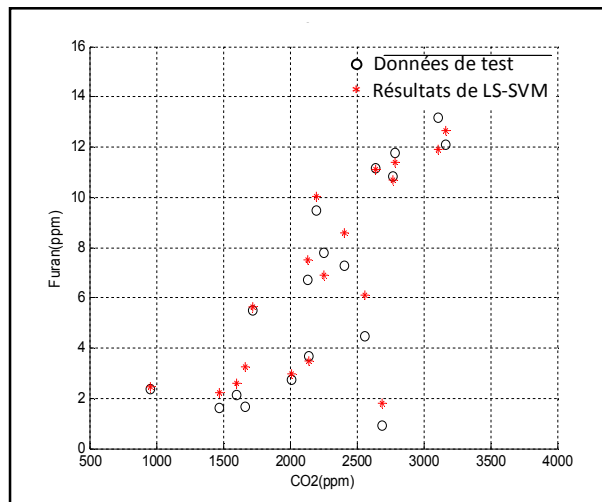


(c)

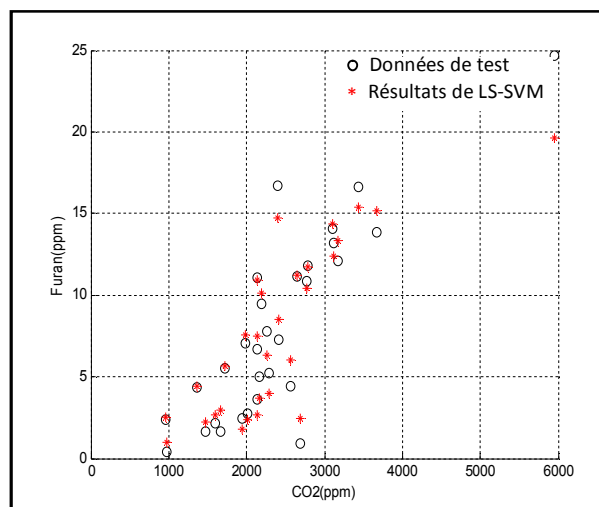
Fig. 4.9 Calcul du furane en fonction de CO [92]



(a)



(b)



(c)

Fig. 4.10 Calcul du furane en fonction de CO₂ [92]

Les résultats mentionnés dans les figures (4.9) et (4.10) montrent clairement une bonne concordance entre les résultats de la méthode LS-SVM et ceux basés sur des tests expérimentaux. Afin de constater cette remarque on donne dans le tableau (4.7) les paramètres d'optimisation des entrées (γ et σ^2) et comme paramètre de sortie le coefficient de détermination R^2 :

Tableau. 4.7 Paramètres et résultats du modèle élaboré pour les transformateurs

| | γ | σ^2 | R^2 (test) % |
|----------------------|----------|------------|----------------|
| 1 ^{er} cas | 11.3137 | 0.1593 | 98.07 |
| 2 ^{ème} cas | 11.3137 | 0.1719 | 96.35 |
| 3 ^{ème} cas | 11.3137 | 0.2285 | 94.74 |

Le tableau (4.7) montre clairement l'efficacité de la méthode LS-SVM interprétée par le coefficient de détermination qui dépasse 94% d'exactitude ce qui est meilleur par rapport à celui trouvé par *Djeridane* [91] ; elle a trouvé une exactitude de 86% en utilisant la méthode des réseaux de neurones artificiels. Dans des futures recherches en ce qui concerne le calcul de furane est d'ajouter un calcul de classification avec le calcul de régression ; ce qui permet de classer l'état des transformateurs puisque le taux de furane admissible ne doit pas dépasser 0.7 ppm.

4.8. Conclusion

Une nouvelle méthode d'apprentissage et de classification LS-SVM a été adaptée et appliquée au problème de performance électrique des systèmes d'isolation. Les résultats obtenus ont démontré la supériorité des SVMs sur les méthodes discriminantes classiques. Sa robustesse vis-à-vis de la dimensionnalité des données et son pouvoir accru de généralisation, font que les SVMs sont nettement plus avantageux. L'avantage principale de cette approche provient du fait qu'il ya peu de paramètres à régler comparativement aux réseaux de neurones et elle est capable d'éviter le problème d'optimum local rencontré dans les algorithmes génétiques. Elle laisse très peu de place aux paramètres utilisateurs, elle est utilisée dans cette recherche afin de prédire l'imminence d'un contournement électrique au niveau des isolateurs pollués et d'estimer la performance des systèmes d'isolation des transformateurs de puissance.

