

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE
MINISTERE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR ET DE LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE
UNIVERSITE MOHAMED BOUDIAF - M'SILA

FACULTE DE TECHNOLOGIE
DEPARTEMENT DE GENIE ELECTRIQUE
N° : RES-05



DOMAINE : SCIENCES ET TECHNOLOGIES
FILIERE : ELECTROTECHNIQUE
OPTION : RESEAUX ELECTRIQUES

Mémoire présenté pour l'obtention
Du diplôme de Master Académique

Par: HADDAD Salah Eddine & AZEDDINE Mohamed Elfateh

Intitulé

Estimation de la tension de contournement
d'un isolateur capot et tige de haute tension
artificiellement pollué en utilisant la logique
floue

Soutenu devant le jury composé de :

| | | |
|-----------------------|-------------------------------------|------------|
| Dr. ZEMMIT Abderrahim | Université Mohamed Boudiaf - M'sila | Président |
| Dr. Hani BENGUESMIA | Université Mohamed Boudiaf - M'sila | Rapporteur |
| Dr. BELHITECHE Elhadi | Université Mohamed Boudiaf - M'sila | Examineur |

Année universitaire : 2018 / 2019

Résume

L'objectif de notre travail est de l'estimation de la tension de contournement d'un isolateur de hautetension largement utilisé par SONALGAZ artificiellement polluée. En utilisant l'un des meilleures méthodes de l'intelligence artificielle qui est la logique floue sous MATLAB. Cette technique devra tenir compte de la variation de la conductivité ainsi le niveau de pollution. Les résultats obtenus montre que cette méthode a été appliquée avec succès. Il y a un bon accord entre les resultésestimées et les résultats expérimentaux.

Mots clés:isolateur HT, contournement, pollution, logique floue, zone de pollution, niveau de pollution estimation, la tension , conductivité.

ملخص

الهدف من دراستنا هذه هو التنبؤ بتوتر الاحاطة لعازل التوتر العالي تحت تاثير تلوث مصطنع حيث ان النموذج خاضع لتاثير كل من مستوى التلوث و ايضا ناقلية . و قاعدة البيانات التي نعتمد عليها لتصميم الخوارزمية الضبابية وتطبيقها هي النتائج التجريبية المحققة في مخبر التوتر العالي . و الهدف من التجارب هو قياس توتر الاحاطة للعازل تحت تاثير العوائق المذكورة سابقا

الكلمات المفتاحية : عازل التوتر العالي, الاحاطة, تلوث العوازل, المنطق الضبابي,التنبؤ, ناقلية التلوث, منطقة التلوث, التوتر.

Remerciements

En premier lieu, nous remercions ALLAH, qui nous a donné le courage, la force et la volonté pour réaliser ce modeste travail.

Ce travail a été réalisé grâce à le département de génie électrique de l'université de M'SILA.

Nos sincères et chaleureux remerciement à Dr. H. BENGUESMIA, pour son dévouement exceptionnel, sa précieuse directive, son suivi constant, son aide, ses appuis moraux, et ses qualités humaines.

Nous tenons également à remercier le président et les membres du jury pour nous avoir fait l'honneur d'évaluer notre travail.

Nous tenons à remercier nos parents car ce travail représente un petit fruit de leur souffrance et qui sans eux nous ne pouvons traverser ces longues années d'études et de travail.

J'adresse mes vifs remerciements à tous les professeurs ayant contribué à notre formation trouvent ici notre profonde reconnaissance.

Enfin, nous remercions tous ce qui ont contribué de près ou de loin à l'élaboration de ce travail.

اهداء

الحمد لله الذي وفقنا لهذا ولم نكن لنصل لولا عطاءه وفضله علينا

إلى من بلغ الرسالة وأدى الأمانة إلى نبي الرحمة ونور العالمين سيدنا
محمد صل الله عليه وسلم

إلى من احمل اسمه بكل إفتخار... إلى من كلت انامله ليقدّم لنا لحظة سعادة
... إلى من حصد الاشواك عن دربي ليمهد لي طريق العلم... إلى القلب
الكبير (والدي العزيز)

إلى من ارضعتني الحب والحنان إلى رمز الحب وبلسم الشفاء إلى القلب
الناصع بالبياض (والدتي العزيزة)

إلى من هما احن علي من ابي... إلى جدي وجدتي

إلى القلوب الطاهرة الرقيقة والنفوس البريئة إلى رياحين حياتي اختاي
الحبيبتان

إلى كل العائلة الكريمة اعماما واخوالا

إلى الام الثانية معلمتي ومربيّتي الباهي السعدية

إلى من ساعدني في هذه المذكرة الى مهني حمزة المرتضى

إلى أحبائي وأهل ودادي إلى من ضاقت السطور من ذكرهم فوسعهم قلبي
إلى أصدقائي وصديقاتي

صلاح الدين حاداد

إهداء

بِسْمِ اللَّهِ الرَّحْمَنِ الرَّحِيمِ
وَأُصَلِّي وَأَسْلَمُ عَلَى مَنْ أَرْسَلَهُ اللَّهُ رَحْمَةً
لِلْعَالَمِينَ سَيِّدِنَا مُحَمَّدٍ صَلَّى اللَّهُ عَلَيْهِ
وَسَلَّمَ وَعَلَى آلِهِ وَصَحْبِهِ وَسَلَّمَ تَسْلِيمًا أَمَا
بَعْدُ فَإِنَّهُ لَمْ يَشْكُرِ اللَّهُ مِنْ لَمْ يَشْكُرِ النَّاسَ
فَإِنِّي أَحْمَدُ اللَّهَ الَّذِي وَفَّقَنَا لِهَذَا الْعَمَلِ
وَأَهْدِيهِ إِلَى

أَهْلِي وَأَسَاتِذَتِي وَأَصْدِقَائِي وَأَشْكُرُ كُلَّ مَنْ
سَاهَمَ وَسَاعَدَنِي فِي مَشْوَارِي الدِّرَاسِي.

عز الدين محمد الفاتح

Liste Des Figures

Liste des figures

Chapitre I

| N° | Isolateur De Haute Tension Et Phénomènes De Pollution | Page |
|-------------|--|-------------|
| Figure I.01 | Isolateur de haute tension (capot et tige) | 4 |
| Figure I.02 | Isolateur en céramique | 5 |
| Figure I.03 | Verre recuit | 5 |
| Figure I.04 | Verre trempé | 6 |
| Figure I.05 | Isolateurs en matériaux synthétiques | 7 |
| Figure I.06 | Matériau synthétique(composite)Un exemple de multicouche | 7 |
| Figure I.07 | Vue en coupe d'un isolateur rigide en verre. | 8 |
| Figure I.08 | Isolateur capot et tige | 8 |
| Figure I.09 | Différents profils des isolateurs à capot et tige | 9 |
| Figure I.10 | Isolateur a log fut | 10 |
| Figure I.11 | Sources de pollution | 12 |
| Figure I.12 | Etape de counterement | 14 |
| Figure I.13 | Dépôt et évolution de l'agent polluant | 15 |
| Figure I.14 | Humidification du dépôt polluant et création d'un courant de fuite | 15 |
| Figure I.15 | Arc et bande sèche | 16 |
| Figure I.16 | Régime d'arcs sous pollution | 16 |

| Chapitre II | | |
|--------------------|---|-------------|
| N° | Généralités Sur La Logique Floue | Page |
| Figure II.01 | Variable linguistique « par exemple la description de la qualité du service | 22 |
| Figure II.02 | Fonction caractéristique | 23 |
| Figure II.03 | Fonction d'appartenance | 23 |
| Figure II.04 | Fonction d'appartenance, variables et termes linguistiques | 24 |
| Figure II.05 | Fonctions d'appartenance linéaires par morceaux | 24 |
| Figure II.06 | Les différentes formes des fonctions d'appartenances | 25 |
| Figure II.07 | Les différents opérateurs de la logique floue | 26 |
| Figure II.08 | Les étapes de la mécanisme d'inférence comprend | 28 |
| Figure II.09 | Degré d'activation | 29 |
| Figure II.10 | Implication | 29 |
| Figure II.11 | Défuzzification par centre de gravité | 31 |
| Figure II.12 | Méthode d'inférence Somme-produit | 33 |
| Figure II.13 | Méthode d'inférence Max Min et Max prod | 35 |
| Figure II.14 | Schéma général d'un système flou | 36 |

| Chapitre III | | |
|---------------------|---|-------------|
| N° | Estimation De La Tension De Contournement En Utilisant La Logique Floue (LF) | Page |
| Figure III.01 | Modèle réel de l'isolateur 1512L, plein pollution | 37 |
| Figure III.02 | Architecture d'un système d'inférence floue(SIF) | 38 |
| Figure III.03 | Fonction d'appartenance de la conductivité | 40 |
| Figure III.04 | Fonction d'appartenance de zone 1 | 41 |
| Figure III.05 | Fonction d'appartenance de zone 2 | 41 |
| Figure III.06 | Fonction d'appartenance de zone 3 | 41 |
| Figure III.07 | Fonction d'appartenance de zone 4 | 41 |
| Figure III.08 | Fonction d'appartenance de la sortie | 42 |
| Figure III.09 | Fenêtre principale de l'éditeur du système d'inférence flou « Fis Editor » | 46 |
| Figure III.10 | Ensembles flous des entrées et de la sortie du SIF utilisé introduits par l'éditeur de fonctions d'appartenances du l'interface graphique (FIS) avant et après ajustement | 48 |
| Figure III.11 | Fenêtre de l'éditeur de base de règles floues | 49 |
| Figure III.12 | Fenêtre de visualisation des règles floues. Exemple d'entrées (a) et après (b) l'adaptation des fonctions d'appartenance des variables | 50 |
| Figure III.13 | Courbes de regression | 52 |

List des tableaux

List des tableaux

| N° | Chapitre I | page |
|-------------|--|-------------|
| Tableau I.1 | Classement de degré de pollution selon CEI 815 | 17 |

| N° | Chapitre III Estimation De La Tension De Contournement En Utilisant La Logique Floue (LF) | Page |
|---------------|--|-------------|
| Tableau III.1 | Variables d'entrées et sorties | 39 |
| Tableau III.2 | Décomposition de la variable d'entrées et de sortie | 40 |
| Tableau III.3 | Matrice d'inférence | 44 |

Sommaire

Sommaire

| | |
|--|-----------|
| Liste des figures | II |
| Liste des tableaux | V |
| Sommaire | VI |
| Introduction Generale | 1 |
| Chapitre I : Isolateur De Haute Tension Et Phénomène De Pollution | |
| I.1. Introduction | 3 |
| I.2. Les isolateurs de haute tension | 3 |
| I.2.1. Rôle d'un isolateur de haute tension | 3 |
| I.2.2. Fonctionnement et constitution d'un isolateur | 3 |
| I.2.3. Matériaux isolants utilisés pour la fabrication des isolateurs | 4 |
| I.2.3.1. Céramique | 5 |
| I.2.3.2. Verres | 5 |
| a. Verre recuit | 5 |
| b. Verre trempé | 6 |
| I.2.3.3. Matériaux synthétiques | 6 |
| I.3. Types d'isolateurs | 7 |
| I.3.1. Isolateur de type rigide | 7 |
| I.3.2. Isolateurs suspendus ou éléments de chaîne | 8 |
| I.3.2.1. Isolateur capot et tige | 8 |
| I.3.2.2. Isolateur à long fût | 9 |
| I.4. Choix des isolateurs | 10 |
| I.5. Phénomène de Pollution | 10 |
| I.5.1. Quelques définitions | 11 |
| I.5.1.1. Contournement | 11 |

| | |
|--|----|
| I.5.1.2. Ligne de contournement | 11 |
| I.5.1.3. Tension de contournement | 11 |
| I.5.1.4. Tension de tenue | 11 |
| I.5.1.5. Ligne de fuite | 11 |
| I.5.1.6. Courant de fuite | 11 |
| I.5.2. Formation des couches polluantes sur les isolateurs | 12 |
| I.5.3. Sources de pollution | 12 |
| I.5.3.1. Pollution naturelle | 12 |
| I.5.3.2. Pollution marine | 13 |
| I.5.3.3. Pollution désertique | 13 |
| I.5.3.4. Pollution industrielle | 13 |
| I.5.3.5. Pollution mixte | 13 |
| I.6. conséquences de la pollution | 13 |
| I.6.1. Arc non localise | 14 |
| I.6.2. Arc permanent (fixe) | 14 |
| I.6.3. Contournement des isolateurs pollués | 14 |
| I.6.4. Déroulement du contournement | 15 |
| I.7. l'influence de la pollution sur les isolateurs de HT | 16 |
| I.8. Sévérité de pollution d'un site | 17 |
| I.9. Technique de lutte contre la pollution | 18 |
| I.9.1. Allongement de la ligne de fuite | 18 |
| I.9.2. Isolateurs plats (auto-nettoyables) | 19 |
| I.9.3. Graissage périodique (couche hydrophobes) | 19 |
| I.9.4. Revêtement a base des silicones | 19 |
| I.9.5. Les isolateurs composites | 19 |
| I.9.6. Nettoyages sous ou hors tension | 19 |
| I.10. Conclusion | 20 |

| Chapitre II : Généralités Sur La LogiqueFloue | Page |
|--|-------------|
| II.1 Introduction | 21 |
| II.2 Historique de la logique floue | 21 |
| II.3 Théorie des ensembles flous | 22 |
| II.3.1 Notion d'appartenance partielle | 22 |
| II.3.2 Les variables linguistiques | 22 |
| II.3.3. Fonction d'appartenance | 23 |
| II.3.4 Opérateurs logiques flous | 25 |
| II.3.5 Règles linguistique | 26 |
| II.3.6 Mécanisme d'inférence flou | 27 |
| II.3.6.1 Principe | 27 |
| II.3.6.2 Fuzzification | 28 |
| II.3.6.3 Degré d'activation | 28 |
| II.3.6.4 Implication | 29 |
| II.3.6.5 Agrégation des règles | 29 |
| II.3.6.6 Défuzzification | 30 |
| a - Technique du maximum | 30 |
| b - Technique de la moyenne pondérée | 30 |
| c - Technique du centre de gravité | 30 |
| II.4 Méthodes d'inférences floues | 31 |
| II.4.1 Méthode de somme produit | 32 |
| II.4.2 Méthode Min-Max | 33 |
| II.4.3 Méthode Max-prod | 34 |
| II.5 Structure générale d'un système flou | 35 |
| II.6. Conclusion | 36 |

| | |
|--|-----------|
| III.1. Introduction | 37 |
| III.2. Présentation du model 1512L | 37 |
| III.3. Prediction de la tension de contournement par la logique floue | 38 |
| III.3.1. Fuzzification | 39 |
| III.3.1.1. Variables linguistiques et intervalles flous | 39 |
| III.3.1.2. Fonctions d'appartenances | 40 |
| III.3.2. Règles floues | 42 |
| III.3.2.1. Méthodes d'extraction naturelle | 42 |
| a - Méthodes basées sur un savoir-faire d'un expert | 42 |
| b - Méthodes basées sur la modélisation des actions d'un opérateur | 42 |
| III.3.2.2. Méthode d'extraction automatique | 42 |
| III.3.2.3. Etablissement des règles floues | 42 |
| III.3.3. Mise en œuvre du système d'inférence floue | 45 |
| III.3.3.1. Implémentation du système d'inférence floue (SIF) sous MATLAB | 45 |
| a - Fuzzification des variables d'entrées et de sortie | 46 |
| b - Règles d'inférence | 48 |
| c - Défuzzification | 50 |
| III.3.3.2. Tests et validation | 50 |
| III.3.3.3 Performance du modele | 51 |
| III.4. Conclusion | 53 |
| Conclusion Generale | 55 |
| References bibliographiques | 57 |

Introduction Générale

L'énergie électrique joue un rôle important dans le développement économique et industriel d'un pays. Les besoins économiques et le bien être des populations font partie aujourd'hui des raisons d'un développement croissant des installations de production de transport et de transformation d'énergie électrique. L'approvisionnement de cette énergie électrique provenant des centrales exige l'installation des lignes aériennes et souterraines permettant l'alimentation des consommateurs. Les lignes aériennes qui sont conçues, réalisées, entretenues sont exploitées conformément aux normes, prescription et directives de sécurité, de même qu'aux règles de l'art, sont exposées à diverses contraintes. Parmi celles-ci la pollution des isolateurs, [1].

Les isolateurs sont des éléments essentiels dans la conception d'une ligne aérienne. Leur rôle est de relier les conducteurs sous tension aux supports et d'assurer l'isolement électrique entre ces deux parties constitutives de la ligne. En effet, le choix du type d'isolateur, les contrôles de réception, la surveillance en exploitation doivent être faite avec un maximum de soin, pour assurer le bon fonctionnement de la ligne, [2-5].

Les principaux types d'isolateurs sont les isolateurs rigides et les isolateurs de suspension. Les premiers sont généralement reliés au support par une ferrure fixe et sont souvent utilisés dans les lignes de distribution. Quant aux isolateurs de suspension, les plus utilisés sont les isolateurs à capot et tige, [1-3, 6].

En effet, une perturbation de l'isolation électrique assurée par l'isolateur peut entraîner, dans certaines circonstances, son contournement et donc un risque majeur sur la fiabilité et le fonctionnement du système de transmission de l'énergie électrique par voies aériennes. Plusieurs cause sont à l'origine de contournement électrique comme les surtensions transitoires sur les réseaux électriques (foudres, enclenchement et ouvertures des lignes, les dépôts de pollution atmosphérique ou encore dans les régions froides, les précipitations atmosphériques givrantes).

Le phénomène de pollution des isolateurs peut être considéré comme un déversement continu ou intermittent d'impuretés d'origines diverses. Ces impuretés peuvent provenir des flots de fumée qui s'échappent des appareils d'évacuation (pollution industrielle ou urbaine), ou alors de fines particules salines dans les régions situées au bord de la mer (pollution marine), et même de particules de sable plus ou moins fines dans les régions désertiques (pollution désertique), [1].

Notre objectif est de déterminer la valeur de la tension de countournementd a partir des differents variables (l'influence de la conductivité et les niveaux de pollution).On parle alors de la prediction.

La prédiction d'un événement nécessite une connaissance vague, imparfaite et incertaine. La complexité d'un système de prédiction est sa caractéristique intrinsèque. Diverses techniques d'Intelligence Artificielle (IA) ont été utilisées dans la réalisation d'un Système de prédiction. Les modèles de prévision basés sur l'IA peuvent être classés en quatre groupes: les modèles basés sur les réseaux de neurones, logique floue, algorithmes génétiques et les systèmes experts, [5].

La logique floue, ou plus généralement le traitement des incertitudes, a pour objet d'étude la représentation des connaissances imprécises et le raisonnement approché. On peut donc la situer à côté des heuristiques de résolutions de problèmes, des systèmes experts, de l'apprentissage, de l'intelligence artificielle distribuée et même du traitement de la langue naturelle, domaines qui composent les techniques d'intelligence artificielle au sein des sciences cognitives. C'est de cet aspect «intelligence artificielle», où s'établissent des modèles du comportement intellectuel humain, [5].

Le présent travail porte sur l'estimation (prediction) de la tension de contournement d'un isolateur de haute tension par la logique floue.

Outre l'introduction et la conclusion générales, le manuscrit est découpé en trois chapitres :

Nous entamons le premier chapitre par une présentation d'une synthèse bibliographique sur les isolateurs de haute tension et quelques définitions liées aux isolateurs, ainsi que le phénomène de pollution et leurs conséquences sur le transport de l'énergie électrique.

L'objectif de deuxième chapitre est de présenter le principe de la logique floue ainsi ces éléments de base pour traiter un phénomène quelconque.

Le dernier chapitre décrit la méthodologie suivie pour l'application de la logique floue pour l'estimation de la tension de countournement.

Finalement, nous terminons notre mémoire par une conclusion générale qui représente la synthèse globale de notre travail.



Chapitre I

**Isolateur De Haute
Tension Et
Phénomènes De
Pollution**

I.1. Introduction

Pour des raisons technico-économiques, le transport et la distribution de l'énergie électrique s'effectuent généralement sous haute tension (surtout au moyen de lignes aériennes, mais aussi de câbles souterrains).

La fiabilité du transport d'énergie dépend considérablement du comportement mécanique, électrique et diélectrique à long terme des différents composants des lignes et postes. Parmi ces composants on note le rôle primordial que jouent les isolateurs.

Dans la plupart des lignes électriques de haute tension les isolateurs sont menacés par le phénomène de pollution.

Le présent chapitre porte sur les isolateurs de haute tension, leurs différents types ainsi que les matériaux utilisés dans leur fabrication. Nous traitons ensuite le phénomène de la pollution en générale et ses conséquences néfastes sur le comportement des isolateurs.

I.2. Les isolateurs de haute tension

L'isolateur est utilisé comme son nom l'indique pour l'isolement entre deux corps ou deux pièces sous différentes tensions pour empêcher les courts circuits, les pertes de courant et les charges d'électrocution. L'isolateur est un matériau solide, liquide ou gaz qui a une très grande résistance au passage du courant et dont la conductibilité est pratiquement nulle, [3].

I.2.1. Rôle d'un isolateur de haute tension

Les isolateurs des lignes aériennes ont deux fonctions principales. D'une part, ils permettent d'isoler électriquement les lignes de transport d'énergie électrique des pylônes mis à la terre, et d'autre part, ils ont un rôle mécanique qui consiste à soutenir ces mêmes lignes et donc résister aux différentes contraintes mécaniques dû surtout au poids de la ligne, son mouvement en présence de vent, ... etc, [3].

I.2.2. Fonctionnement et constitution d'un isolateur

Les isolateurs sont des composants indispensables dans le transport et à la distribution de l'énergie électrique.

Leur importance est reliée directement au fait de [4]:

- Réaliser une liaison mécanique entre des conducteurs portés à des potentiels différents accrochés aux pylônes des lignes aériennes.

- Maintenir les conducteurs dans la position spécifiée (isolateurs d'alignement et d'ancrage).
- Assurer la transition entre l'isolation interne (huile, SF6) et l'isolation externe (air atmosphérique).
- Raccorder les matériels électriques au réseau (traversées de transformateur, extrémités de câbles).
- Jouer le rôle d'une enveloppe de certains appareils (disjoncteurs, parafoudres, réducteurs de mesure).

L'isolateur de haute tension est formé par un isolant auquel sont fixés deux pièces métalliques A et B tel que A se fixe au pylône et B porte le conducteur. Il possède un double rôle [4]:

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

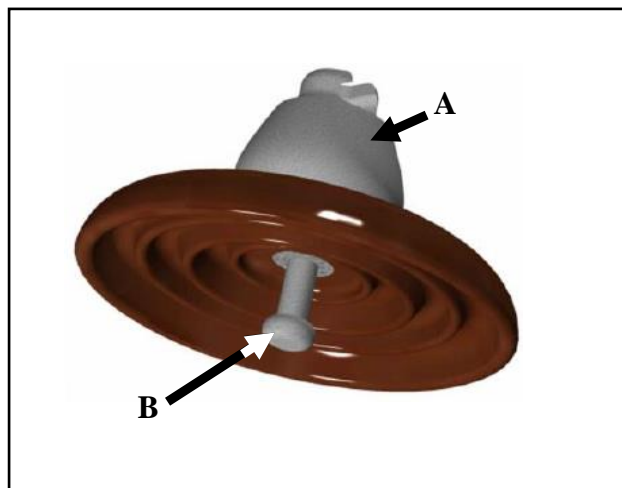


Figure I.1. Isolateur de haute tension (capot et tige).

I.2.3. Matériaux isolants utilisés pour la fabrication des isolateurs

Nous trouvons plusieurs isolants solides qui peuvent être utilisés pour la fabrication des isolateurs de haute tension comme le verre, la céramique et la porcelaine. Bien qu'ils soient des matériaux fragiles, le verre, la céramique et la porcelaine sont les matériaux les plus utilisés dans la fabrication des isolateurs. La céramique est de plus en plus abandonnée à cause de deux inconvénients majeurs : le poids et la difficulté de détection de amorçages. Ces dernières années, on s'intéresse de plus en plus à l'utilisation des matériaux synthétiques dans les isolateurs, [4].

I.2.3.1. Céramique

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



Figure I.2. Isolateur en céramique.

I.2.3.2. Verres

Outre son bas prix, le verre présente l'avantage de permettre de détecter les défauts par une simple observation. On trouve deux types de verre pour la fabrication des isolateurs : le verre trempé et le verre recuit.

a. Verre recuit

Le verre recuit est utilisé pour la fabrication d'isolateurs rigides, mais présente cependant des inconvénients. (figure I.3).

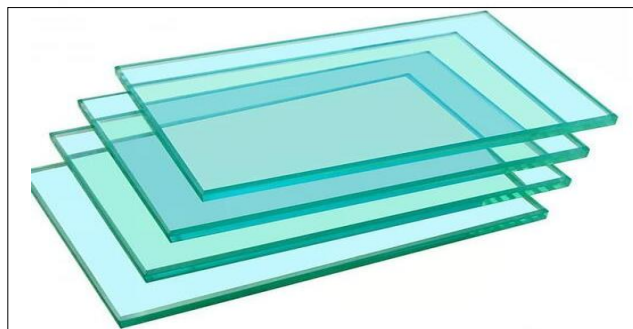


Figure I.3. Verre recuit.

Parmi ces inconvénients, nous citons le fait qu'il ne résiste pas aux variations brusques de température et qu'il ne supporte que des tensions mécaniques relativement faibles et c'est pour cette raison qu'il n'est pas utilisé pour la fabrication des isolateurs de suspension, [1].

b. Verre trempé

La trempe d'un verre est obtenue par un traitement thermique : chauffage, suivi d'un brusque refroidissement. Ce traitement augmente considérablement la résistance du verre aux contraintes mécaniques et thermiques, sans altérer les propriétés spectrophotométriques. Ce traitement a pour effet d'engendrer à l'intérieur du verre un système de contraintes qui renforce considérablement la résistance du produit fini, [1].



Figure I.4. Verre trempé.

I.2.4.3. Matériaux synthétiques

Un matériau synthétique est un assemblage d'au moins deux composants non miscibles (figure I.5) (mais ayant une forte capacité de pénétration) dont les propriétés se complètent. Le nouveau matériau ainsi constitué, hétérogène, possède des propriétés que les composants seuls ne possèdent pas. Ce phénomène, qui permet d'améliorer la qualité de la matière face à une certaine utilisation (légèreté, rigidité à un effort, etc.) explique l'utilisation croissante des matériaux composites dans différents secteurs industriels. Néanmoins, la description fine des composites reste complexe du point de vue mécanique de par la non-homogénéité du matériau. Un matériau composite se compose comme suit : le béton armé = composite béton + armature en acier, ou le composite fibre de verre + résine polyester.

Les isolateurs en matériaux synthétiques sont composés d'un centre en fibres de verre imprégnées d'une résine et d'un revêtement à ailettes de type élastomère.

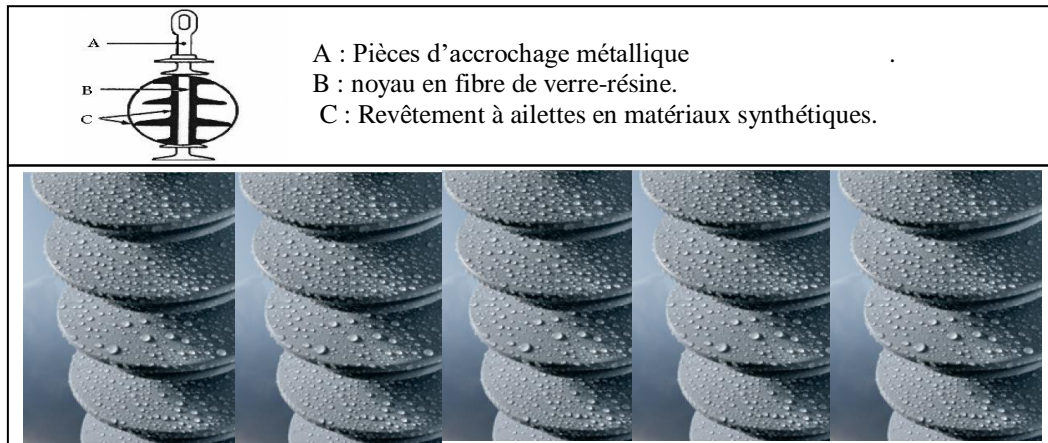


Figure I.5. Isolateurs en matériaux synthétiques

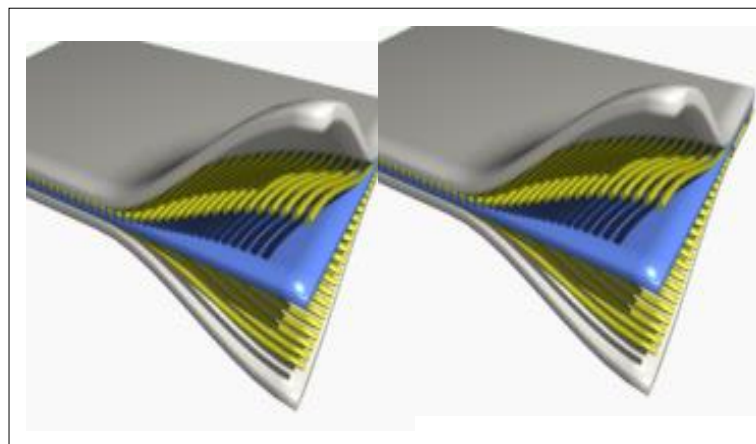


Figure I.6. Matériau synthétique (composite)

Un exemple de multicouche.

I.3.Types d'isolateurs

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

I.3.1. Isolateur de type rigide

Ce type d'isolateur permet d'obtenir une liaison rigide entre le support et le câble. Il est constitué d'un ou plusieurs isolateurs encastrés et scellés entre eux, ils sont fixés aux pylônes par des ferrures de différentes formes (Figure I.7).

Ils sont montés sur pylônes soit d'une façon, horizontale ou oblique (inclinée). Mais ce type d'isolateurs est utilisé pour les lignes aériennes qui ne dépassent pas le niveau de tension de 60 kV, [1]. La céramique et le verre sont les deux matériaux utilisés pour les isolateurs de haute tension.



Figure I.7. Vue en coupe d'un isolateur rigide en verre.

I.3.2. Isolateurs suspendus ou éléments de chaîne

Ils sont constitués du matériau isolant ainsi que d'une pièce métallique qui sert à réaliser la liaison entre deux isolateurs et qui permet de donner une certaine flexibilité à la chaîne d'isolateurs. La chaîne d'isolateurs peut être montée sur le pylône en suspension, ou bien verticalement (chaîne d'alignement), ou encore d'une façon horizontale (chaîne d'ancrage), [1].

Il existe deux types principaux d'éléments de chaîne.

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

I.3.2.1. Isolateur capot et tige

Chaque élément est constitué d'un capot, d'une partie isolante en forme de jupe et d'une tige. La coupe d'un tel isolateur est schématisée sur la (Figure 1.8). La forme de la tête est dessinée de sorte que les efforts de traction appliqués à l'isolateur se transforment, autant que possible, en compression des diélectriques sur les quels apparaissent, toute fois, inévitablement certaines contraintes de cisaillement.

L'isolateur capot-tige est schématisée à la (figure I.8).

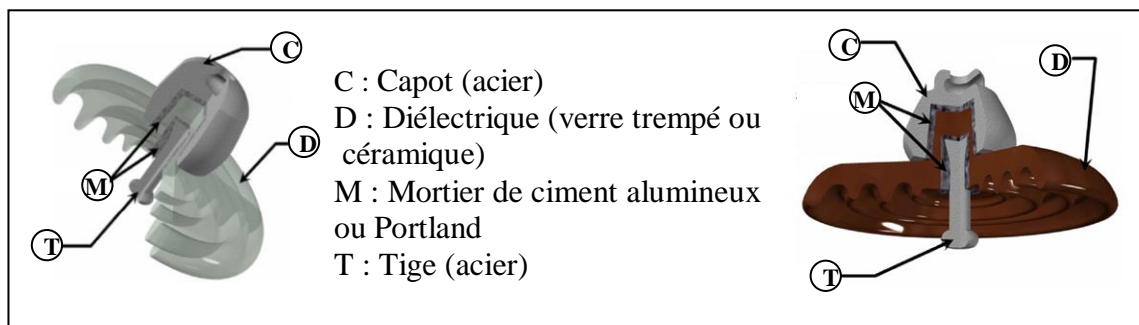


Figure I.8. Isolateur capot et tige

Différents profils des isolateurs à capot et tige :

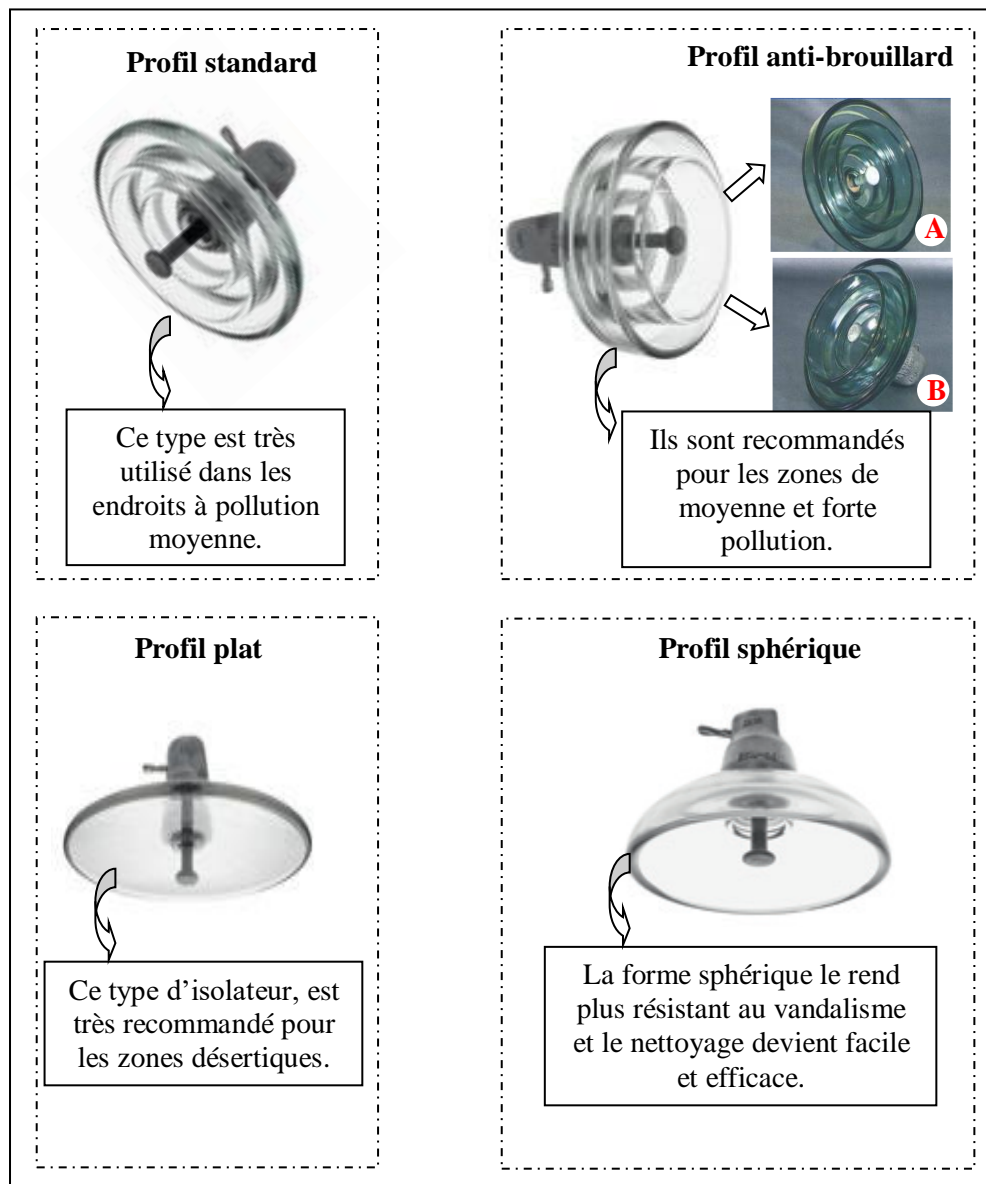


Figure I.9. Différents profils des isolateurs à capot et tige

I.3.2.2. Isolateur à long fût

Il est constitué d'un bâton cylindrique plein en céramique, en porcelaine ou en matériaux synthétiques muni d'ailettes. A chaque extrémité il y a une pièce métallique pour les liaisons.

Cette extrémité métallique peut se présenter sous deux formes distinctes, soit elle enveloppe les extrémités tronconiques sur le cylindre (figure I.10.a), soit en forme de tige scellée dans une cavité prévue à cet effet (figure I.10.b) ,[1].

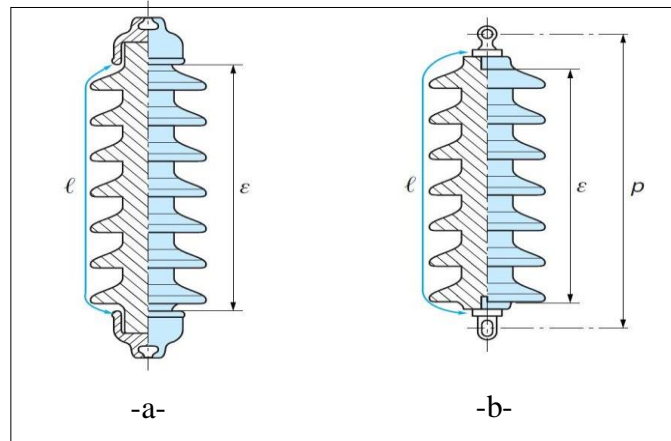


Figure I.10. Isolateur à log fut.

I.4. Choix des isolateurs

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

Les isolateurs les mieux adaptés à un environnement donné sont ceux qui retiennent le taux de dépôts polluant le moins élevé, c'est-à-dire les isolateurs qui possèdent les meilleures propriétés d'auto nettoyage. Même bien choisie, une isolation n'est jamais à l'abri d'un incident:

- La sévérité de la pollution d'un site peut changer.
- L'apparition d'une nouvelle usine à proximité d'un poste,
- La construction d'un ouvrage routier voisin ou plus simplement, un événement météorologique exceptionnel peuvent augmenter, durablement ou temporairement, la pollution d'un site, alors qu'un poste ou une ligne y sont déjà en exploitation.

Le dimensionnement initialement correct des isolateurs peut alors devenir insuffisant et il faut pouvoir protéger les installations existantes contre les nouvelles sources de pollution éventuelles [1].

I.5. Phénomènes de Pollution

La pollution est un phénomène qui constitue un sérieux problème sur l'isolement des ouvrages de haute tension, dont il faut tenir compte lors du dimensionnement de l'isolement des lignes de haute tension.

Il provoque la formation d'une couche sur la surface des isolateurs. Ces couches de pollution, quand elles sont humidifiées, réduisent considérablement la résistivité des isolateurs ce qui conduit à la diminution de leur tension de tenue.

Notons que cette couche de pollution n'est pas homogène et sa distribution n'est pas uniforme. La non-homogénéité est due à la présence de différents agents polluants dans une même région, et la non-uniformité de la répartition sur les surfaces des isolateurs est due aux profils des isolateurs, le sens et la direction des vents dans cette région, la pluie, la position de la chaîne d'isolateurs par rapport au sol (verticale, horizontale, inclinée), la position de l'isolateur dans la chaîne, le degré de pollution du site où se trouve les isolateurs ainsi que la surface inférieure ou supérieure de l'isolateur,[1].

I.5.2. Quelques définitions

I.5.2.1. Contournement

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

I.5.2.2. Ligne de contournement

La ligne de contournement (l_c) est la distance la plus courte dans un gaz entre deux parties conductrices, par exemple entre le capot et la tige pour un élément d'isolateur, [11].

I.5.2.3. Tension de contournement

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

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

I.5.2.4. Tension de tenue

C'est le niveau de tension le plus important, que peut supporter une isolation sans provoquer de décharge disruptive.

I.5.2.5. Ligne de fuite

La ligne de fuite est la distance la plus courte le long de la surface d'un isolant entre deux parties conductrices, [11].

I.5.2.6. Courant de fuite

C'est un courant de faible amplitude, circulant à travers la couche polluante le long de la surface de l'isolateur, son intensité devient importante lorsqu'on s'approche de la

tension de contournement. Il dépend de plusieurs facteurs tels que la nature de la couche polluante et de la longueur de la ligne de fuite.

NB : Dans les conditions de forte humidité, la dissolution des sels contenus dans la couche polluante, provoque la formation d'une couche électrolytique.

I.5.3. Formation des couches polluantes sur les isolateurs

La disposition des isolateurs dans les lignes forme un obstacle à l'écoulement d'un air transportant de la poussière. Une couche de pollution se développe progressivement sur la surface de l'isolateur. Ces couches peuvent engendrer une diminution considérable de la résistivité superficielle des surfaces isolantes, et par suite, la diminution de la tension de tenue des isolateurs, [1].

La disposition de la pollution dépend de la position de la chaîne (verticale, horizontale ou inclinée), et le profil de l'isolateur. Généralement, la pollution se concentre sur les éléments de la chaîne situés près de la borne haute tension, et dans les parties protégées contre les facteurs d'auto-nettoyage, [1].

I.5.4. Sources de la pollution

Nous distinguons trois sortes de pollution : (figure I.11)

- Pollution naturelle,
- Industrielle,
- Mixte.

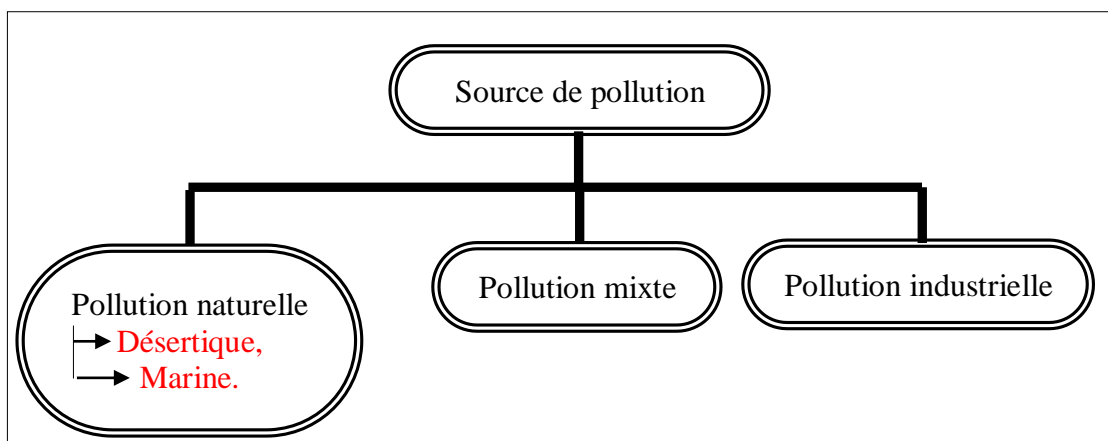


Figure I.11. Sources de pollution

I.5.4.1. Pollution naturelle

Elle dépend du climat et des facteurs météorologiques des régions. Elle est constituée de dépôts de poussières véhiculées par les vents tels que : sable, embruns marins, [6].