Conclusion Générale

Conclusion Générale

Dans l'optique d'apporter des outils d'aide au diagnostic de la dégradation des systèmes d'isolation des équipements du réseau de transport d'énergie électrique, ce travail nous a permis d'étudier l'impact de la variation des paramètres environnementaux sur la tension de tenue au contournement des isolateurs dans leur environnement naturel et d'évaluer la durée de vie des huiles des transformateurs sous l'influence des émissions furaniques.

La méthode SVM a été adaptée et appliquée au problème de diagnostic de la dégradation des isolants dans les équipements de transport d'énergie électrique. D'après les nombreux travaux présentés dans la thèse, on peut conclure qu'elle présente un avantage remarquable vis-à-vis les méthodes discriminantes classiques. Cette méthode de simulation est flexible en termes d'hybridation avec d'autres algorithmes en ajustant les paramètres d'optimisation. Plusieurs études de cas ont été présentés et peuvent être classés en deux catégories, classification et régression.

L'avantage principale de cette approche provient du fait qu'il ya peu de paramètres à régler comparativement aux réseaux de neurones et elle est capable d'éviter le problème d'optimum local rencontré dans les algorithmes génétiques.

Il est primordial de récolter le plus de données possibles des tests expérimentaux pour construire des bases de données d'apprentissage et de test. D'autre avantage de la méthode SVM en termes des traitements des bases de grandes dimensions, qu'elle peut gérer ces bases de données en faisant apparaitre des relations qu'on peut les appliquer aux autres bases de données. La méthode SVM a donnée des résultats satisfaisants comparativement avec d'autres méthodes de simulation et expérimentaux. Elle nous a permit de juger de la qualité d'un système d'isolation des équipements de transport d'énergie électrique.

Il est montré qu'un tel système intelligent d'alerte permettrait aux équipes d'entretien d'avoir assez de temps pour agir en conséquence et assurer la fiabilité du réseau électrique et une protection des personnes, des équipements et des installations. On aura donc des gains en termes :

- Du temps d'exécution des taches pratiques ou expérimentaux,
- D'intervenir dans des cas qui nécessitent la rapidité tels que le traitement des données dans le domaine informatique,

- Des dépenses à éviter efficacement,
- Bien gérer l'écoulement d'énergie dans les réseaux électriques,
- Prendre des décisions de diagnostic et protection qui peuvent être vitales.

Enfin, il nous semble nécessaire que les remarques que nous avons formulées se traduisent dans les faits par la mise en place de l'approche SVMs dans des futurs travaux dans le domaine des traitements par simulation, en misant en œuvre les possibilités suivantes :

- On peut améliorer la méthode par l'ajustement automatique des paramètres d'optimisation,
- On peut traiter des phénomènes aléatoires et trouver des décisions pertinentes. Comme par exemple le phénomène de la foudre et comment exploiter le maximum de son énergie d'une façon adéquate,
- Des études maintenant se faites et peuvent être aboutir à des résultats extraordinaires afin d'arriver à simuler la pensée humaine.