Ces dépôts, et selon leur nature, se présentent comme suit :

I.5.4.2. Pollution marine

Les installations situées en bord de mer sont exposées aux embruns portés par le vent et qui se déposent progressivement sur les isolateurs, formant une couche de pollution de sel qui devient conductrice lorsqu'elle est humidifiée par le brouillard ou simplement par condensation. Un courant de fuite s'établit alors à travers la couche superficielle et des arcs électriques peuvent prendre naissance, [7].

I.5.4.3. Pollution désertique

Parmi les phénomènes qui caractérisent la nature désertique, figure le vent de sable. Celui-ci induit des dépôts de sable sur les surfaces des isolateurs. De la même façon que précédemment, lorsque ces dépôts sont humidifiés, les couches de sable deviennent plus au moins conductrices à cause de l'existence de sels dans le sable. Après, nous assistons aux mêmes phénomènes constatés dans le cas précédent, [8].

I.5.3.4. Pollution industrielle

Ce type de pollution est fréquent dans les zones industrielles surtout à proximité des usines, entreprises de production éjectant des fumées (raffinerie, cimenterie, ...). Par ailleurs les gaz d'échappements (centrale thermiques) et les engrais utilisés en agriculture contribuent aussi aux dépôts observés à la surface des isolateurs.

En présence d'une humidité intense, le sel contenu dans ces polluants abaisse considérablement la résistivité superficielle des isolateurs, [1].

Cette pollution peut aussi être d'origine domestique, quant il s'agit des facteurs tels que : fumées et gaz résultant des moyens de réchauffement des habitations ou de moyens de transport.

I.5.4.5. Pollution mixte

Ce type de pollution est en fait le plus fréquent et le plus sévère pour l'exploitation des ouvrages électriques. La pollution mixte résulte de la combinaison entre les différents types de pollution, comme par exemple les pollutions marine et industrielle lorsque des installations industrielles sont situées en bord de mer, [7].

I.6. Conséquences de la pollution

Les couches polluantes qui s'accumulent à la surface des isolateurs provoquent une conductivité électrique superficielle. Celle-ci modifie la répartition du potentiel le long de

la ligne de fuite. Suivant les conditions atmosphériques (pluie fine, brouillard...), la tension de rupture diélectrique de l'air peut être atteinte entre deux points de la surface isolante entraînant l'amorçage d'un arc électrique qui court-circuite une partie de la ligne de fuite. Trois cas peuvent se présenter selon les contraintes auxquelles est soumis l'isolateur, [8]:

I.6.1. Arc non localisé

L'arc électrique s'éteint rapidement, puis se réamorce aléatoirement à un autre endroit et ainsi de suite. Il y a apparition d'un courant de fuite intermittent entraînant une perte d'énergie relativement faible et généralement supportable par l'installation, [1]. Figure I.12 (a).

I.6.2. Arc permanent (fixe)

Contrairement au cas précédent, l'arc électrique se fixe à la surface, soit en s'y maintenant (courant continu), soit en s'y réamorçant au même endroit (courant alternatif). Cet arc peut entraîner, par effet thermique, une dégradation de support isolant nécessitant le remplacement de l'élément défaillant, [1]. (Figure I.12 (b)).

I.6.3. Contournement des isolateurs pollués

L'accumulation du dépôt est continue et n'est modifiée que par la pluie et le vent. En position verticale, le nettoyage est plus efficace sur le dessus de l'isolateur que sur le dessous, d'où un dépôt plus important sur la surface inférieure des ailettes. Le comportement des isolateurs sous pollution peut être décomposé en trois étapes distinctes. Chacune de ces étapes a une importance sur le résultat final, donc sur la tenue ou le contournement de la chaîne isolante sous tension de service du réseau, [10]. (Figure I.12 (c)).

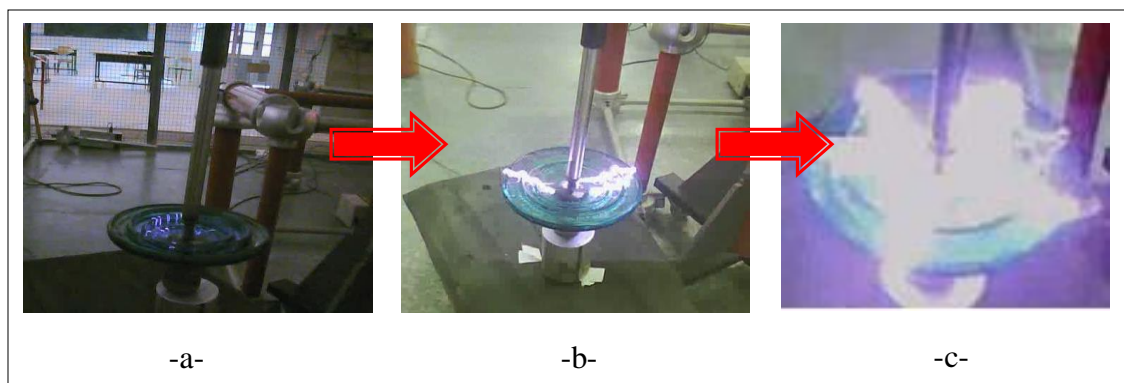


Figure I.12. Etape de contournement.

I.6.4. Déroulement du contournement

Phase 1: Dépôt de pollution

Des grains de pollution se déposent sur la surface de l'isolateur (figure. I.13).

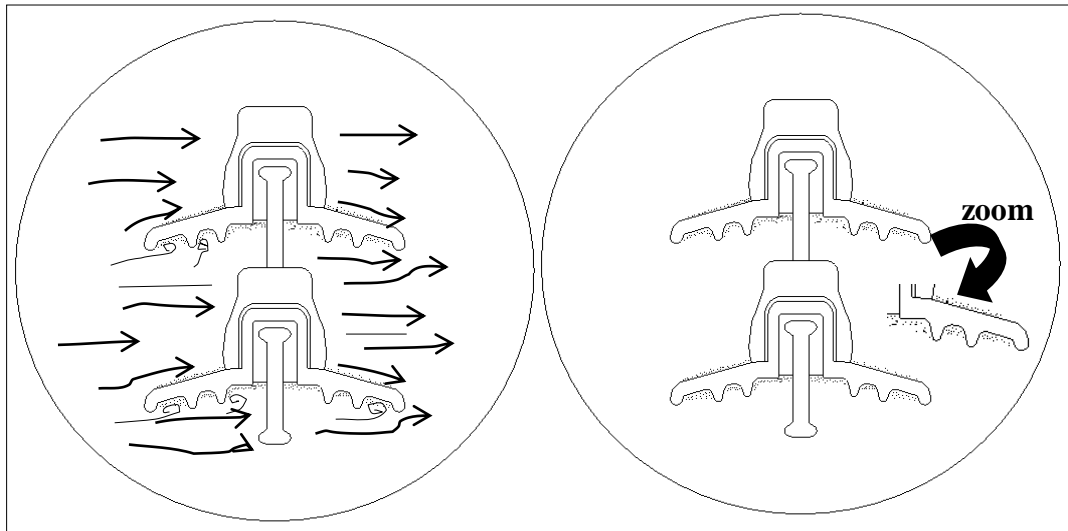


Figure I.13. Dépôt et évolution de l'agent polluant.

Phase 2 : Formation d'un électrolyte conducteur

A sec, la résistance superficielle reste élevée malgré le dépôt de pollution. Quand la couche de pollution devient humide (brouillard, humidité, rosée du matin, pluie fine...), elle se transforme en électrolyte conducteur et donne naissance à un courant de fuite superficiel (I_f) circulant sur la surface de l'isolateur, (Figure I.14).

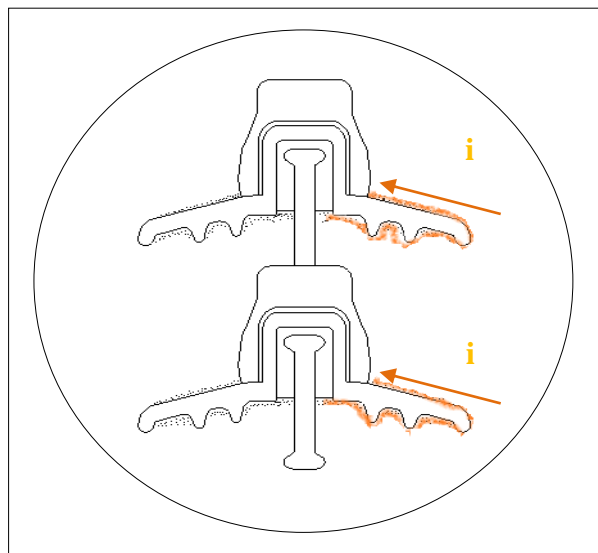


Figure I.14 Humidification du dépôt polluant et création d'un courant de fuite.

Phase 3 : formation d'une bande sèche

Dans les régions étroites de l'isolateur, où la densité de courant est élevée, une partie de l'électrolyte s'évapore et crée une bande sèche (figure. II.15).

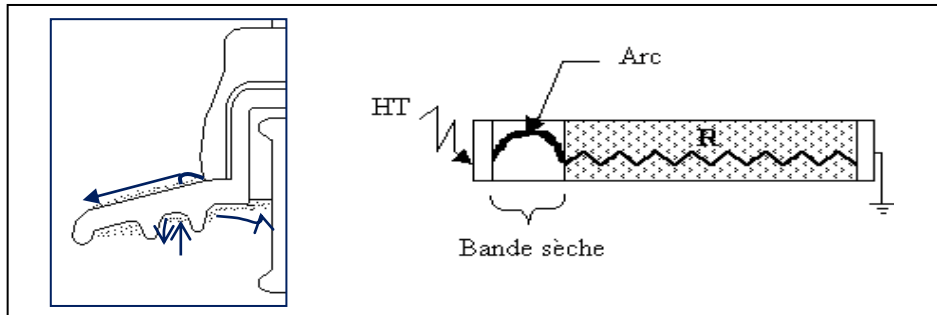


Figure I.15 Arc et bande sèche.

Phase 4 : Comportement de sarcs

La résistance du dépôt humidifié R, en série avec l'arc, limite le courant et la longueur de l'arc (Figure I.15). Si le courant est trop faible, l'arc s'éteindra, la bande sèche s'humidifiera à nouveau et le mécanisme se répétera encore. Tant que le courant de fuite n'excède pas ce que l'on appelle « courant critique » correspondant à une « longueur critique » de l'arc, cette situation reste stable (figure I.16). Dans le cas contraire, le contournement de l'isolateur peut Survenir, [10].

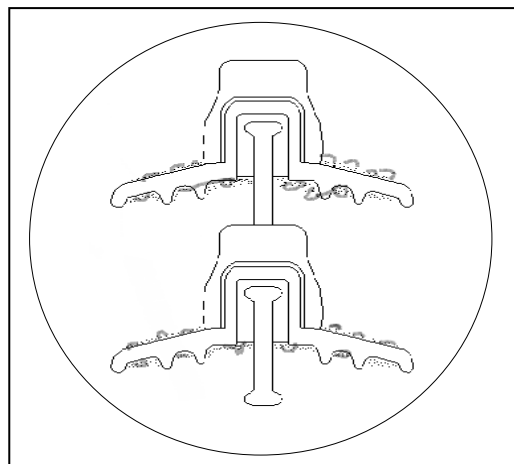


Figure I.16. Régime d'arcs sous pollution.

I.7. L'influence de la pollution sur les isolateurs de HT

La pollution est un phénomène qui agit négativement sur le comportement des isolateurs de haute tension. C'est un paramètre important à prendre en considération lors

du choix et du dimensionnement des chaînes d'isolateurs. La pollution provoque la formation d'une couche sur la surface des isolateurs.

Ces couches de pollution, quand elles sont humidifiées, réduisent considérablement la résistivité des isolateurs ce qui conduit à la diminution de leur tension de tenue. Notons que cette couche de pollution n'est pas homogène et sa distribution n'est pas uniforme. La non-homogénéité est due à la présence de différents agents polluants dans une même région, et la non-uniformité de la répartition sur les surfaces des isolateurs est due aux profils des isolateurs, le sens et la direction des vents dans cette région, la pluie, la position de la chaîne d'isolateurs par rapport au sol (verticale, horizontale, inclinée), la position de l'isolateur dans la chaîne, le degré de pollution du site où se trouvent les isolateurs ainsi que la surface inférieure ou supérieure de l'isolateur, [9].

I.8. Sévérité de pollution d'un site

Le dimensionnement de l'isolation externe vis-à-vis de la pollution pose un certain nombre de problèmes spécifiques. L'un des plus fondamentaux est la détermination de la sévérité de la pollution là où l'isolation doit être installée, [1].

La mesure de cette sévérité est indispensable pour assurer un service sans défaillance dans un site pollué.

On peut classer les degrés de la pollution suivant quatre niveaux selon la CEI 81-5 qui sont : faible, moyenne, forte et très forte (Tableau. I.1), [5].

Tableau. I .1 Classement de degré de pollution selon CEI 815. [5,17]

| | |
|----------------------|---|
| Faible 2.5g/l | <ul style="list-style-type: none"> ❖ Zones sans industries et avec faible densité D'habitations d'installation de chauffage ❖ Zones avec faible densité d'industries ou de habitations Mais soumise fréquemment aux vents et /ou plusieurs ❖ Régions agricoles ❖ Régions montagneuses |
| Moyenne 10g/l | <ul style="list-style-type: none"> ❖ Zones avec industries ne produisant pas de fumées particulièrement polluantes et/ou avec une densité moyenne d'habitation équipée d'installation de chauffage |

| | |
|--------------------|---|
| Forte 80g/l | <ul style="list-style-type: none"> ❖ Zones généralement peu étendues ,soumises à des fumées industrielles produisant des poussières conductrices ❖ Zones désertiques caractérisées par la sans pluie , exposée aux vents forts transportant de sable et deu sel soumis à une condensation régulière |
|--------------------|---|

I.9. Technique de lutte contre la pollution

Pour un niveau de pollution donné, une bonne conception des lignes basée sur des mesures de sévérité de pollution permet de prévenir, autant que possible, les incidents lorsque la ligne est en service. Mais un changement dans les données d'un site est toujours possible, c'est-à-dire même un dimensionnement initialement correct peut s'avérer insuffisant dans certaines conditions, [12].

Dans ces circonstances, on utilise des techniques comme l'allongement de la ligne de fuite, l'adaptation d'un autre type des isolateurs capable de résister aux contraintes de la pollution, [13].

Par contre, certaines zones très localisées sont soumises à un niveau de pollution exceptionnel. Dans ce cas, la simulation de laboratoire n'est pas recherchée, car aucun isolateur de dimensionnement raisonnable n'est en mesure de résister à ces contraintes, [12].

On préfère, généralement, utiliser d'autres types des techniques de lutte contre la pollution. Plusieurs moyens sont utilisés afin de prévenir, autant que possible, les incidents lorsqu'une ligne est en service. Ces moyens de lutte doivent tenir compte des données propres au site considéré et au changement possible de la sévérité de pollution dû à de nouveaux facteurs (apparition d'une nouvelle usine à proximité d'un poste, ...). Les différentes méthodes utilisées consistent à, [14] :

I.9.1. Allongement de la ligne de fuite

Il permet d'adapterle dimensionnement aux nouvelles conditions de pollution. Deux techniques sont employées :

- Le changement de type d'isolateurs (pour allonger la ligne de fuite) : c'est une opération très coûteuse et souvent impossible à réaliser en poste.
- L'utilisation de prolongateurs de ligne de fuite en matériaux polymères, qui sont collés sur la surface des isolateurs existants, [1].

I.9.2. Isolateurs plats (auto-nettoyables)

L'utilisation d'isolateurs plats conduit à la diminution de la ligne de fuite des isolateurs. En effet, ces derniers sans nervures ont la propriété d'accumuler moins de pollution que les isolateurs traditionnels et s'auto-nettoient très bien sous l'effet du vent. Ils sont principalement utilisés dans les régions désertiques, [1].

I.9.3. Graissage périodique (couche hydrophobes)

Grâce à ses propriétés hydrophobes, le graissage protège temporairement les isolateurs. La longévité du graissage dépend à la fois de l'environnement (pollution, conditions climatiques) et de la qualité intrinsèque du produit. Elle est généralement comprise entre 1 et 4 ans. Le graissage est largement utilisé dans le monde, mais l'opération de nettoyage puis de graissage est pénible, longue et coûteuse. Elle nécessite, par ailleurs, une interruption de service, [1].

I.9.4. Revêtement a base des silicones

Cette méthode consiste à appliquer, par pulvérisation ou au pinceau, un caoutchouc silicone qui se vulcanise à température ambiante à la surface des isolateurs. Comme pour le graissage grâce à ses propriétés hydrophobes, ce revêtement protège et améliore leur tenue sous pollution. Par contre sa longévité est, en général, nettement supérieure à celle du graissage, [1].

I.9.5. Les isolateurs composites

Ces isolateurs présentent l'avantage d'une grande légèreté, une haute résistance mécanique et de bonnes propriétés hydrophobes et peuvent être utilisés dans des conditions de pollutions très sévères. Cependant, ces isolateurs, revêtus d'un polymère, voient leurs caractéristiques changer au cours du temps. Ils peuvent vieillir sous l'effet des différentes contraintes (électriques et climatiques) auxquelles ils sont soumis en service, [1].

I.9.6. Nettoyages sous ou hors tension

Le nettoyage manuel (essuyage à sec de l'isolateur) ou le lavage hors tension, peuvent être utilisés de façon périodique, en particulier dans les postes. Comme ces méthodes sont utilisées hors tension, elles entraînent nécessairement des interruptions de service parfois assez longues. Aussi, il faut limiter, autant que possible, leur utilisation.

Le lavage sous tension permet d'éviter ces coupures. Dans son principe, ce type de lavage permet de garder propre l'isolateur. Ce dernier est réalisé à l'aide d'installations fixes ou mobiles. Dans ces cas, il est effectué selon des règles strictes concernant la qualité de l'eau de lavage, le processus de lavage et les distances de sécurité à respecter afin d'éliminer tout risque de contournement pendant le lavage.

Le nettoyage des isolateurs à l'aide d'un abrasif pulvérisé sous pression est une technique utilisée dans certain pays (Amérique du Nord en particulier).

Cette technique permet le nettoyage d'isolateurs recouverts de pollution très adhérente (ciment, par exemple) et peut être utilisée pour dégraisser les isolateurs, [1].

I.10. Conclusion

Les isolateurs sont des éléments essentiels dont dépendent la sécurité d'exploitation, la qualité et la continuité de service.

Dans ce chapitre introductif, une synthèse des différents aspects des phénomènes de pollutions sont présentée. Les principales conclusions que l'on peut tirer de cette synthèse sont : La pollution reste un facteur déterminant pour le dimensionnement des isolateurs dans les ouvrages de haute tension.

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

Dans le deuxième chapitre nous allons présenté une brève présentation théorique sur la technique de l'intelligence qui sera appliquée à la fin de notre travail. (Logique floue (LF)).



Chapitre II

Généralités Sur La Logique Floue

II.1. Introduction

La logique floue suscite actuellement un intérêt général de la part des chercheurs, des ingénieurs et des industriels, et plus généralement de la part de tous ceux qui éprouvent le besoin de formaliser des méthodes empiriques, de généraliser des modes de raisonnement naturel, d'automatiser la prise de décision dans leur domaine et de construire des systèmes artificiels effectuant les tâches habituellement prises en charge par les humains.

La logique floue est une technique pour le traitement de connaissances imprécises basées, sur des termes linguistiques ; elle donne les moyens de convertir une commande linguistique basée sur le raisonnement humain, en une commande automatique, permettant ainsi la commande des systèmes complexes dont les informations sont exprimées d'une façon vague et mal définie, [15].

Dans le domaine du génie électrique, la commande à logique floue a fait l'objet de plusieurs travaux, dans la commande des convertisseurs statiques et dans la commande des machines électriques, dans la navigation de robots mobiles. Dans ce contexte, nous présentons les notions de base de la logique floue.

II.2. Historique de la logique floue

Les bases théoriques de la logique floue ont été formulées en 1965 par le professeur Lotfi A. Zadeh, de l'Université de Berkeley en Californie. Il a introduit la notion de sous ensemble flou pour fournir un moyen de représentation et de manipulation des connaissances imparfaitement décrites, vagues ou imprécises. A cette époque, la théorie de la logique floue n'a pas été prise au sérieux excepté par quelques experts.

Dès 1975, Mamdani et Assilian publient les premiers résultats permettant une exploitation de cette théorie dans des systèmes de réglage. En utilisant une structure de contrôleur relativement simple, ils ont obtenu de meilleurs résultats lors de la commande de certains processus que ceux fournis par un régulateur standard de type PID.

Peu de temps après, en 1977 le danois Ostergaard a appliqué la logique floue à la commande de tubes broyeurs pour la fabrication de ciment. A cette époque, la plupart des études concernant les systèmes de régulation exploitant la logique floue ont été réalisées en Europe. A partir de 1985 environ, ce sont les Japonais qui commencent à utiliser largement la logique floue dans des produits industriels et de consommation pour résoudre des problèmes de réglage et de commande [16].

II.3. Théorie des ensembles flous

II.3.1. Notion d'appartenance partielle

Dans la théorie des ensembles, un élément appartient ou n'appartient pas à un ensemble. La notion d'ensemble est à l'origine de nombreuses théories mathématiques. Cette notion essentielle ne permet cependant pas de rendre compte de situations pourtant simples et rencontrées fréquemment. Parmi des fruits, il est facile de définir l'ensemble des pommes. Par contre, il est été plus difficile de définir l'ensemble des pommes mûres.

On conçoit bien que la pomme mûrit progressivement la notion de pomme mûre est donc graduelle. C'est pour prendre en compte de telles situations qu'a été créée la notion d'ensemble flou. La théorie des ensembles flous repose sur la notion d'appartenance partielle : chaque élément appartient partiellement ou graduellement aux ensembles flous qui ont été définis [5].

II.3.2. Les variables linguistiques

Le concept des variables linguistiques joue un rôle important dans le domaine de la logique floue. Une variable linguistique comme son nom le suggère, est une variable définie à base de mots ou des phrases au lieu des nombres. En effet, la description d'une certaine situation, d'un phénomène ou d'un procédé contient en général des expressions floues comme "quelque, beaucoup, souvent, chaud, froid, rapide, lent, grand, petit ...etc.". Ce genre d'expressions forme ce qu'on appelle des variables linguistiques de la logique floue [17].

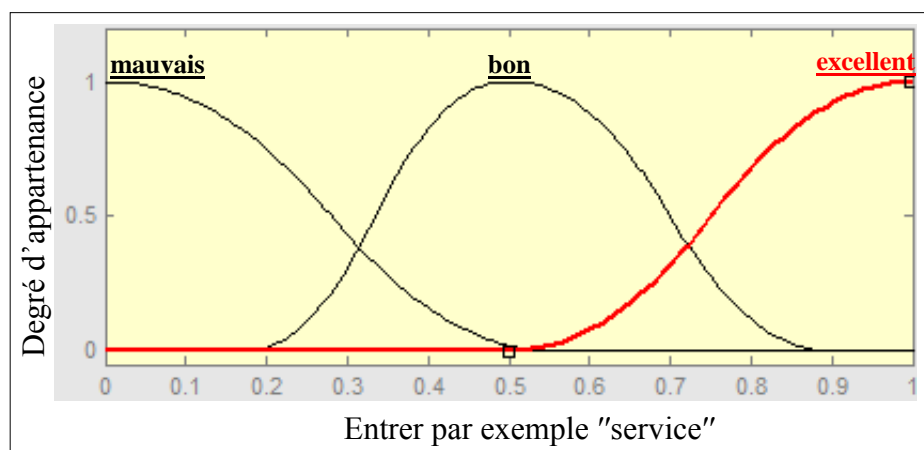


Figure II.1. Variable linguistique
" par exemple la description de la qualité du service".

II.3.3. Fonction d'appartenance

Un ensemble flou est défini par sa "Fonction d'appartenance", qui correspond à la notion de « fonction caractéristiques » en logique classique. Supposons que nous voulions définir l'ensemble des personnes de « taille moyenne ». En logique classique, nous conviendrons par exemple que les personnes de taille moyenne sont celles dont la taille est comprise entre 1.60m et 1.80m la fonction caractéristique de l'ensemble (figure II.2) donne "0" pour les tailles hors de l'intervalle [1.60m ; 1.80m] et "1" dans cet intervalle,[4].

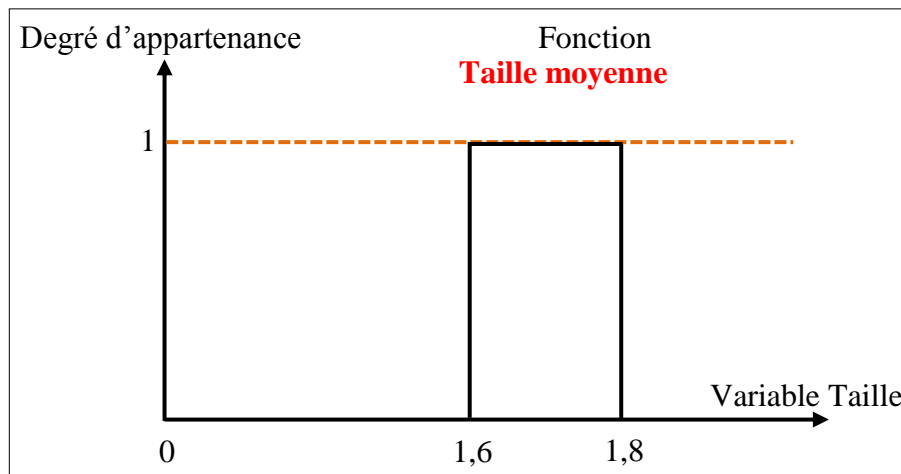


Figure II.2. Fonction caractéristique, [13].

L'ensemble flou des personnes de « taille moyenne » sera défini par une « fonction d'appartenance » qui diffère d'une fonction caractéristique par le fait qu'elle peut prendre n'importe quelle valeur dans l'intervalle [0-1]. A chaque taille possible correspondra un « degré d'appartenance » à l'ensemble flou des « tailles moyennes » (figure II.3), compris entre 0 et 1,[4].

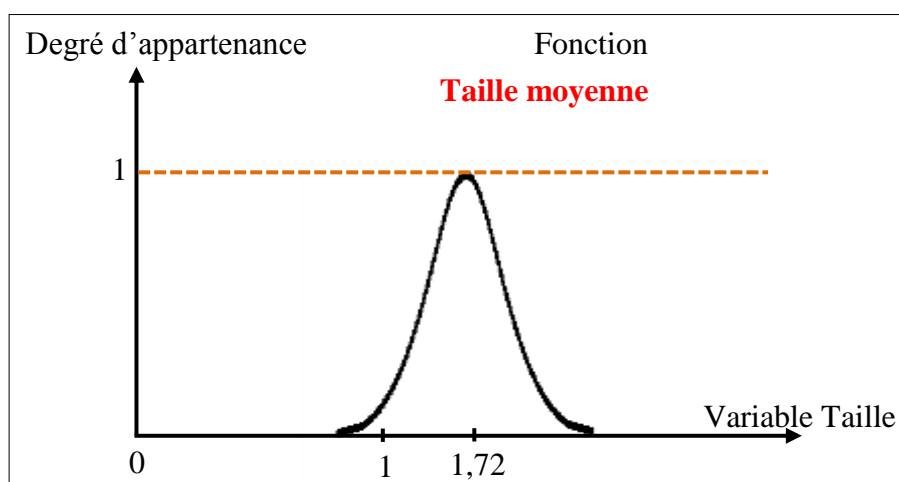


Figure II.3. Fonction d'appartenance, [13].

Plusieurs ensembles flous peuvent être définis sur la même variable, par exemple les ensembles « taille petite », « taille moyenne » et « taille grande », notions explicitées chacune par une fonction d'appartenance (figure II.4),[4].

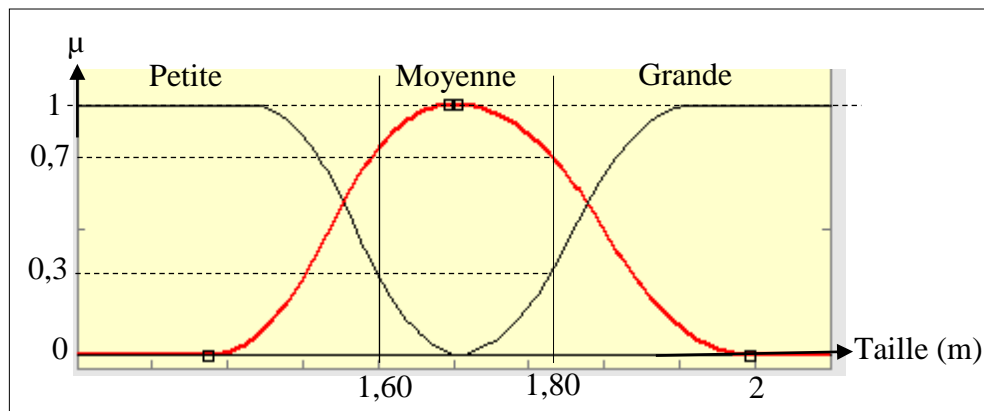


Figure II.4. Fonction d'appartenance, variables et termes linguistiques.

Cet exemple montre la gradualité que permet d'introduire la logique floue. Une personne de 1.80m appartient à l'ensemble « taille grande » avec un degré 0.3 et à l'ensemble « taille moyenne » avec un degré de 0.7. En logique classique, le passage de moyen à grand serait brusque. Une personne de 1.80m serait par exemple de taille moyenne alors qu'une personne de 1.81m serait grande, ce qui choque l'intuition,[4].

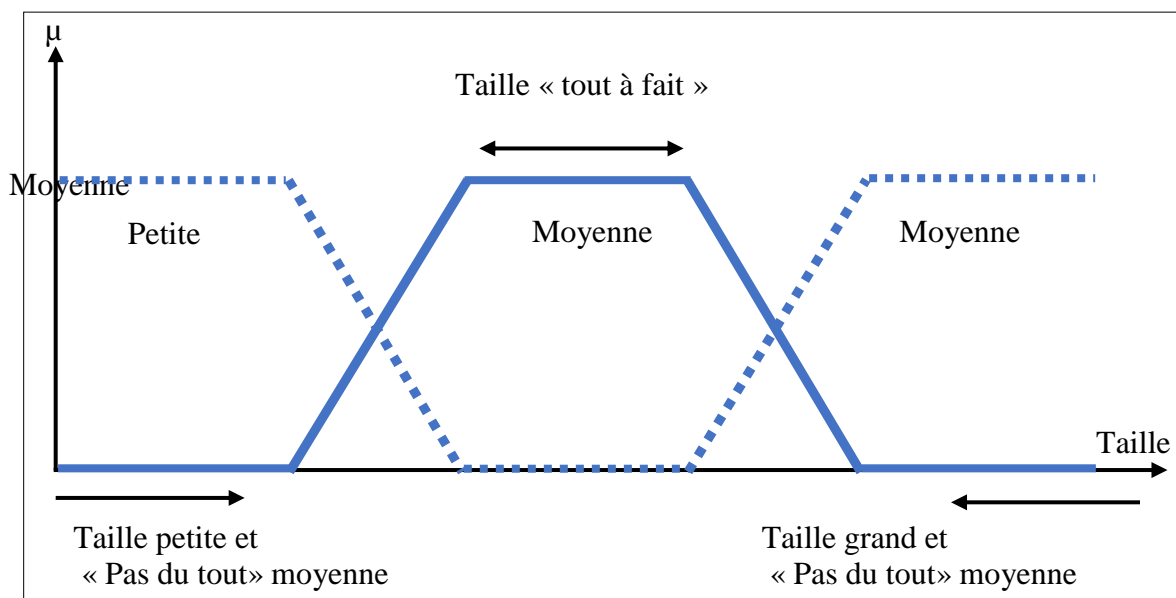


Figure II.5. Fonctions d'appartenance linéaires par morceaux.

La variable (par exemple : taille) ainsi que les termes (par exemple : moyenne, grande) définis par les fonctions d'appartenance portent respectivement les noms de

variable linguistique et de termes linguistiques. Comme cela sera vu plus loin, variables et termes linguistiques peuvent être utilisés directement dans des règles,[4].

Les fonctions d'appartenance peuvent théoriquement prendre n'importe quelle forme. Toutefois, elles sont souvent définies par des segments de droites, et dites « linéaires par morceaux » (figureII.5),[4].

Parmi les fonctions d'appartenance les plus utilisées aussi on cite : les fonctions triangulaires ; trapézoïdale ; gaussiennes...etc. [4]

La figure II.6 montre l'allure de ces fonctions [4].

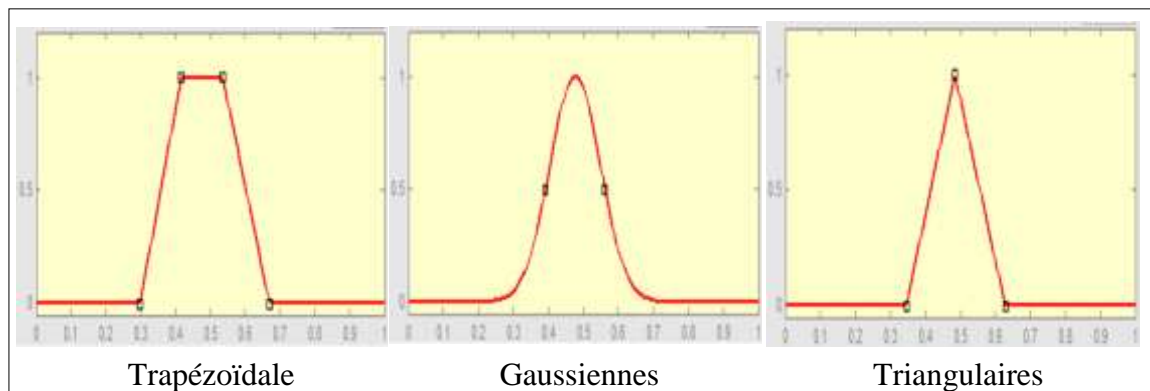


Figure II.6. Les différentes formes des fonctions d'appartenance.

II.3.4. Opérateurs logiques flous

Ces opérateurs permettent d'écrire des combinaisons logiques entre notions floues, c'est-à-dire de faire des calculs sur des degrés de vérité. Comme pour la logique classique, on peut définir des opérateurs ET, OU, négation [5].

- **Intersection**

L'opérateur logique correspondant à l'intersection d'ensemble est le ET, le degré de vérité de la proposition (A et B) est le minimum des degrés de vérité de A et de B, noté par $A \cap B$, est définie par :

$$u(A \text{ ET } B) = \text{MIN}(u(A), u(B))$$

- **Union**

L'opérateur logique correspondant à union d'ensemble est le OU le degré de vérité de la proposition (A ou B) est le maximum des degrés de vérité de A et de B est définie par :

:

:

$$u(A \text{ OU } B) = \text{MAX}(u(A), u(B))$$

- **Complément**

L'opérateur logique correspondant au complément d'un ensemble est la négation est définie par :

$$u(\text{NON } A) = 1 - u(A)$$

Des exemples sur les opérations sont représentés sur la (figure II.7).

L'intersection de A et B, noté par (a). Les opérations minimum, maximum et complément à 1 ont été choisies pour définir respectivement l'intersection, l'union et le complément d'ensembles flous Parce qu'ils préservent presque toute la structure de la théorie classique des ensembles.

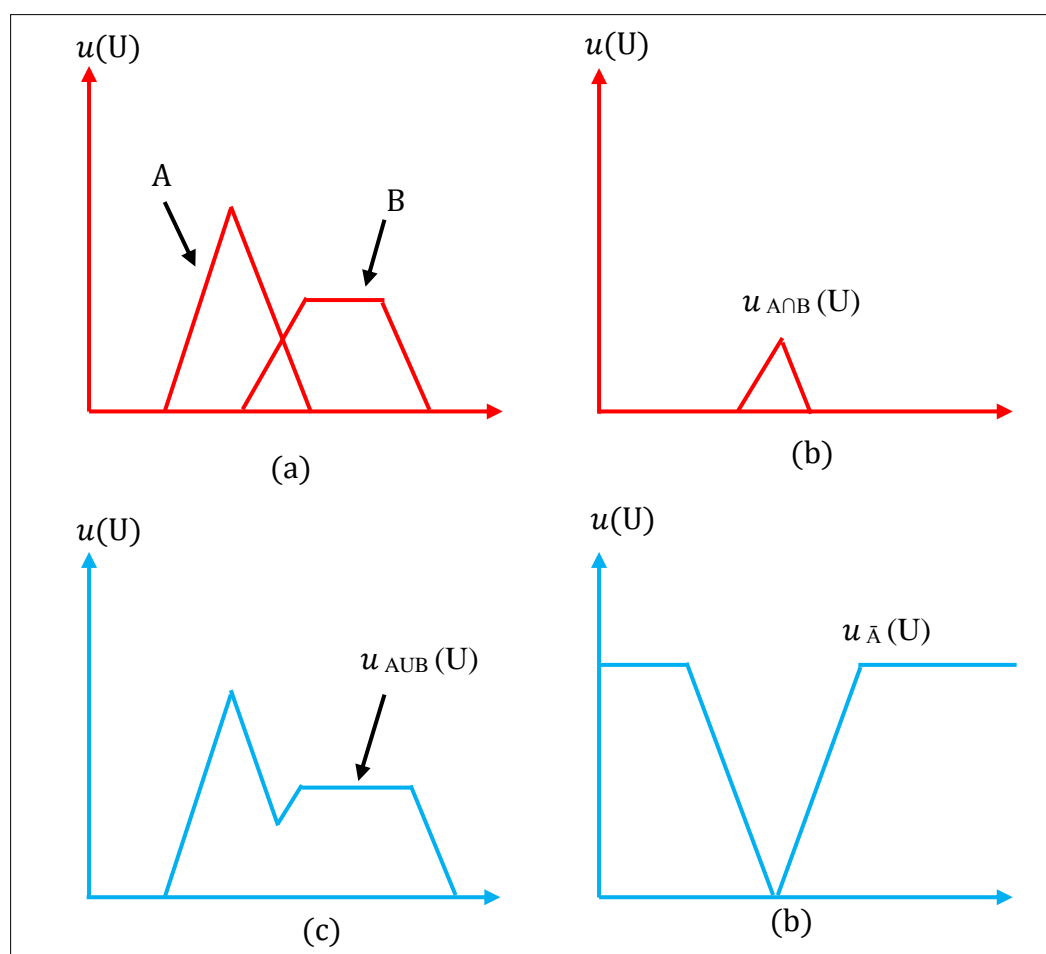


Figure II.7. Les différents opérateurs de la logique floue.

II.3.5. Règles linguistique

L'idée principale des systèmes basés sur la logique floue est d'exprimer la connaissance humaine sous la forme linguistique de forme de Si... alors...

Chaque règle a deux parties :

- Partie antécédente (prémisse ou condition), exprimée par Si...
- Partie conséquente (conclusion), exprime par Alors...

La partie antécédente est description de l'état du système. La partie conséquente exprime l'action que l'opérateur qui contrôle le système doit exécuter. Chaque règle floue est basée sur l'implication floue.

Il y a plusieurs formes de règles Si ... Alors ... la forme générale est :

Si (un ensemble de condition est satisfait) alors (un ensemble de conséquences peut être exécuté).

Zadeh a été le premier à introduire la notion de règle floue sous la forme,[5] :

Règle : Si x est A, alors y est B.

Exemple

Supposons qu'une règle linguistique du contrôle d'un système est :

Si la température est grande, alors la pression doit être petite.

Il est évident que la forme de cette règle est :

Si x est A, alors y est B

Où la température (x) et la pression (y) sont les variables linguistiques d'entrée et de sortie respectivement. La partie antécédente : Si la température est grande représente l'état du système à régler et la partie conséquente exprime l'action à exécuter par l'opérateur (dans ce cas il va diminuer la pression). Grande (A) et petite (B) sont les valeurs linguistiques caractérisées par des fonctions d'appartenance dans les univers du discours des variables linguistiques x et y respectivement.

II.3.6. Mécanisme d'inférence flou

Le mécanisme d'inférence flou consiste à calculer les valeurs de vérité des différentes règles et à associer à chacune d'elle une valeur de sortie qui dépend de sa partie conclusion.

II.3.6.1. Principe

Une base de règles floues comprend donc les règles linguistiques qui faisant appel à des fonctions d'appartenance figure (II.6).