Références Bibliographiques

Références bibliographiques

- [1] A. Telmatine, *Techniques de la haute tension, université Djillali Liabes, Sidi Bel Abbes, chapitre 6.*
- [2] Paulo Cruz, *Stock photos, ceramic insulators on high tension power lines near a railway, http://www.123rf.com/photo_862276_ceramic-insulators-on-high-tension-power-lines-near-a-railway.html.*
- [3] *Global Insulator Group, Isolateurs pour lignes de transmission et stations de distribution à tension de 0,4 à 1150 KV, Catalogue des produits. 2012.*
- [4] Christophe Perrier, *Etude des huiles et des mélanges à base d'huile minérale pour transformateur de puissance- Recherche d'un mélange optimal, thèse de doctorat, l'école doctorale Electronique, Electrotechnique, automatique de Lyon, 2005.*
- [5] Dr. Maik Koch, *Stock photos, http://fr.wikipedia.org/wiki/Transformateur_de_puissance 03/2009.*
- [6] *Terminale STI Electrotechnique, Rapport Visite RTE GET Savoie électricité, 02/2011.*
- [7] *Manitoba Hydro, Stock photos, http://www.hydro.mb.ca/projects/system_renewal.*
- [8] *Walter Dvorak, stock photos, http://en.wikipedia.org/wiki/High-voltage_cable, 05/2010.*
- [9] *(Henan Jiapu Cable Group, Stock photos, [.http://jpcable99.en.made-in-china.com](http://jpcable99.en.made-in-china.com).*
- [10] *Stephan Pietzko, stock photos, <http://www.dreamstime.com/stock-image-high-voltage-circuit-breaker-image20079461>.*
- [11] *Roger Bruce, stock photos, <http://www.dreamstime.com/royalty-free-stock-image-electrical-substation-breaker-image685846>.*
- [12] *Robert Fournié, les isolants en électrotechnique, Edition Eyrolles, 1990, chapitre1.*
- [13] *Robert Fournié, les isolants en électrotechnique, Edition Eyrolles, 1990, chapitre2.*
- [14] *P. Robert, Matériaux de l'électrotechnique, Traité d'électricité, Edition Dunod 1979, Chapitre 4, pp : 259-261.*
- [15] *P. Robert, Matériaux de l'électrotechnique, Traité d'électricité, Edition Dunod 1979, Chapitre 4, pp : 261-262.*
- [16] *Boubakeur ZEGNINI, Etude du phénomène de contournement des surfaces contaminées sous tension alternative : application a l'étude de la tenue des isolateurs HT dans leur environnement naturel, thèse de doctorat, USTO, 13 Mars 2007.*
- [17] *Georges Le Roy, Claude Gary, Bernard Hutzler, Jaques Lalot, Chritian Dubanton, Les propriétés diélectriques de l'air et les très hautes tensions, Edition Eyrolles 1984, troisième partie.*
- [18] *Sohrab BARAHMAND, Tension minimale de contournement des isolateurs givres en régime de*

- fonte, *Mémoire pour la maîtrise en sciences appliquées, université du Québec à Chicoutimi, 1985.*
- [19] Marc-Andre DALLAIRE, *Contournement en courant continu et alternatif des isolateurs givres, pré-contaminés ou Propres, Mémoire pour la maîtrise en sciences appliquées, Université De Québec à Chicoutimi, 1992.*
- [20] RABAH CHAARANI, *Détermination de la tension de tenue maximale des isolateurs composites en EPDM, Mémoire pour la maîtrise en ingénierie, université du Québec, 1996.*
- [21] Tatiana Guerrero OLIVERA, *Etude expérimentale du contournement des isolateurs recouverts de Glace sous tensions de Foudre et de manœuvre, Mémoire pour la maîtrise en ingénierie, Université du Québec, 2004.*
- [22] M. Farzaneh I. Fofana, *Study of Insulator Flashovers caused by Atmospheric Ice Accumulation, Journal of Iranian Association of Electrical and Electronics Engineers, Vol.1, No.1, Spring 2004.*
- [23] A. Nekahi, M. Farzaneh, *A Study of the Emission Spectra from discharges on an Ice surface, IEEE, 2012, pp: 807-810.*
- [24] Md. Abdus Salam, Hemen Goswami, Zia Nadir, *Determination of equivalent salt deposit density Using wind velocity for a contaminated insulator, Journal of Electrostatic, Elsevier, 63 (2005), pp: 37-44.*
- [25] F. Mauseth, H. L. Halvorson, S. Hvidsten, *Diagnostic Testing of Thermally Aged Medium Voltage XLPE Cable Joints, IEEE, 2012, pp: 823-826.*
- [26] T. Seghier, F. Benabed, I. Fofana, *Influence of Ageing onto the Dielectric Response in Frequency Domain of Oil Impregnated Paper Insulation Used in Power Transformers, 9^{ème} Conférence Nationale sur la Haute Tension (CNHT-AJOT), 2013, Laghouat, Algérie, pp: 81-86.*
- [27] Xingliang Jiang, Bingbing Dong, Qin Hu, Fanghui Yin, Ze Xiang, Lichun Shu, *Effect of Ultrasonic Fog on AC Flashover Voltage of Polluted Porcelain and Glass Insulators, IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation Vol. 20, No. 2; April 2013, pp: 429-434*
- [28] S.V. Nikolajevic , R. Drca, *Effect of water on aging of XLPE cable insulation, Electric Power Systems Research 60, Elsevier, 2001, pp: 9-15*
- [29] RABAH CHAARANI, *étude de l'influence des caractéristiques des isolateurs sur leurs performances électriques dans des conditions de givrage, Doctorat en ingénierie, Université du QUEBEC, 2003.*
- [30] Mohammed El-Amine SLAMA, Abderrahmane BEROUAL, Hocine HADI, *Etude de la Dynamique des Décharges sur des Isolateurs HT avec Dépôts de Pollution Continus et Discontinus, 9^{ème} Conférence Nationale sur la Haute Tension (CNHT)- Algerian Journal of Technology AJOT, 9-11 Avril 2013, Laghouat, Algérie, pp: 42-47.*
- [31] Petri Hyvönen, *Prediction of insulation degradation of distribution power cables based on chemical analysis and electrical measurements, thèse de doctorat, université de Technologie d'Helsinki, 2008.*
- [32] Naouel MEZARI, *Diagnostic des transformateurs de puissances, Mémoire de Magister, Université Mouloud Mammeri De Tizi-Ouzou. 2011.*
- [33] Dijana Vrsaljko, Veronika Haramija, Anđela Hadži-Skerlev, *Determination of phenol, m-cresol and o-cresol in transformer oil by HPLC method, Electric Power Systems Research 93, Elsevier, 2012, pp:*

24– 31.

- [34] Michel Duval, *A Review of Faults Detectable by Gas-in-Oil Analysis in Transformers*, feature article, *IEEE*, 2002, pp: 8-17.
- [35] Saliha BOUDRAA, *Analyse des gaz dissous dans les huiles des transformateurs en utilisant les techniques de l'intelligence artificielle, mémoire de magister, Université de Batna*, 2005.
- [36] Shigemasa ENOMOTO, Kuniaki NISHIOKA, Yoshio HIGASHIYAMA, Atsushi SASAKI, *Measurement of Salt Surface Density on Polluted Insulators Using a Simple x-Ray Fluorescence Technique*, *Appl. Radiat. Isot.*, Vol. 43, No 5, 1992, pp : 615-620.
- [37] Tarso V. Ferreira, André D. Germano, Edson Guedes da Costa, *Ultrasound and Artificial Intelligence Applied to the Pollution Estimation in Insulations*, *IEEE*, VOL. 27, NO. 2, 2012, pp: 583-589.
- [38] Walter S. Zaengl, *Dielectric Spectroscopy in Time and Frequency Domain for HV Power Equipment, Part I: Theoretical Considerations*, feature article, *IEEE*, Vol. 19, No.5, 2003, pp: 5-19.
- [39] Walter S. Zaengl, *Applications of Dielectric Spectroscopy in Time and Frequency Domain for HV Power Equipment*, *IEEE*, Vol. 19, No. 6, 2003, pp: 9-22.
- [40] Raj B. Jadav, Tapan K. Saha, Chandima Ekanayake, *Multifractal Analysis on Polarisation and Depolarisation current of the Transformer Insulation*, pp: 1-6.
- [41] I. Fofana, H. Hemmatjou, M. Farzaneh, *Low temperature and moisture effects on polarization and depolarization currents of oil-paper insulation*, *Electric Power Systems Research 80*, Elsevier, 2010, pp: 91–97.
- [42] T. Seghir, D. Mahi, A. Nouar, K. Lefkaier, *The effect of temperature and the mutual influence between two cavities on the appearance of partial discharges in gaseous cavities contained in the insulator of high voltage*, 5^{ème} Conférence Nationale sur la Haute Tension (CNHT), 2003, Oran, Algérie, pp: 163-167.
- [43] Marina A. Tsili, Eleftherios I. Amoiralis, Antonios G. Kladas, Athanassios T. Souflaris, *Power transformer thermal analysis by using an advanced coupled 3D heat transfer and fluid flow FEM model*, *International Journal of Thermal Sciences 53*, Elsevier, 2012, pp: 188-201.
- [44] Muhsin Tunay Gencüglu, Mehmet Cebeci, *The pollution flashover on high voltage insulators*, *Electric Power Systems Research 78*, Elsevier, 2008, pp: 1914–1921.
- [45] G.E. Asimakopoulou, V.T. Kontargyri, G.J. Tsekouras, Ch. N. Elias, F.E. Asimakopoulou, I.A. Stathopoulos, *A fuzzy logic optimization methodology for the estimation of the critical flashover voltage on insulators*, *Electric Power Systems Research 81*, Elsevier, 2011, pp: 580–588.
- [46] Sanjeeb Mohanty *, Saradindu Ghosh, *Modeling of breakdown voltage of White Minilex Paper in the presence of voids under ac and dc conditions using fuzzy logic techniques*, *Electrical Power and Energy Systems 32*, Elsevier, 2010, pp: 518–523.
- [47] James Kennedy, Russell Eberhart, *Particle Swarm Optimization*, *IEEE*, 1995, pp: 1942-1948.