Le mécanisme d'inférence comprend les étapes suivantes [5] :

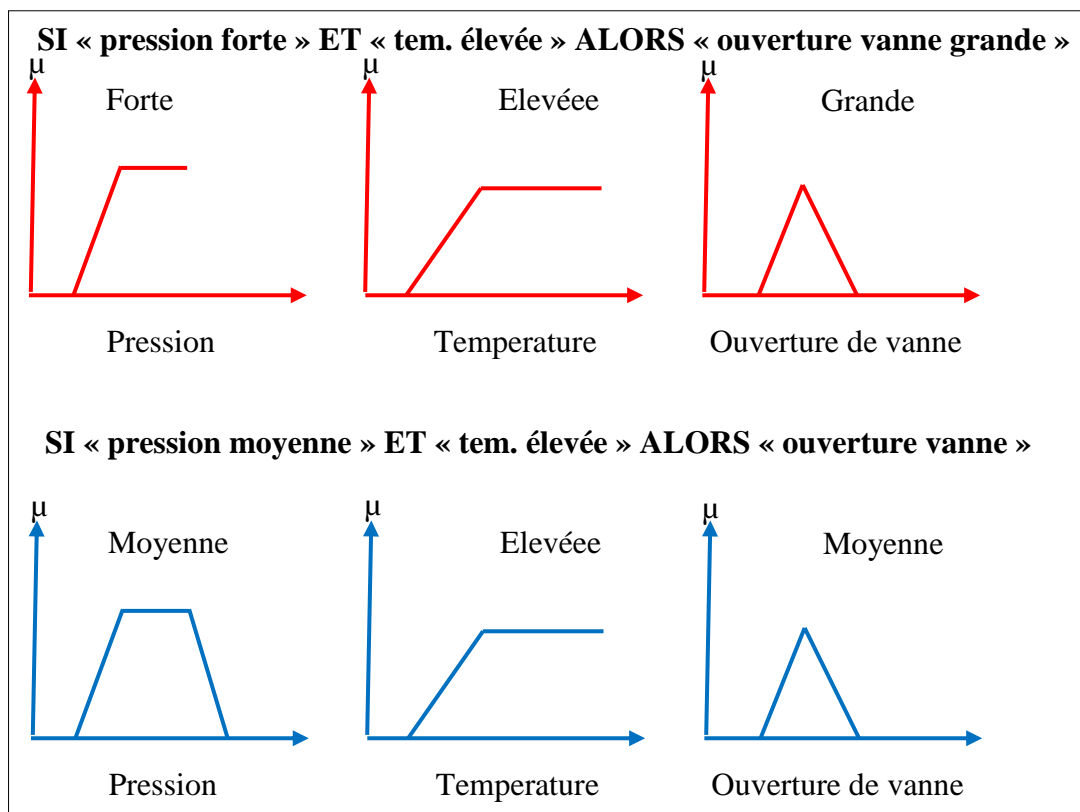


Figure II.8. Etapes de la mécanique d'inférence.

II.3.6.2. Fuzzification

Il s'agit de la conversion analogique/numérique, ainsi que du traitement de grandeurs mesurées et de leur transformation en valeur linguistique avec des définitions des fonctions d'appartenance [5].

Il existe deux manières de considérer la fuzzification qui rappellent le transforme la grandeur d'entrer en partie floue. Ces deux possibilités dépendent de l'ensemble sur lequel est définie la partie floue : un ensemble de nombres ou un ensemble de symboles linguistiques, [18].

II.3.6.3. Degré d'activation

Le degré d'activation d'une règle est l'évaluation des prédicats de chaque règle par combinaison logique des propositions du prédicat, [5].

SI « pression forte » ET « tem. élevée » ALORS « ouverture vanne grande »

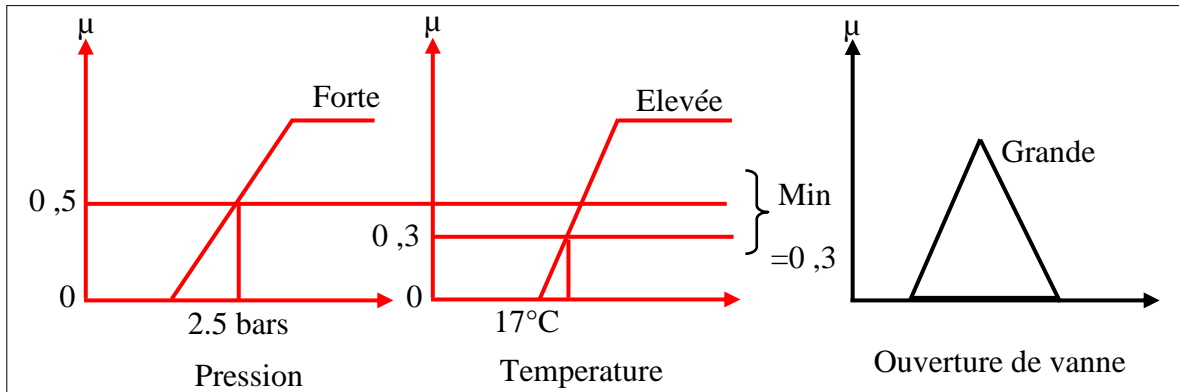


Figure II.9. Degré d'activation.

II.3.6.4. Implication

Le degré d'activation de la règle permet de déterminer la conclusion de la règle, c'est l'implication. Il existe plusieurs opérateurs d'implication, mais le plus utilisé est le minimum « ET ». L'ensemble de conclusion est construit en réalisant le minimum entre le degré d'activation et la fonction d'appartenance [5].

SI « pression forte » ET « tem. élevée » ALORS « ouverture vanne grande »

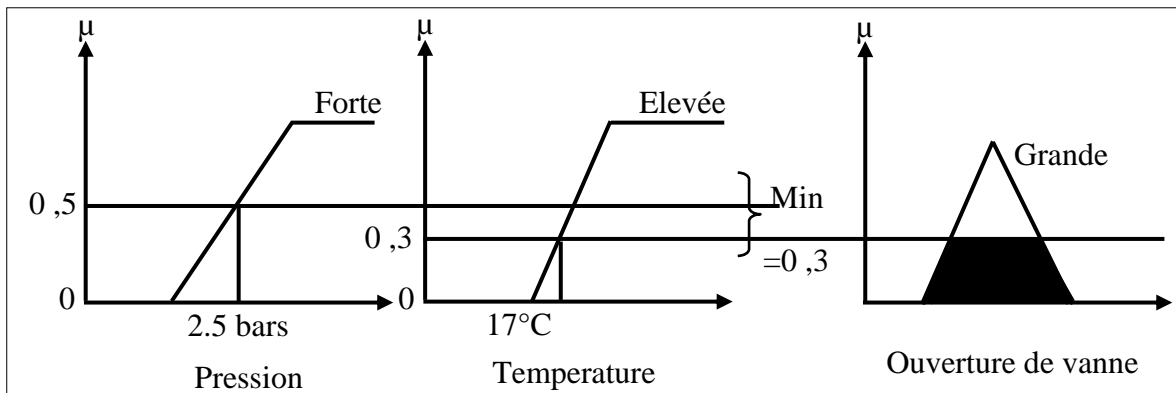


Figure II.10. Implication

II.3.6.5. Agrégation des règles

Lorsque la base de connaissance comporte plusieurs règles (comme notre exemple de la régulation de température), l'ensemble flou inféré B' est obtenu après une opération appelée agrégation des règles. En d'autres termes l'agrégation des règles utilise la contribution de toutes les règles activées pour en déduire une action de commande floue. Généralement, les règles sont activées en parallèle et sont liées par l'opérateur Ou [15].

Nous pouvons considérer que chaque règle donne un avis sur la valeur à attribuer au signal de commande, le poids de chaque avis dépend du degré de vérité de la conclusion,[15].

II.3.6.6.Défuzzification

Comme on l'a vu, les méthodes d'inférences fournissent une fonction d'appartenance résultante $\mu(z)$ pour la variable de sortie z . Il s'agit donc d'une information floue, il convient de la transformer en une grandeur précise.

La transformation d'une information floue en une information déterminée est la défuzzification (concrétisation). Pendant cette étape se fait la déduction de la grandeur de sortie numérique à partir de l'inférence floue, il s'agit de calculer à partir des degrés d'appartenance à tous les ensembles flous des variables d'entrées et des ensembles flous de la variable de sortie, une valeur numérique de la variable de sortie. Parmi les stratégies de défuzzification, nous citons la méthode de valeur maximale, la méthode de moyenne pondérée et la méthode de centre de gravité,[19].

a. Technique du maximum

Est la plus simple, elle consiste à ne considérer, pour chaque sortie, que la règle présentant le maximum de validité, c à d que la valeur de sortie est définie par la valeur maximale des variables floues de sortie.

Cette méthode est simple à appliquer mais, étant basée sur l'opérateur maximum, elle privilégie une seule règle parmi celles présentes, et ignore les règles secondaires qui peuvent néanmoins être importantes pour le fonctionnement et la stabilité du système. Elle est peu employée,[19].

b. Technique de la moyenne pondérée

Est plus évoluée. Elle considère, comme valeur de sortie, la moyenne des valeurs préconisées par chaque règle, pondérées par leurs degrés respectifs de validité. [19].

c. Technique du centre de gravité

Est plus performante : il s'agit de calculer le centre de gravité de la fonction d'appartenance de la variable de sortie.

Le calcul du centre de gravité permet bien d'obtenir une seule valeur pour la grandeur de sortie. Son calcul est cependant relativement complexe puisqu'il nécessite le calcul d'une intégrale, ou dans le cas simple de fonctions d'appartenance en raies (Figure II.11), d'une somme pondérée,[19].

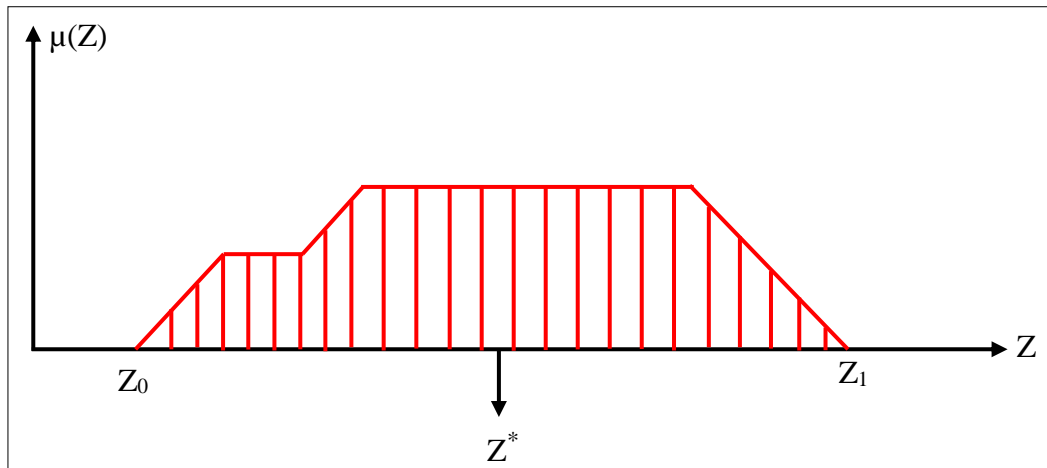


Figure II.11. Défuzzification par centre de gravité

L'abscisse de centre de gravité Z^* peut être déterminé à l'aide de la relation générale :

$$Z^* = \frac{\int_{z_0}^{z_1} z \mu(z) dz}{\int_{z_0}^{z_1} \mu(z) dz} \quad (1)$$

L'intégrale au dénominateur donne la surface, tandis que l'intégrale au numérateur correspond au moment de la surface, [17].

Dans le cas d'un univers de discours discret, cette méthode donne :

$$Z^* = \frac{\sum_{i=1}^n \mu(z_i) \cdot z_i}{\sum_{i=1}^n \mu(z_i)} \quad (2)$$

Avec :

n : nombre des niveaux de quantification.

Z_i : la valeur de la sortie pour le niveau i .

II.4. Méthodes d'inférences floues

Il existe plusieurs possibilités pour réaliser les opérateurs qui s'appliquent aux fonctions d'appartenance. On introduit la notion de méthode d'inférence, qui dépend des relations utilisées pour réaliser les différents opérateurs dans une inférence, permettant ainsi un traitement numérique de cette dernière. On cite les trois méthodes d'inférences les plus usuelles : Max-Min, Max-Produit et Somme Produit,[19].

II.4.1. Méthode de somme produit

La méthode d'inférence somme-produit réalise, au niveau de la condition, l'opérateur " OU " par la formation de la somme, plus précisément par la valeur moyenne, tandis que l'opérateur " ET " est réalisé par la formation du produit,[19].

La conclusion de chaque règle, précédée par " ALORS ", liant le facteur d'appartenance de la condition avec la fonction d'appartenance de la variable de sortie par l'opérateur "ET", est réalisée par la formation du produit. L'opérateur " OU" qui lie les différentes règles est réalisé de nouveau par la formation de la moyenne arithmétique. Pour mieux comprendre on va traiter l'exemple suivant :

Soit les deux entrées x et y : $x=0.44$, $y=-0.67$

- Si x est positif grand (PG) et y et environ zéro (EZ) alors z est EZ
- Si x est EZ ou y et négatif grand (NG) alors z est NG

Avec les valeurs d'appartenance :

$$\mu_{PG}(x=0.44) = 0.67, \mu_{EZ}(y=-0.67) = 0.2$$

$$\mu_{EZ}(x=0.44) = 0.33, \mu_{NG}(y=-0.67) = 0.67$$

La première règle d'inférence se réalise par le produit de deux fonctions d'appartenance $\mu(x)$ et $\mu(y)$, ce produit nous donne 0.13. Tandis que la deuxième règle sera réalisée par la moyenne arithmétique des deux fonctions d'appartenance $\mu(x)$ et $\mu(y)$ ce qui nous donne 0.5.

La fonction d'appartenance résultante $\mu_R(z)$ s'obtient par la formation de la valeur moyenne de deux fonctions d'appartenance de sorties partielles,[19].

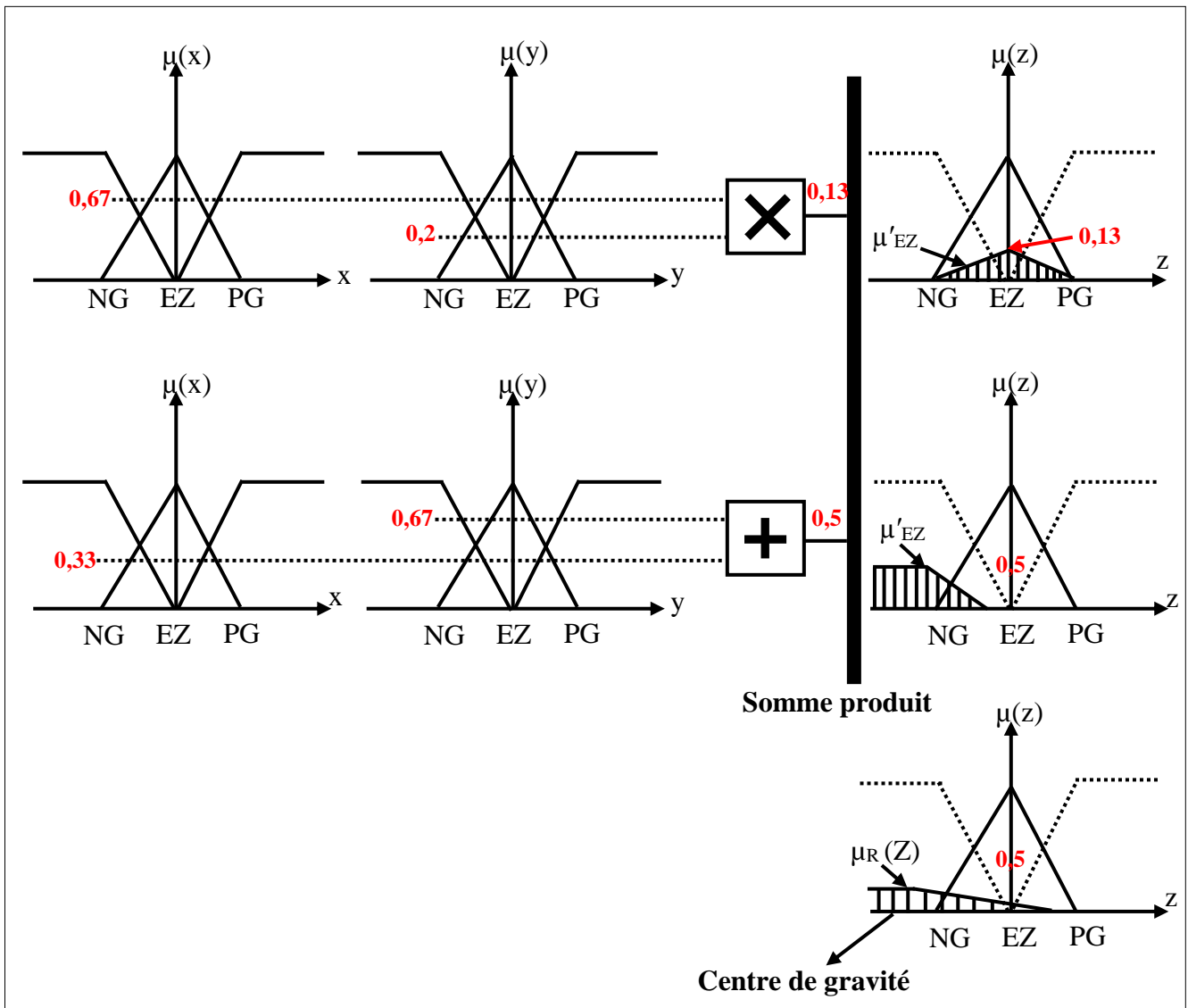


Figure II.12. Méthode d'inférence Somme-produit.

II.4.2. Méthode Min-Max

Cette méthode réalise, au niveau de la condition, l'opérateur OU par la formation du maximum et l'opérateur ET par la formation du minimum. La conclusion dans chaque règle, introduite par ALORS, lie le facteur d'appartenance de la condition avec la fonction d'appartenance de la variable de sortie (z) par l'opérateur ET, réalisé dans le cas présent par la formation du minimum. Enfin l'opérateur OU qui lie les différentes règles est réalisé par la formation du maximum.

A noter que la désignation de la méthode d'inférence (max-min dans le cas présent) se rapporte à la réalisation de OU liant les règles (max) et la réalisation de ALORS (min). La figure II.13.b représente graphiquement le principe de la méthode d'inférence max-min. La condition (x est A1 ET y est B1) de la première règle implique pour $x=x^*$ et $y=y^*$ les

facteurs d'appartenance $\mu_{A1}(x^*)$ et $\mu_{B1}(y^*)$ ce qui implique que la condition prend le facteur d'appartenance $\mu_{B1}(y^*)$ (minimum des deux valeurs à cause de l'opérateur ET) (Figure II.13.b), la fonction d'appartenance $\mu_{C1}(z)$ est donc écrêtée à $\mu_{B1}(y^*)$ (à cause de la formation du minimum lié à Alors).

De même pour la deuxième règle on trouve que la fonction d'appartenance $\mu_{C2}(z)$ est écrêtée à $\mu_{A2}(x^*)$ (Figure II.13.b). Il faut encore déterminer la fonction d'appartenance résultante Elle s'obtient par la formation du maximum des deux fonctions d'appartenances partielles, étant donné que les règles sont liées par l'opérateur OU,[19].

II.4.3. Méthode Max-prod

Cette méthode, réalise en générale, au niveau de la condition, l'opérateur OU par la formation du maximum et l'opérateur ET par la formation du minimum. Par contre, la conclusion dans chaque règle introduite par ALORS, qui lie le facteur d'appartenance de la condition avec la fonction d'appartenance de la variable de sortie (z) par l'opérateur ET, est réalisé cette fois ci par la formation du produit. L'opérateur OU qui lie les différentes règles est réalisé de nouveau par la formation du maximum.

Comme on le voit le OU, liant les règles est réalisé par la formation du maximum et le ALORS est réalisé par la formation du produit. D'où la désignation de cette méthode d'inférence par max-prod.

La représentation graphique du principe de la méthode d'inférence max-prod se trouve à la figure II.13.a.

Comme dans le cas du paragraphe précédent, la première condition prend le facteur d'appartenance $\mu_{B1}(y^*)$. La fonction d'appartenance $\mu_{C1}(z)$ pour la variable de sortie est cette fois ci multipliée par ce facteur ($\mu_{B1}(y^*)$), (à cause de la formation du produit lié à ALORS).

De la même manière pour la deuxième règle, la fonction $\mu_{C2}(z)$ sera multipliée par $\mu_{A2}(x^*)$ (formation du produit).

La fonction d'appartenance résultante s'obtient également par la formation du maximum des deux fonctions d'appartenance partielles, réalisent ainsi l'opérateur OU entre les règles. [19]

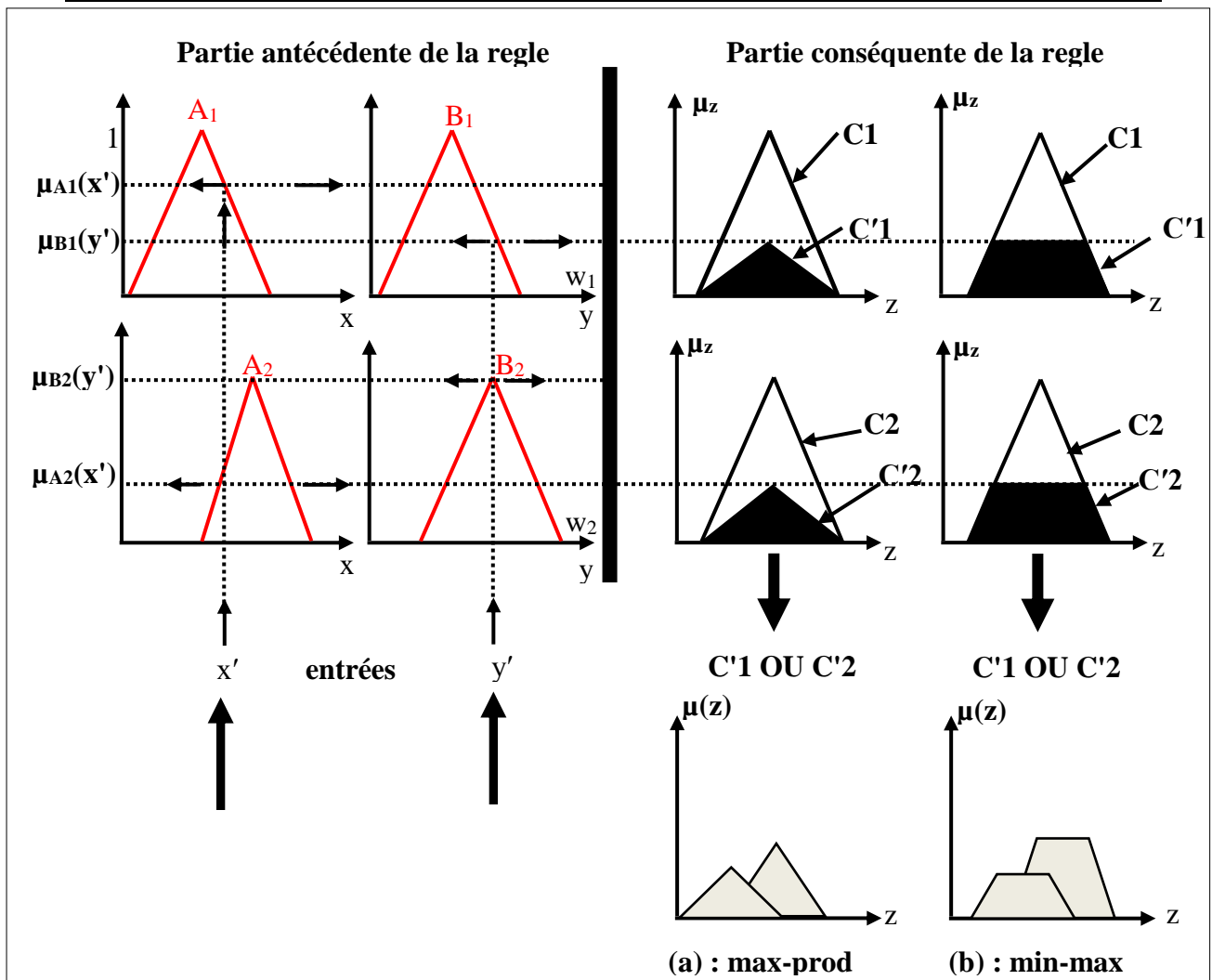


Figure II.13. Méthode d'inférence Max Min et Max prod.

II.5. Structure générale d'un système flou

Chaque système basé sur la logique floue est composé des blocs suivants :

- a) Base de connaissances (paramètres des fonctions d'appartenance), Elle est composée :
- D'une base de données qui fournit les définitions des concepts nécessaires utilisées pour définir les règles linguistiques et la manipulation des données floues. Ces concepts sont subjectivement définis et basés sur l'expérience et le jugement de l'expert,[19]
 - D'une base de règles qui est l'ensemble d'expressions linguistiques basé sur la connaissance d'un expert ou bien la logique de fonctionnement du processus. Cette connaissance et d'habitude formulée sous forme de règles " SI-ALORS ". Chacune de ces règles est composée d'une ou plusieurs prémisses reliées entre elles généralement par l'opérateur flou "ET"ou "OU "; et une conclusion précédée par l'opérateur "ALORS".
- L'ensemble des règles floues sont reliées entre elles généralement par l'opérateur flou "OU".

- b) Fuzzification qui est la transformation des entrées précises en degrés d'appartenance

c) Defuzzification qui consiste en la transformation des résultats flous en sorties précises.

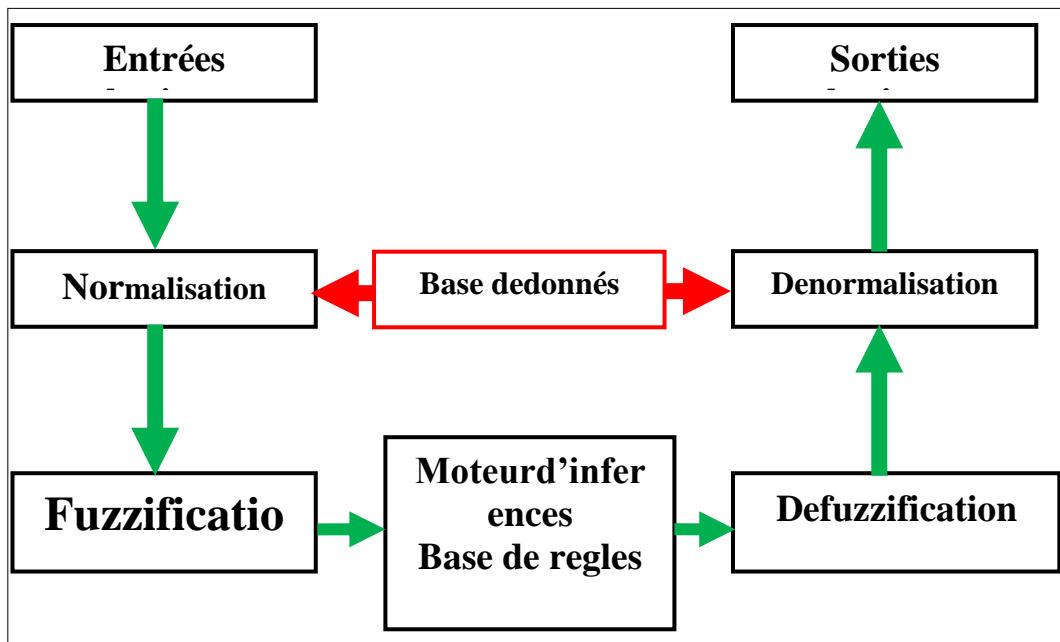


Figure II.14. Schéma général d'un système

II.6. Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons introduit les notions de base de la théorie des ensembles flous et de la logique floue. Alors nous pouvons dire que la logique floue ouvre des possibilités remarquables de codification des connaissances des experts. La mise en place d'un système floue nécessite donc une attention particulière lors de la phase de test de manière à détecter les éventuelles aberrations du système. Dans le dernier chapitre, nous présentons une étude sur l'estimation de la valeur de la tension de contournement d'un isolateur réel 1512L largement utilisé par la société algérienne de l'électricité et de gaz (SONELGAZ) avec l'introduction de la logique floue, nous avons utilisé le module FUZZY LOGIC TOOLBOX (sous MATLAB). Dans le dernier chapitre nous avons exploité la base de données de littérature pour créer notre modèle.



Chapitre III

Estimation De La
Tension De
Contournement En
Utilisant La Logique
Floue (LF)

III.1. Introduction

L'objectif dans cette partie est de estimé (predire) la tension de contournement dans des conditions électro-géométrique différent tel que la conductivité, les niveaux de la pollution. La technique basée sur la logique floue (LF), "en anglais Fuzzy Logic (FL)" a été appliquée.

Dans ce dernier chapitre nous présenterons la méthodologie suivie pour estimé la tension de contournement d'un modèle réel d'isolateur de haute tension 1512 L ainsi l'exploitation des résultats obtenus durant notre travail sera présentée et interprétée dans les conditions normales et avec différentes configurations électro-géométriques.

Nous introduisons la technique de la logique floue (LF) en se basant sur les données expérimentale publiées par notre encadreur pour estimé la valeur de la tension de contournement. En fin une interprétation des résultats trouvés.

III.2. Présentation du model 1512L

L'isolateur réel 1512L est constitué d'un bloc isolant portant à sa partie supérieure un capot scellé en fonte malléable et à l'intérieur une tige en acier, avec cannelures et dont la tête conique est également scellée dans le verre. L'extrémité inférieure de cette tige est arrondie et a les dimensions voulues pour pénétrer dans le capot de l'élément suivant et y être maintenue par une goupille. [21]

La pollution est présentée par quatre zones Z_1 , Z_2 , Z_3 , Z_4 . Nous commençons par une variation de la largeur de la couche de pollution (largeur de la couche polluante N_i) de 0 (propre) à 100% (pollution uniforme), puis de la même manière pour les différentes conductivités. (figure III.1).

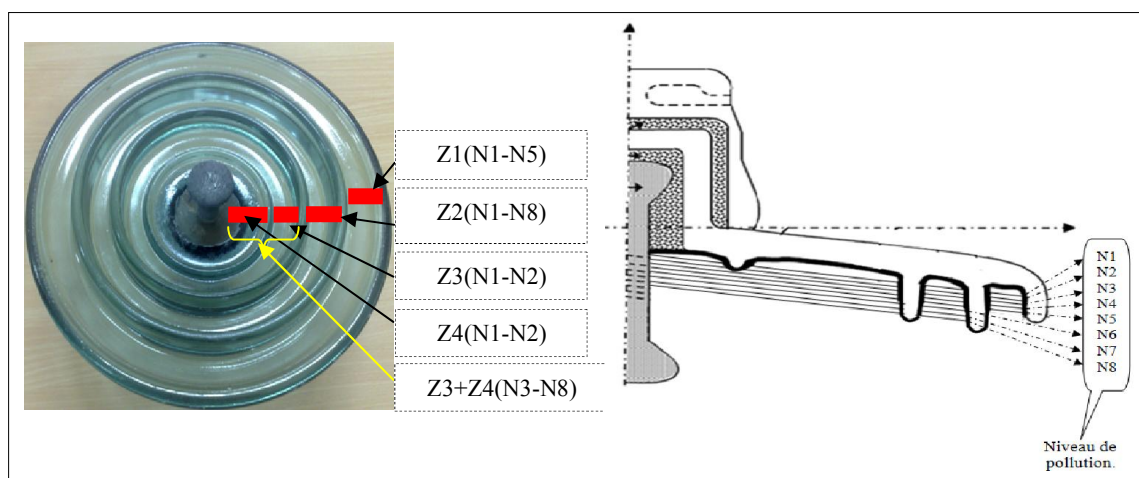


Figure III.1. Modèle réel de l'isolateur 1512L, plein pollution.

Nous avons présenté la théorie de la technique de l'intelligence artificielle et la méthodologie utilisée pour prédire la tension de contournement d'un modèle réel d'isolateur de haute tension 1512L dans différentes conditions électro-géométriques telles que la conductivité ainsi les niveaux de pollution. La technique basée sur la logique floue (LF), "en anglais Fuzzy Logic (FL)" a été appliquée.

III.3. Prediction de la tension de contournement par la logique floue

Dans cette partie, nous utiliserons la logique floue pour déterminer la valeur de la tension de contournement pour les cinq paramètres ($\delta=(\text{mS/cm})$, Z_i (Z_1, Z_2, Z_3, Z_4). Sachant que : " δ " est la conductivité, "Z" sont les zones de pollution. La logique floue à pour objectif de formuler et de mettre en œuvre le raisonnement humain. L'avantage de l'utilisation de la logique floue pour la prédiction de la tension de contournement. Le concept flou proposé, est formé par un système d'inférence flou (SIF) illustré sur la figure (III.2).

Un système à logique floue prend comme entrée les données imprécises et les expressions vagues (comme petit, moyen, grand) et fournit des décisions sur des variables de sorties elles-mêmes floues [22].

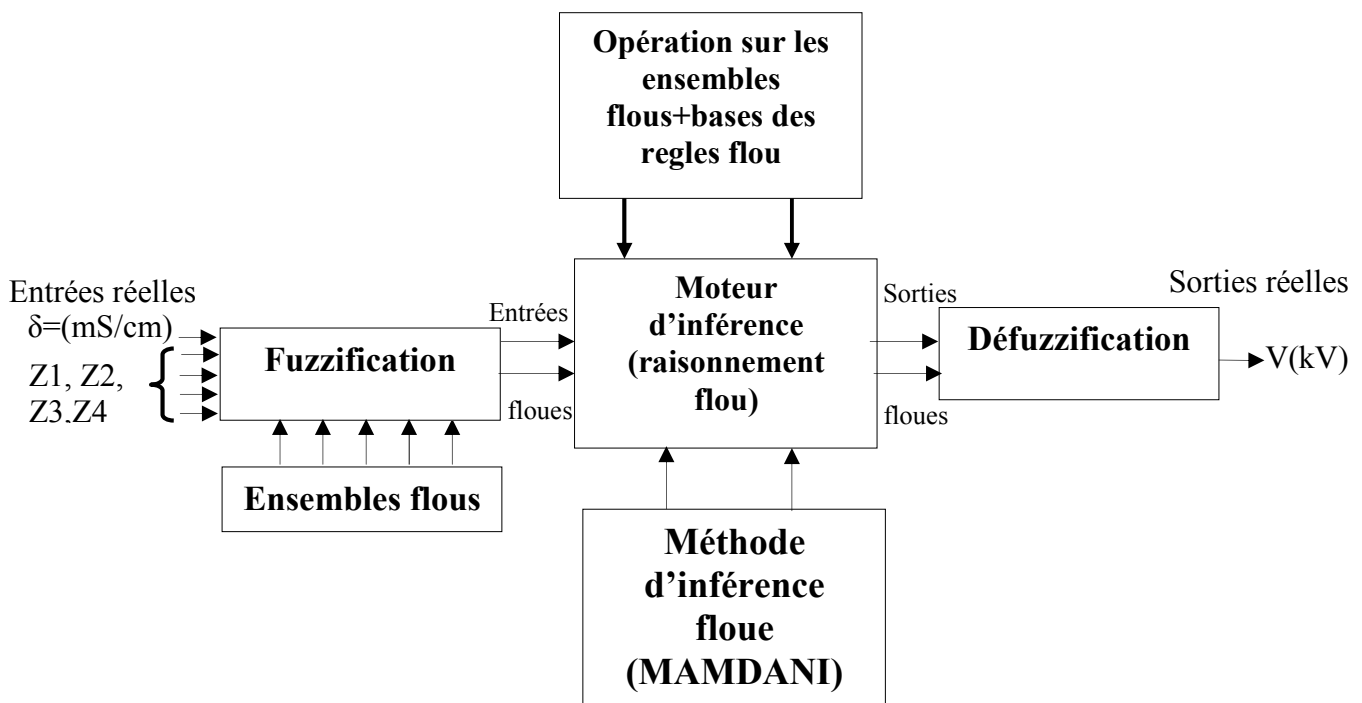


Figure III.2. Architecture d'un système d'inférence floue(SIF)

Pour appliquer ce concept à l'étude de la prédiction de la tension de contournement ; des entrées (la conductivité et les zones de pollution) et une sortie (la tension de contournement) seront d'abord définies sous forme de variables linguistiques comme indiqué sur le tableau (III.2).

La formulation de notre problème en logique floue nécessite la définition de :

- Les entrées et sorties du SIF : Les entrées et sorties choisies pour notre étude sont données dans le tableau (III.1).
- Les caractéristiques floues (valeurs de vérité : "petit, grand...") : Ils sont mentionnés dans le tableau (III.2).
- Les univers de discours (intervalles de ces valeurs de vérité) des variables d'entrées et sortie : Ils sont définis dans le tableau (III.2).
- Les fonctions d'appartenance des variables d'entrées et sortie : Elles sont montrées dans les figures (III.3-III.8).
- Les règles d'inférences floues : Elles sont organisées dans la table (III.3).

Tableau III.1. Variables d'entrées et sorties

| Entrées | | Sortie | |
|-------------------------------------|--------------------|---------|--------------------------|
| Symbole | Désignation | Symbole | Désignation |
| δ (ms/cm) | La conductivité | V (kV) | Tension de contournement |
| Z_i (Z_1, Z_2, Z_3, Z_4) (ml) | Zones de pollution | | |

III.3.1. Fuzzification

III.3.1.1. Variables linguistiques et intervalles flous

Le fuzzification intervalle de chaque variable langage on le tableau suivant sont choisis pour inclure toutes les valeurs qui peuvent indiquer l'une des étapes de contournement. Les valeurs de tension "T" ci-dessous "20 kV" signifient qu'aucune étape n'est atteinte. [22]

Tableau III.2. Décomposition de la variable d'entrées et de sortie.

| Entrées | | | | | | | | | | sorties | |
|---|--------------------------|--|------------------|-----------------------|------------------|-----------------------|------------------|-----------------------|------------------|-------------------------------|---------------------|
| Variables linguistiques des entrées et sorties et leurs univers de discours | | | | | | | | | | | |
| Conductivité δ [mS/cm] | | Zone Z1 (ml) | | Zone Z2 (ml) | | Zone Z3 (ml) | | Zone Z4 (ml) | | Tension de contournement (kV) | |
| TL | s | TL | s | TL | s | TL | s | TL | S | TL | s |
| TPC | Très petite conductivité | PQ₁ | Petite quantité | PQ₂ | Petite quantité | PQ₃ | Petite quantité | PQ₄ | Petite quantité | TPT | Très petite tension |
| PC | Petite conductivité | MQ₁ | Moyenne quantité | MQ₂ | Moyenne quantité | MQ₃ | Moyenne quantité | MQ₄ | Moyenne quantité | PT | Petite tension |
| MC | Moyennes conductivité | GQ₁ | Grande quantité | GQ₂ | Grande quantité | GQ₃ | Grande quantité | GQ₄ | Grande quantité | MT | Moyenne tension |
| GC | Grande conductivité | TL : Terme linguistique S : signification et intervalle floue | | | | | | | | GT | Grande tension |
| TGC | Très grande conductivité | | | | | | | | | TGT | Très grande tension |

III.3.1.2. Fonctions d'appartenances

Les figures (III.3-III.8) montrent les formes des fonctions d'appartenances des entrées et sortie du SIF (système inference floue) que nous utiliserons pour la prédiction de la tension de contournement comme sera bien détaillé dans ce qui suit.

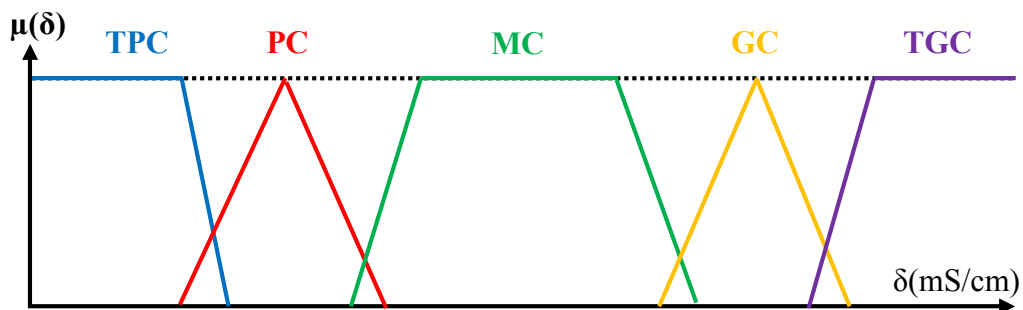


Figure III.3. Fonction d'appartenance de la conductivité

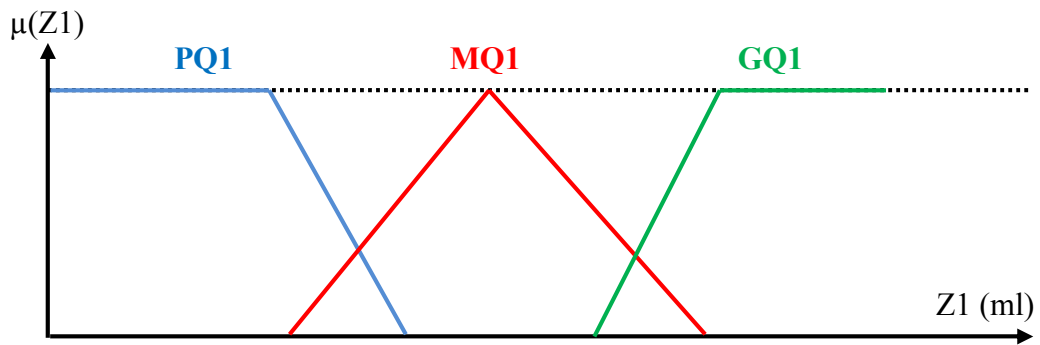


Figure III.4. Fonction d'appartenance de zone 1.

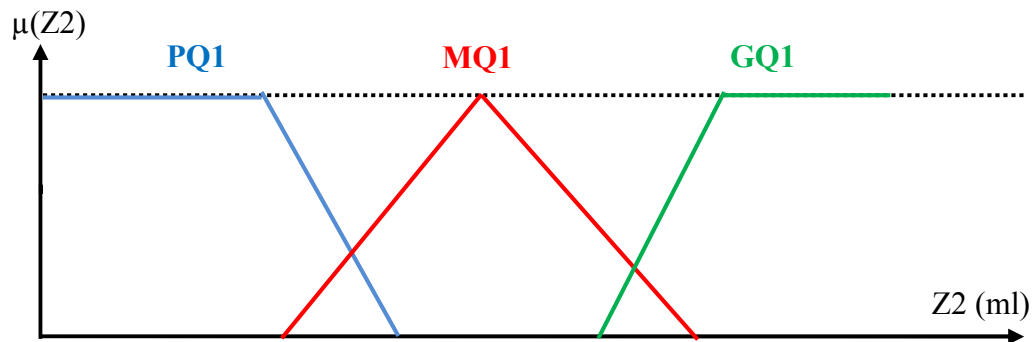


Figure III.5. Fonction d'appartenance de zone 2.