- [48] Ching-Jung Ting, Kun-Chih Wu, Hao Chou, *Particle swarm optimization algorithm for the berth allocation problem*, *Expert Systems with Applications* 41, Elsevier, 2014, pp:1543–1550.
- [49] Nasir A. Al-geelania,, M. Afendi M. Piaha,, Zuraimy Adzisa, Munir A. Algeelanib, *Hybrid regrouping PSO based wavelet neural networks for characterization of acoustic signals due to surface discharge on H.V. glass insulators*, *Applied Soft Computing* 13, Elsevier, 2013, pp: 4622–4632.
- [50] Ra´ul Rojas, *Neural Networks-A Systematic Introduction*, Edition Springer-Verlag, Berlin, 1996.
- [51] Mark K Cowan, *Machine Learning*, book based on on-line free cours of creativecommons.org, 2013.
- [52] V.T. Kontargyri , A.A. Gialketsi, G.J. Tsekouras, I.F. Gonos, I.A. Stathopoulos, *Design of an artificial neural network for the estimation of the flashover voltage on insulators*, *Electric Power Systems Research* 77, Elsevier, 2007, pp: 1532–1540.
- [53] Lahcene BOUCHAOUI, *Diagnostic des transformateurs de puissance par la méthode d'analyse des gas dissous: application des réseaux de neurones, mémoire de magister*, Université Ferhat Abbas – Setif, 2010.
- [54] Nasser N. Qaddoumi, Ayman H. El-Hag, Yasser Saker, *Outdoor Insulators Testing Using Artificial Neural Network-Based Near-Field Microwave Technique*, *IEEE Transactions on instrumentation and Measurement*, VOL. 63, NO. 2, February 2014.
- [55] Wei Cai, Heming Deng, Guohua zhou, Jian Wang, Fan Yang, *Online Measurement of Equivalent Salt Deposit Density by Using Optical Technology*, *IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation* Vol. 20, No. 2, 2013, pp:409-413.
- [56] Johnny Wardman, Thomas Wilson, Pat Bodger, *Volcanic Ash Contamination: Limitations of the Standard ESDD Method for Classifying Pollution Severity*, *IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation* Vol. 20, No. 2, 2013, pp:414-420
- [57] Tarso V. Ferreira, André D. Germano, Edson Guedes da Costa, *Ultrasound and Artificial Intelligence Applied to the Pollution Estimation in Insulations*, *IEEE Transactions on power delivery*, Vol. 27, No. 2, 2012, pp: 583-589.
- [58] Xiang Zhang, Ernst Gockenbach, Zhaolin Liu, Haibo Chen, Linghui Yang, *Reliability estimation of high voltage SF6 circuit breakers by statistical analysis on the basis of the field data*, *Electric Power Systems Research* 103, Elsevier, 2013, pp: 105– 113.
- [59] Bernhard Schölkopf, Alexander J. Smola, *Learning With Kernels: Support Vector Machines, Regularization, Optimization and Beyond*, 2002, MIT Press.
- [60] Marref Nadia, *Apprentissage Incrémental & Machines à Vecteurs Supports, mémoire de magister*, Université HADJ LAKHDAR – BATNA, 2013.
- [61] Steve R. Gunn, *Support Vector Machines for Classification and Regression*, Technical Report, UNIVERSITY OF SOUTHAMPTON, 1998.
- [62] Vladimir N. Vapnik, *An Overview of Statistical Learning Theory*, *IEEE Transactions on Neural*