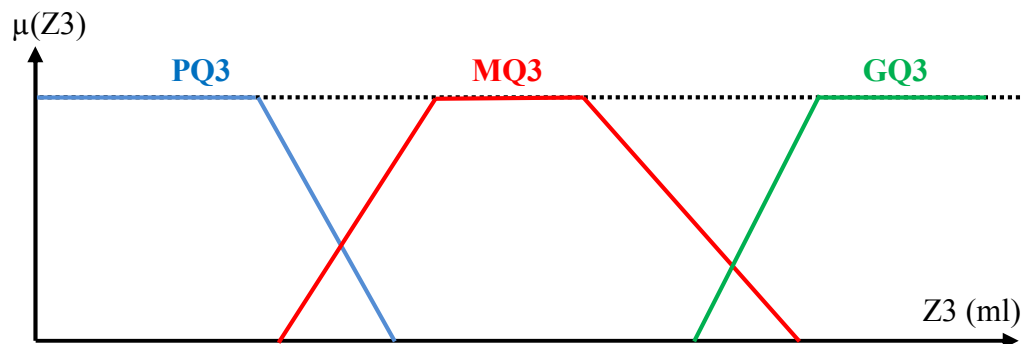


Figure III.6. Fonction d'appartenance de zone 3.

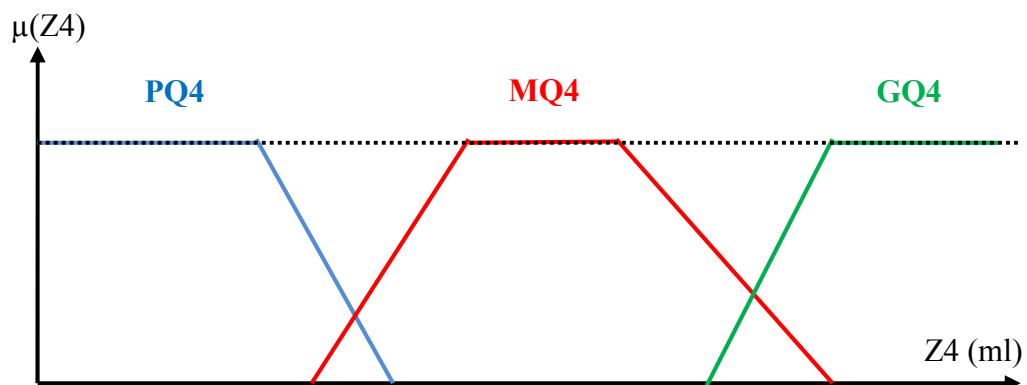


Figure III.7. Fonction d'appartenance de zone 4.

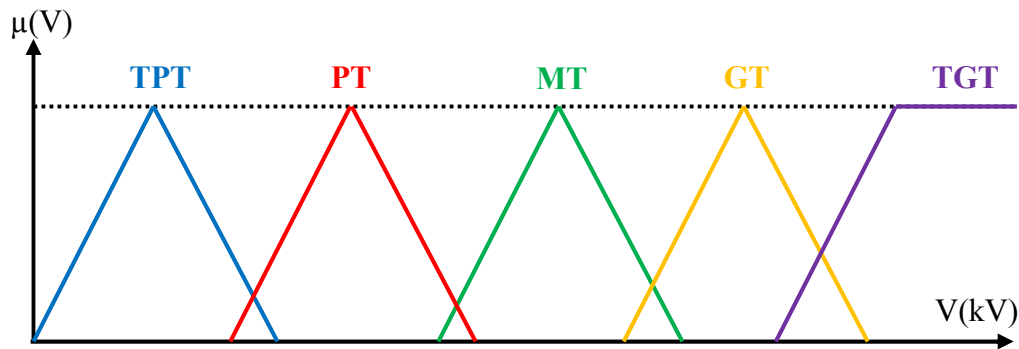


Figure III.8. Fonction d'appartenance de la sortie.

III.3.2. Règles floues

Le choix des règles floues semble facile, par contre il est un des problèmes posés dans l'implémentation des algorithmes flous, de nombreuses méthodes d'extraction des règles ont été proposées pour résoudre ce problème. Ces méthodes sont groupées selon leur principe en deux catégories [22].

III.3.2.1. Méthodes d'extraction naturelle

Parmi les méthodes utilisées, nous citons :

a. Méthodes basées sur un savoir-faire d'un expert

Avec cette méthode, les règles sont établies par un expert ou un opérateur qualifié.

b. Méthodes basées sur la modélisation des actions d'un opérateur

En utilisant cette stratégie, les règles floues sont érigées en observant l'opérateur en train de manipuler un système d'étude.

III.3.2.2. Méthode d'extraction automatique

Plusieurs méthodes auto-adaptatives ont été proposées récemment pour automatiser la détermination des règles floues. Ces méthodes sont très utiles dans le cas où aucun expert n'est disponible et où l'on dispose de grandes quantités de données concernant le problème à traiter.

III.3.2.3. Etablissement des règles floues

En effet, comme il n'existe aucune méthode pour établir les règles du comportement d'un système flou, la mise en œuvre d'un système à LF n'en est que plus difficile. Par contre, le savoir-faire ou l'expertise doit absolument exister pour rendre possible l'utilisation d'un système flou. L'élaboration des règles floues est d'autant plus facile lorsque ce savoir-faire existe [22].

Dans notre étude, nous n'avons pas réalisé des expériences pratiques dans un laboratoire spécialisé pour bien élaborer l'ensemble des règles floues de notre **SIF** utilisé, mais nous sommes basés sur les travaux effectués par notre encadreur pour collecter une base de données utilisée durant ce chapitre que ce soit pour l'établissement des règles floues ou pour la validation de notre système de prédiction à base de LF.

Pour tenir compte de tous les cas et des états intermédiaires, une matrice (table) d'inférence (tableau (III.3)) sera utilisée. Cette matrice permet d'illustrer 405 ($5*3*3*3*3$) règles pour calculer la sortie "V" pour les différentes entrées (δ , Z1, Z2, Z3, Z4).

En effet, nous avons proposé un premier jeu de règles établi, ensuite nous avons ajusté ces règles ainsi que les fonctions d'appartenance pour améliorer les résultats selon les données expérimentales collectées. La table d'inférence (III.3) contient les meilleures règles floues qui ont donné les meilleures sorties. La méthode de collection de ces règles rentre dans le cadre des méthodes d'extraction naturelle des règles floues en se référant à un savoir-faire d'un expert.

L'ajustement des fonctions d'appartenance sera détaillé durant cette session du travail.

Quelques-unes des règles proposées sont:

- Si (Conductivité (mS/cm) est TPC) ET (Z1(ml) est PQ1) ET (Z2(ml) est PQ2) ET (Z3(ml)

est PQ3) ET (Z4(ml) est PQ4) ALORS (tension de contournement (kV) est TGT)

- Si (Conductivité (mS/cm) est MC) ET (Z1(ml) est GQ1) ET (Z2(ml) est GQ2) ET (Z3(ml)

est PQ3) ET (Z4(ml) est PQ4) ALORS (tension de contournement (kV) est MT)

- Si (Conductivité (mS/cm) est PC) ET (Z1(ml) est MQ1) ET (Z2(ml) est MQ2) ET (Z3(ml)

est PQ3) ET (Z4(ml) est PQ4) ALORS (tension de contournement (kV) est GT)

- Si (Conductivité (mS/cm) est TGC) ET (Z1(ml) est GQ1) ET (Z2(ml) est PQ2) ET (Z3(ml)

est MQ3) ET (Z4(ml) est MQ4) ALORS (tension de contournement (kV) est TPT)

...

....etc.

Les variables d'entrée sont liées par l'opérateur ET, tandis que la variable de sortie des différentes règles sont combinées par l'opérateur OU, afin d'obtenir la variable de sortie de l'inférence.

| | | | TPC | | | PC | | | MC | | | GC | | | TGC | | | |
|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|
| | | | PQ1 | MQ1 | GQ1 | PQ1 | MQ1 | GQ1 | PQ1 | MQ1 | GQ1 | PQ1 | MQ1 | GQ1 | PQ1 | MQ1 | GQ1 | |
| PQ4 | PQ3 | PQ2 | TGT | GT | GT | GT | GT | MT | GT | GT | MT | MT | MT | MT | PT | PT | PT | |
| | | MQ2 | GT | GT | GT | GT | GT | MT | GT | MT | MT | MT | MT | MT | PT | PT | PT | |
| | | GQ2 | GT | GT | GT | GT | MT | MT | GT | MT | MT | MT | MT | MT | PT | PT | PT | |
| | MQ3 | PQ2 | | | | | | | | | | | | | | | | |
| | | MQ2 | | | | | | | | | | | | | | | | |
| | | GQ2 | | | | | | | | | | | | | | | | |
| | GQ3 | PQ2 | | | | | | | | | | | | | | | | |
| | | MQ2 | | | | | | | | | | | | | | | | |
| | | GQ2 | | | | | | | | | | | | | | | | |
| MQ4 | PQ3 | PQ2 | | | | | | | | | | | | | | | | |
| | | MQ2 | | | | | | | | | | | | | | | | |
| | | GQ2 | | | | | | | | | | | | | | | | |
| | MQ3 | PQ2 | MT | MT | MT | MT | MT | MT | MT | MT | MT | MT | MT | MT | PT | PT | PT | TPT |
| | | MQ2 | MT | MT | MT | MT | MT | MT | MT | MT | MT | PT | MT | PT | PT | PT | TPT | TPT |
| | | GQ2 | MT | MT | MT | MT | MT | PT | MT | MT | PT | PT | PT | PT | PT | PT | TPT | TPT |
| GQ3 | PQ2 | MT | MT | MT | MT | MT | MT | MT | MT | MT | MT | MT | MT | PT | PT | PT | TPT | |
| | MQ2 | MT | MT | MT | MT | MT | MT | MT | MT | PT | MT | PT | PT | PT | PT | TPT | TPT | |
| | GQ2 | MT | MT | MT | MT | MT | PT | MT | MT | PT | PT | PT | PT | PT | PT | TPT | TPT | |
| GQ4 | PQ3 | PQ2 | | | | | | | | | | | | | | | | |
| | | MQ2 | | | | | | | | | | | | | | | | |
| | | GQ2 | | | | | | | | | | | | | | | | |
| | MQ3 | PQ2 | MT | MT | MT | MT | MT | MT | MT | PT | PT | PT | PT | PT | PT | PT | PT | PT |
| | | MQ2 | MT | PT | PT | MT | PT | PT | PT | PT | PT | PT | PT | PT | PT | PT | PT | PT |
| | | GQ2 | PT | PT | PT | PT | PT | PT | PT | PT | PT | TPT | TPT | TPT | TPT | TPT | TPT | TPT |
| GQ3 | PQ2 | MT | MT | MT | MT | MT | MT | MT | PT | PT | PT | PT | PT | PT | PT | PT | PT | |
| | MQ2 | MT | PT | PT | MT | PT | PT | PT | PT | PT | PT | PT | PT | PT | PT | PT | PT | |
| | GQ2 | PT | PT | PT | PT | PT | PT | PT | PT | PT | TPT | TPT | TPT | TPT | TPT | TPT | TPT | |

Par contre si l'on choisi des valeurs numériques quelconques pour les entrées (δ , $Z1$, $Z2$, $Z3$, $Z4$), le système d'inférence flou procède à l'agrégation des règles pour avoir la "surface réponse". La sortie du modèle correspond au centre de gravité de cette surface (Defuzzification). A noter que nous avons choisi la méthode de raisonnement de type Min-max (raisonnement Mamdani) pour déterminer la sortie de chaque règle activée et la méthode du centre de gravité de la "surface réponse" pour calculer la valeur numérique de la sortie "V" correspondant aux entrées (δ , $Z1$, $Z2$, $Z3$, $Z4$). Selon l'appartenance de la valeur de "V" calculée à l'un des intervalles flou de l'ensemble flou "V", nous pouvons prédire la tension de contournement pour les entrées (δ , $Z1$, $Z2$, $Z3$, $Z4$) comme indiquée dans le tableau (III.3).

III.3.3. Mise en œuvre du système d'inférence floue

L'interface graphique Fuzzy logic toolbox disponible sous Matlab sera exploitée dans cette partie de ce chapitre pour la mise en œuvre du système d'inférence flou (SIF) pour la prédiction la tension de contournement. Une description détaillée de l'implémentation de notre système d'inférence flou (SIF) sera présentée dans ce qui suit.

III.3.3.1. Implémentation du système d'inférence floue (SIF) sous MATLAB

Le système d'inférence floue FIS (Fuzzy Inference System) sous MATLAB se compose de cinq parties [22]:

- Une base de règles pouvant contenir un certain nombre de règles floues (SI-ALORS).
- Une base de données qui définira les fonctions d'appartenance des entrées introduites.
- Une unité de prise de décision qui effectue l'opération d'inférence par les règles floues.
- Une interface de Fuzzification qui définit pour chaque entrée réelle son degré d'appartenance de sa fonction d'appartenance.
- Une interface de Défuzzification qui transforme les résultats flous en une sortie nette.

L'interface graphique d'inférence (Fuzzy Inference System, ou FIS en abrégé) sous MATLAB permet d'implémenter notre "SIF" utilisé pour calculer la tension de contournement en introduisant les entrées (δ , $Z1$, $Z2$, $Z3$, $Z4$).

La figure (III.9) montre le schéma bloc de notre SIF créé en utilisant l'interface graphique (FIS) sous MATLAB qui se compose de la base de données représentée par les fonctions d'appartenance des variables d'entrée et de la sortie ainsi que la base de règles (Tableau III.3) qui sont souvent regroupées pour former la base de connaissances.

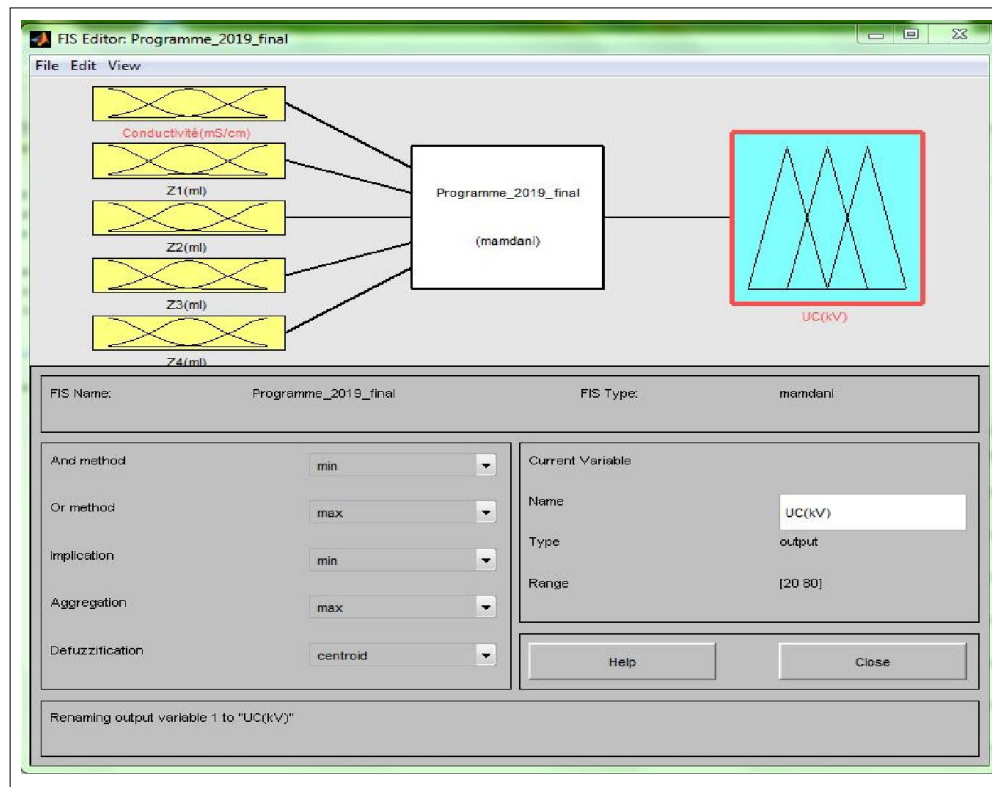


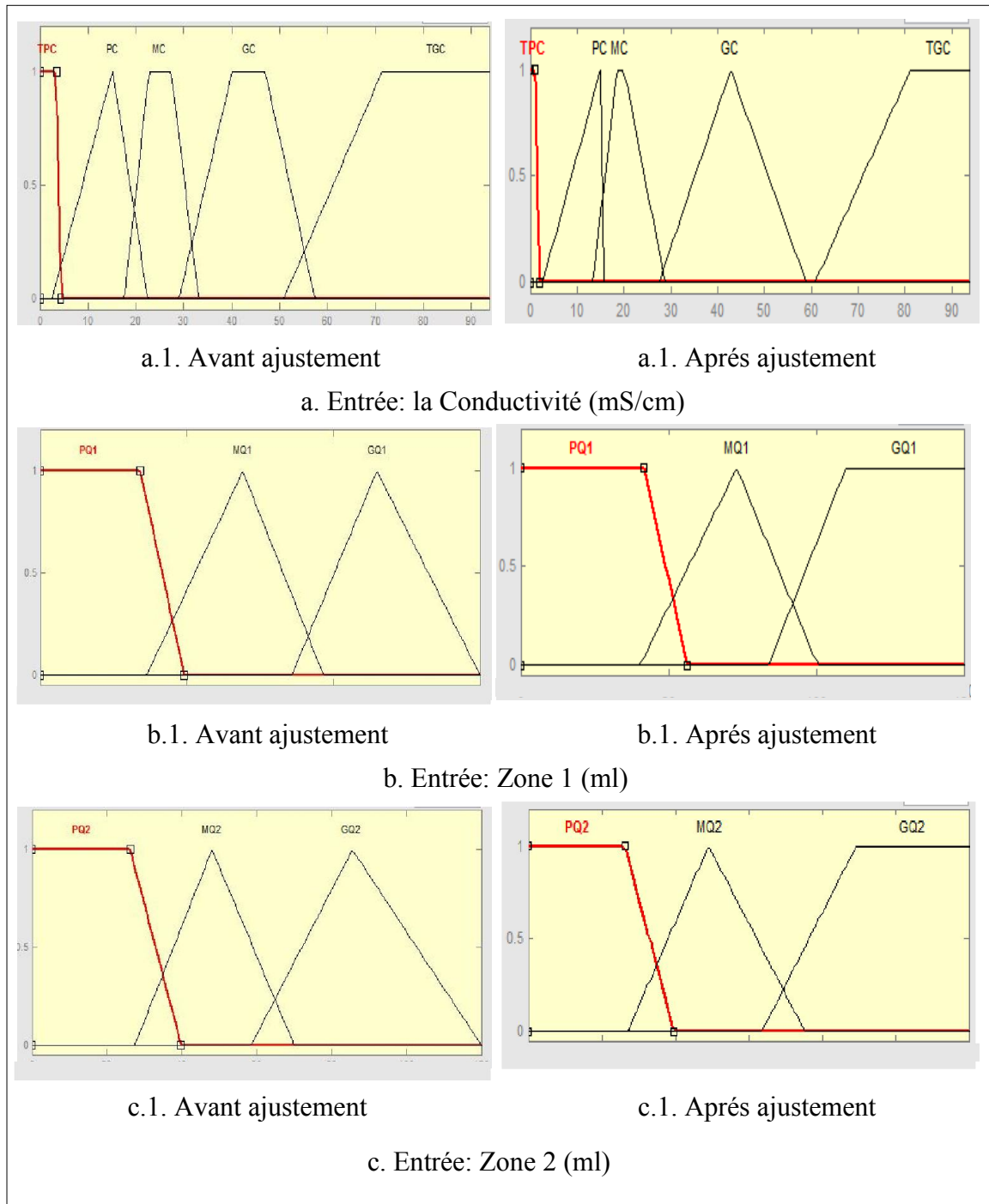
Figure III.9. Fenêtre principale de l'éditeur du système d'inférence flou "Fis Editor" utilisé.

À partir de l'éditeur de l'interface graphique (FIS), il est possible de choisir le type de l'agrégation. Nous avons choisi l'opérateur Min pour ET, Max pour OU et l'opérateur Max pour l'agrégation). Pour l'implication nous avons choisi l'opérateur min et pour la Défuzzification nous avons choisi la méthode de centre de gravité.

a. Fuzzification des variables d'entrées et de sortie

Les intervalles de variations de chaque variable floue sont donnés par le tableau (III.2). Ce tableau donne aussi les domaines de variation de chaque fonction d'appartenance des variables linguistiques choisies et le nombre des intervalles flous ainsi que le nombre des variables linguistiques des variables d'entrées (δ , Z1, Z2, Z3, Z4) et celle de la sortie "V". Il est à noter que les premiers résultats obtenus donnent un pourcentage de prédictions erronées supérieur à celui des prédictions correctes relativement aux resultants pratiques. Pour améliorer ces premiers résultats, nous avons effectué des ajustements des forms des fonctions d'appartenance comme suit: A chaque fois que nous avons changer la forme (allure) des fonctions d'appartenances de chaque variable floue, nous vérifions la totalité des résultats obtenus en vérifiant le pourcentage des prédictions erronées par rapport à ceux correctes. Nous avons gardé les formes des

fonctions d'appartenance qui donnent un pourcentage acceptable des prédictions correctes en les comparant aux données pratiques collectées de la littérature. Ces ajustements des formes des fonctions d'appartenance sont fait d'une façon à ne pas avoir de chevauchements important de ces fonctions et de garder leurs formes trapézoïdales et triangulaires déjà choisie. La figure (III.10) illustre les formes des fonctions d'appartenance des entrées et sortie du SIF implanté en utilisant Fuzzy logic toolbox sous Matlab avant et après ajustement.