- Networks*, Vol. 10, No. 5, 1999, pp: 988-999.
- [63] A. Cornuéjols, L. Miclet, Y. Kodratoff, *Apprentissage artificiel*, Eyrolles, 2002.
- [64] Abdelhamid DJEFFAL, *Utilisation des méthodes Support Vectors Machines (SVM) dans l'analyse des bases de données*, thèse de doctorat, Université Mohamed Khider – Biskra, 2012.
- [65] Xiaoyi Xu, Ya Zhang, Liang Zou, Minghui Wang, Ao Li, *A Gene Signature for Breast Cancer Prognosis Using Support Vector Machine*, 5th International Conference on Biomedical Engineering and Informatics (BMEI), IEEE, 2012, pp: 928-931.
- [66] Shibiao Wan, Man-Wai Mak, Sun-Yuan Kung, *Protein subcellular localization prediction based on gene ontology annotation and SVM*, IEEE GOASVM, 2012, pp: 2229-2232.
- [67] Ali El Akadi, *Contribution à la sélection des variables pertinentes en classification supervisée : application à la sélection des gènes pour les puces à ADN et des caractéristiques faciales*, thèse de doctorat, Université MOHAMMED V – AGDAL Rabat-Maroc, 2012.
- [68] Rajesh Kumar Tripathy, Ashutosh Achrya, Sudeep Behera, *Least Square Support Vector Machine an Alternative to Artificial Neural Network for the Analysis of Lipase Catalyzed Synthesis of Sugar Alcohol Ester*, IOSR Journal of Pharmacy and Biological Sciences (IOSRJPBS), Volume 1, Issue 3, 2012, pp: 01-08.
- [69] Muamer N. Mohammed, Norrozila Sulaiman, *Intrusion detection system based on SVM for WLAN*, Procedia Technology 1, Elsevier, 2012, pp: 313 – 317.
- [70] Harris Drucker, Donghui Wu, Vladimir N. Vapnik, *Support Vector Machines for Spam Categorization*, IEEE Transactions on neural networks, VOL. 10, NO. 5, 1999, pp: 1048-1054
- [71] Sheng Lu, Zhong-jian Cai, Xiao-bin Zhang, *Application of GA-SVM Time Series Prediction in Tax Forecasting*, IEEE, 2009, pp: 34-36.
- [72] EL ASLI, Neila, *Approche hybride basée sur les machines à vecteurs de support et les algorithmes génétiques pour l'estimation des coûts de fabrication, mémoire pour la maîtrise en génie de la production automatisée*, université du Québec, 2008.
- [73] Xi-Mei Liu, Wan-Yun Wei, Fei Yu, *SVM Theory and Its Application in Fault Diagnosis of HVDC System*, Third International Conference on Natural Computation (ICNC), IEEE, 2007.
- [74] Okan Ozgonenel, Turgay Yalcin, Irfan Guney, Unal Kurt, *A new classification for power quality events in distribution systems*, Electric Power Systems Research 95, Elsevier, 2013, pp: 192– 199.
- [75] Dongfeng Shi, Nabil N. Gindy, *Tool wear predictive model based on least squares support vector machines*, Mechanical Systems and Signal Processing 21, Elsevier, 2007, pp: 1799–1814.
- [76] Betul Bektas Ekici, *A least squares support vector machine model for prediction of the next day solar insolation for effective use of PV systems*, Measurement 50, Elsevier, 2014, pp: 255–262.
- [77] Muhsin Tunay Gencoglu, Murat Uyar, *Prediction of flashover voltage of insulators using least squares support vector machines*, Expert Systems with Applications 36, Elsevier, 2009,

pp:10789–10798.

- [78] Velaga Sreerama Murthy, K.Tarakanath, D. K. Mohanta, Sumit Gupta, *Insulator Condition Analysis for Overhead Distribution Lines Using Combined Wavelet Support Vector Machine (SVM)*, *IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation* Vol. 17, No. 1, IEEE, 2010, pp: 89-99.
- [79] OBENHAUS, F, *Fremdschichtueberschlag 1 und Kriechweglaenge, coefficient e and the diameter Dm* *Deutsche Elektrotechnik*, 1958,4, pp. 135-137
- [80] M Belkheiri, B Zegnini, D Mahi *Modeling the Critical Flashover Voltage of High Voltage Insulators Using Artificial Intelligence*, *Journal of Intelligent Computing and Applications (JICA) 2 (2)*, pp: 137-154
- [81] B Zegnini, M Belkheiri, D Mahi *Modeling flashover voltage (FOV) of polluted HV insulators using artificial neural networks (ANNs)*, *Electrical and Electronics Engineering, 2009. ELECO 2009*, pp: 336-340
- [82] B. Zegnini, A.H. Mahdjoubi, M. Belkheiri, *A Least Squares Support Vector Machines (LS-SVM) Approach for Predicting Critical Flashover Voltage of Polluted Insulators*, *Electrical Insulation and Dielectric Phenomena , CEIDP , Cacun-Mexico 2011*, pp: 403-406.
- [83] Abdelhalim Mahdjoubi, Boubakeur Zegnini, Mohammed Belkheiri, *A LS-SVM (Least Squares Support Vector Machines) Approach for Predicting Critical Flashover Voltage of Polluted Insulators*, *Journal of Energy and Power Engineering 7 (JEPE),USA, 2013*, pp: 355-360.
- [84] M. Belkheiri, B. Zegnini, A.H. Mahdjoubi, *Prediction of Equivalent Salt Deposit Density of Polluted Insulators Surface Using A Least Squares Support Vector Machines Regression Method*, *Deuxième Conférence Internationale sur la Maintenance, la Gestion, la Logistique et l'Electrotechnique, 2^{ème} CIMGLE'2012, ENSET Oran-Algérie, 2012* .
- [85] M.A. Salam, S.M. Al-Alawi , A.A. Maqrashi, *Prediction of equivalent salt deposit density of contaminated glass plates using artificial neural networks*, *Journal of Electrostatics 66, Elsevier, 2008*, pp: 526–530.
- [86] AH. Mahdjoubi, B. Zegnini, M. Belkheiri, *Kernels functions for Squares Support Vector Machines (LS-SVM) to diagnose HV polluted insulator*, *9^{ème} Conférence Nationale sur la Haute Tension (CNHT-AJOT), Laghouat- Algérie, 2013*, pp: 269-273.
- [87] Osama E. Gouda, Adel Z. El Dein, *Simulation of overhead transmission line insulators under desert environments*, *IET Generation, Transmission and Distribution, Vol. 7, Iss. 1, 2013*, pp. 9–13.
- [88] Refat Atef Ghunem, Ayman H. El- Hag, Khaled Assaleh , *prediction of furan content in transformer oil using Artificial Neural Networks (ANN)*, *International symposium on electrical insulation (ISEI), IEEE, 2010*, pp:1-4.
- [89] A.M.Emsley,X.Xiao, R.J.Heywood and M.Ali, *Degradation of cellulosic insulation in power transformers. Part 2: Formation of furan products in insulating oil*, *IEE Proc.-Sci. Meas. Techno, Vol 147, No. 3, 2000*, pp: 110-114.

- [90] A. Abu-Siada, Sin P. Lai, Syed M. Islam, *A Novel Fuzzy-Logic Approach for Furan Estimation in Transformer Oil*, *IEEE Tans. on power delivery*, vol. 27, no. 2, 2012, pp: 469-474.
- [91] Kheira Djeridane, *Contribution à la recherché des traceurs spécifiques à la dégradation du papier dans les transformateurs de puissance, mémoire de Master, Université Amar TELIDJI-Laghouat, Juin 2012.*
- [92] AH. Mahdjoubi, B. Zegnini, M. Belkheiri, *A new approach using Least Squares Support Vector Machines (LS-SVM) to predict Furan in power transformers*, *PRZEGLĄD ELEKTROTECHNICZNY, Pologne, 2014, pp: 142-145.*