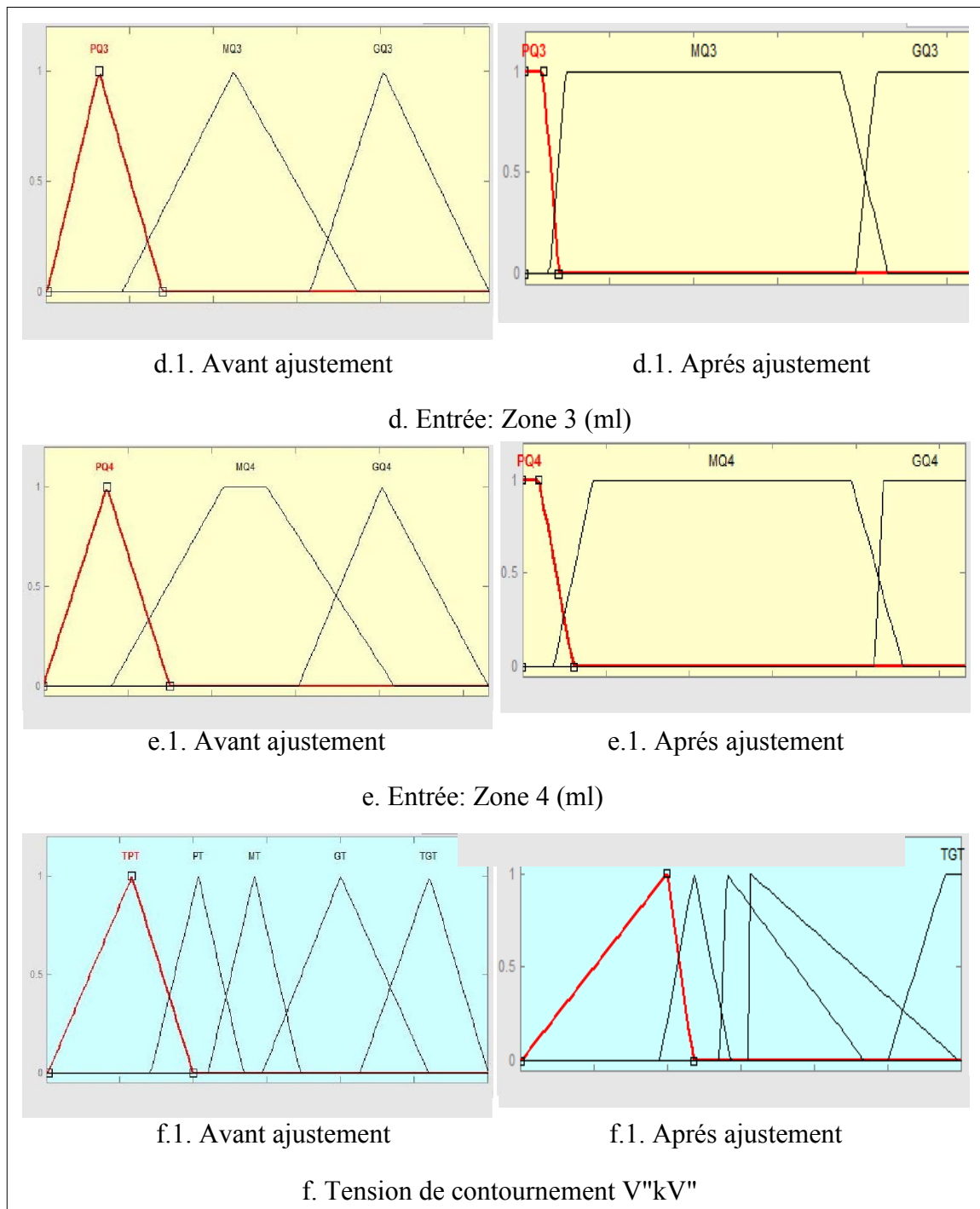


Figure III.10. Ensembles flous des entrées et de la sortie du SIF utilisé introduits par l'éditeur de fonctions d'appartenance de l'interface graphique (FIS) avant et après ajustement.

b- Règles d'inférence

La figure (III.11) montre la fenêtre utilisée pour introduire les règles floues utilisées dans notre SIF.

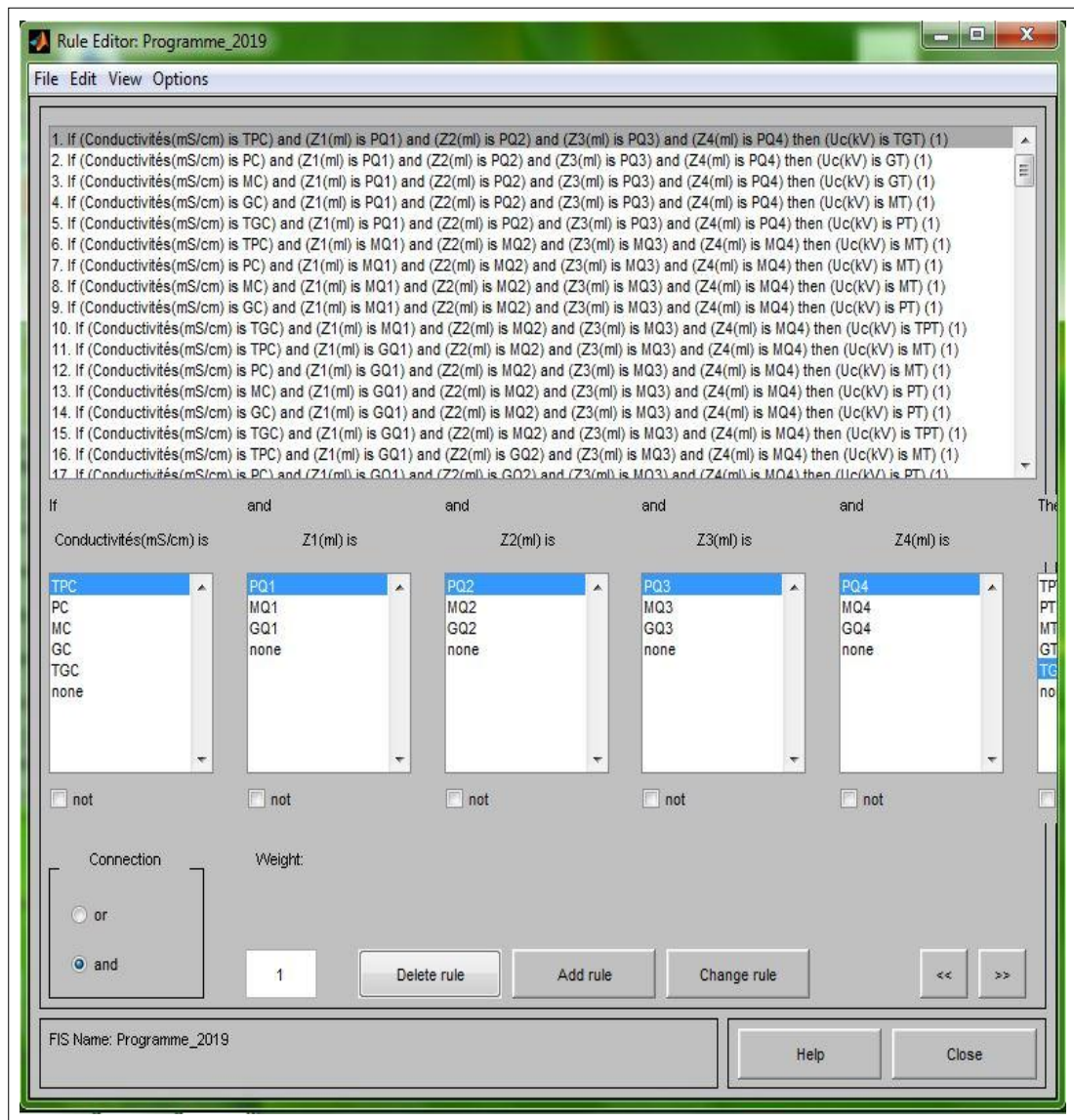


Figure III.11. Fenêtre de l'éditeur de base de règles floues

La fuzzification des 5 variables d'entrée a donné 5 fonctions d'apparence pour la conductivité et 3 fonctions d'apparence pour chaque zone, ce qui résulte au maximum 405 règles d'inférences ($5 \times 3 \times 3 \times 3 \times 3 = 405$) qui peuvent être générées.

L'interface graphique (FIS) permet d'introduire et de modifier le nombre de règles sans toutefois dépasser le nombre maximum de 405 règles. On néglige les cas défavorables, donc le nombre maximum devient 135 règles.

La définition des règles s'effectue de façon aisée en sélectionnant les fonctions d'appartenance associées aux entrées par leurs termes linguistiques, en définissant la sortie affectée par cette règle également définie par son terme linguistique associé. L'ensemble de règles utilisées est regroupé dans le tableau (III.3).

c- Défuzzification

L'évaluation des règles est une étape très importante du système d'inférence. Elle permet de calculer la valeur de la variable de sortie finale floue à partir des entrées floues issues de la fuzzification et de l'ensemble de la base des règles en utilisant une méthode d'inférence. La méthode d'inférence choisie est celle de Mamdani. Par conséquent, l'opérateur ET est réalisé par le calcul du minimum, tandis que l'opérateur OU est réalisé par le calcul du maximum. Le calcul de la solution précise, d'une solution floue sera effectué par la méthode de défuzzification qui se fait à l'aide de la méthode de calcul du centre de gravité.

III.3.3.2. Tests et validation

La figure (III.12) montre le résultat obtenu pour les entrées (3.33, 30, 15, 11, 15), où: $\delta=3,33\text{mS/cm}$ est la conductivite, $Z1=30\text{ml}$, $Z2=15\text{ml}$, $Z3=11\text{ml}$, $Z4=15\text{ml}$.



Figure III.12. Fenêtre de visualisation des règles floues. Exemple d'entrées

(a) et après (b) l'adaptation des fonctions d'appartenance des variables

La fenêtre de visualisation des règles d'inférence donnée par la figure (III.12) montre les étapes de l'évaluation des règles activées lors de l'application du vecteur d'entrées (3.33 ,30 ,15 ,11 ,15) selon la méthode max-min (colorisation jaune). Cette figure illustre aussi la variable de sortie floue obtenue pour les entrées cité précédemment (colorisation bleu). La sortie réelle est calculée par la méthode de défuzzification de centre de gravité.

Cette sortie donne la valeur de tension de contournement en utilisant les formes des fonctions d'appartenances proposées avant et après ajustement.

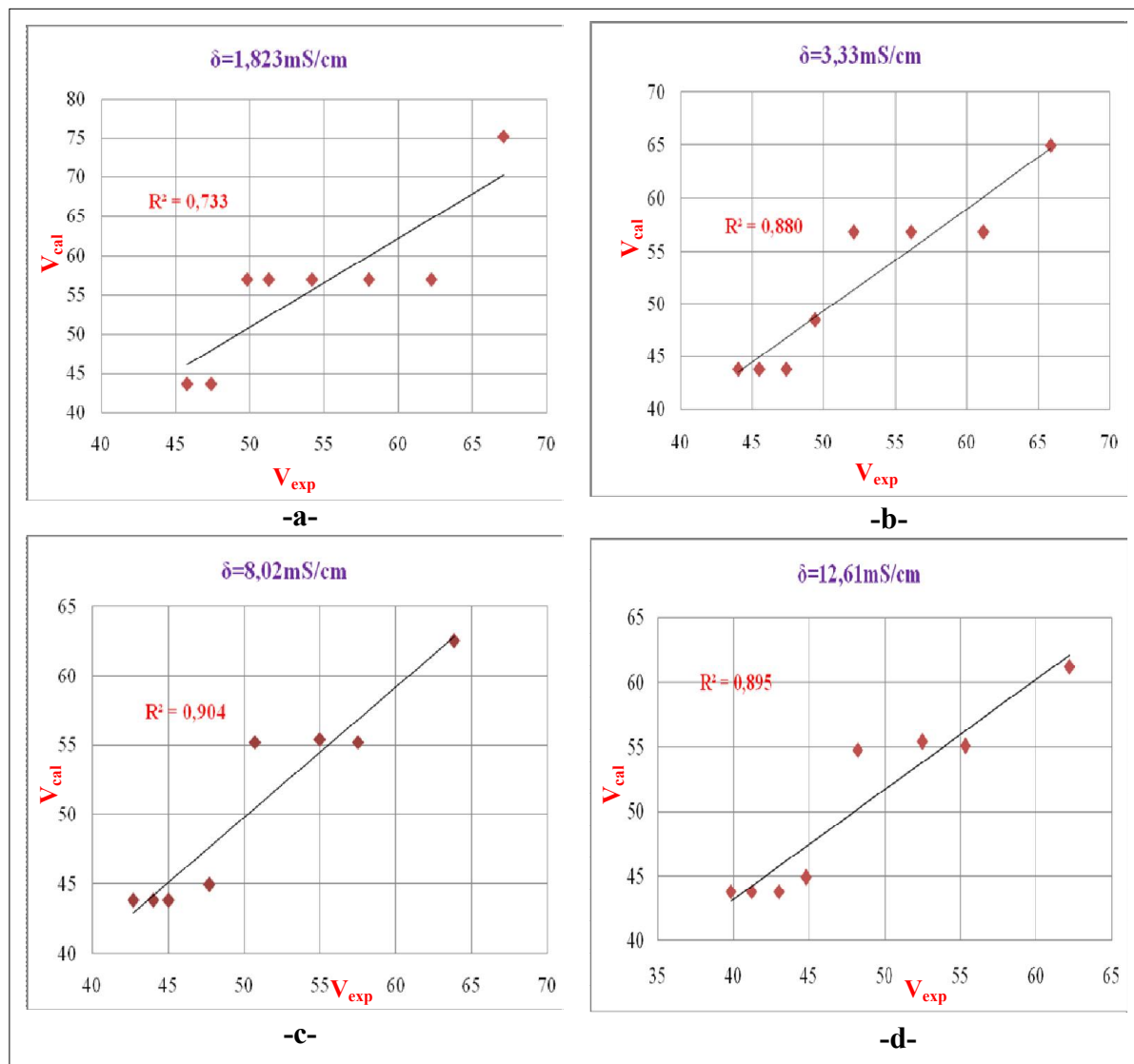
Les deux valeurs de la tension de contournement données par les figures (III.12 -a-) et (III.12-b-) montrent l'influence de l'ajustement des formes de fonctions d'appartenance sur la sortie.

III.3.3. Performance du modele

Les ordonnées de chaque courbe de la figure (III.13), représentent les sorties du réseau (valeurs de "V" calculées) par rapport a les valeurs experimentales.

Les points de chaque courbe de la figure (III.13) représentent la relation entre les valeurs experimentales en fonction les valeurs calculer par la logique floue de chaque conductivite.

Les droites tracées en continue de chaque courbe de la figure (III.13) représentent la courbe de tendance lineaire.



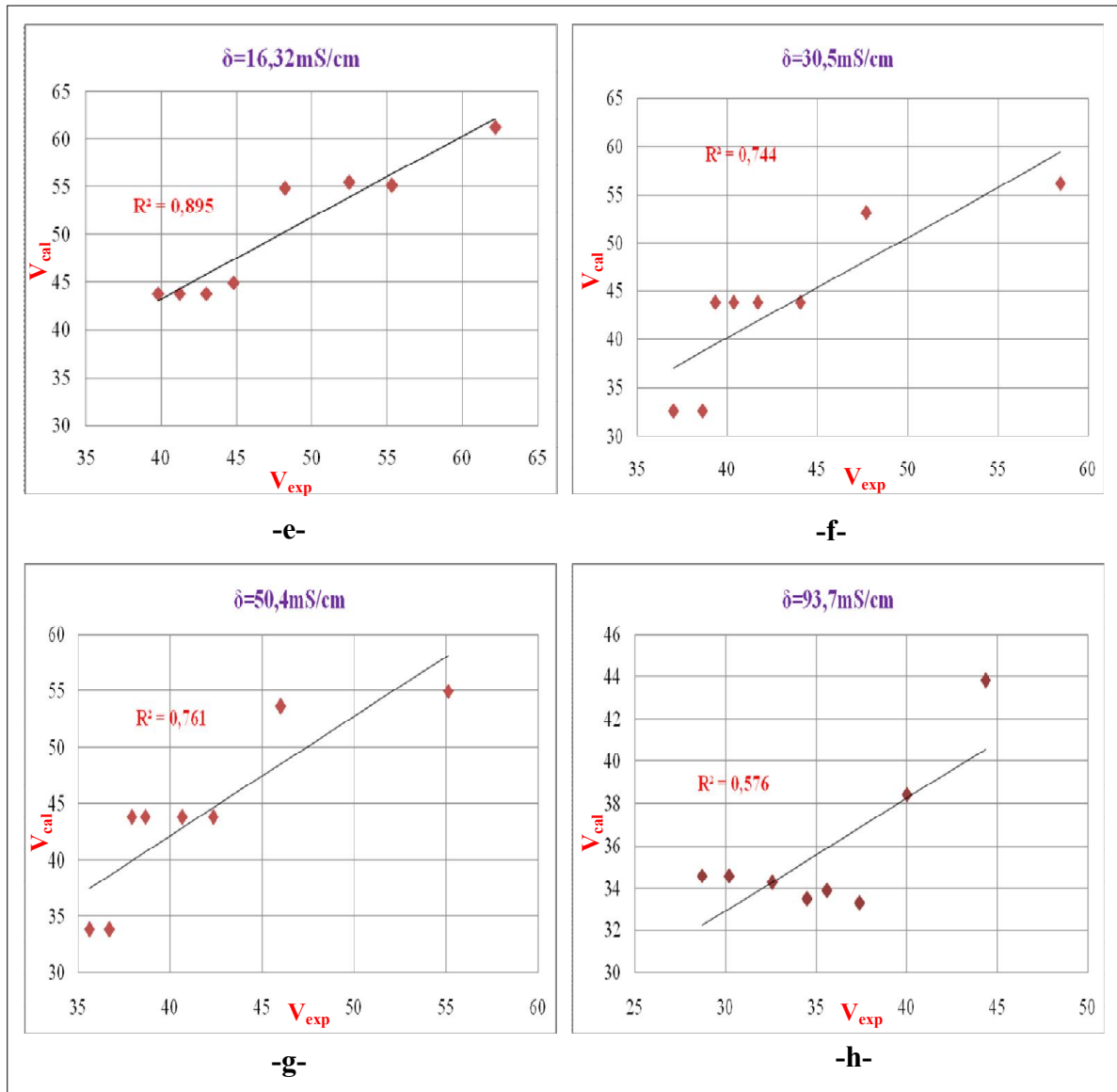


Figure III.13. Courbes de regression.

Les résultats de prédiction obtenus par le SIF pour différentes valeurs d'entrées [δ , $Z1$, $Z2$, $Z3$ et $Z4$] seront montrés dans la figure III.13. Ces résultats seront comparés avec des resultants experimentaux. [21] et ceux obtenus par simulation.

- Les résultats de prédiction obtenus par le système (FIS) sous MATLAB ont été obtenus pour une forme trapézoïdale et triangulaire des fonctions d'appartenance des entrées et de la sortie,
- Selon les courbes (figure III.13), on trouve que l'erreur moyenne est de l'ordre de 6%,
- Ces résultats nous ont permis de juger que le système flou est valable, efficace et fiable pour prédire les tests tensions de contournement de l'isolateur de HT 1512L étudié.

Cela nous a conduits à proposer d'utiliser le système flou simulé pour la prédiction d'autres résultats pour d'autres valeurs d'entrées non disponibles au laboratoire.

- Les résultats obtenus montrent que la logique floue à une grande puissance dans l'étude du phénomène de contournement.
- Le bon choix des paramètres du système d'inférence floue utilisé (variables d'entrée et de sortie, nombre et type et formes des fonctions d'appartenance, règles d'inférence, méthode de défuzzification), conduit à des meilleurs résultats.
- Toute modification dans les paramètres du SIF peut modifier les résultats. Dans notre étude, nous avons modifié les allures des différentes fonctions d'appartenances des entrées et celle de la sortie en gardant leurs formes trapézoïdales et triangulaire, ce qui nous a permis d'améliorer les résultats.
- La valeur de "R" représente le rapport entre les sorties calculées et les résultats expérimentaux. Si $R=1$, ceci implique que les sorties calculées sont égales aux résultats expérimentaux. Dans ce cas, les droites tracées en continue (régression parfaite) et en pointillé (régression calculée) se coïncident totalement et une performance parfaite est obtenue. Alors, nous pouvons dire, qu'un meilleur prédiction (estimation) donne des valeurs de R très proche de 1.
- Selon la figure (III.13), et après de calculer l'erreur moyenne nos résultats sont corrects par plus de 93%.

III.4. Conclusion

Parmi les avantages cités de la logique floue, le modèle mathématique non requis ainsi une interprétation et implémentation simple.

Le présent chapitre décrit une approche d'intelligence artificielle à base de logique (Fuzzy Logic) de type MAMDANI, développée pour l'estimation de la tension de contournement.

Dans ce chapitre, nous avons présenté les bases nécessaires à la compréhension de la méthode ainsi nous avons présenté l'utilisation ainsi les concepts de la LF.

Nous a permis de dire que la LF nécessite l'aide d'un expert qui devient très précieux lors de la conception d'un système flou avec un bon choix des différents paramètres du système est la phase la plus importante de l'application de la logique floue, et puis l'implémenter en suivant les différentes étapes nécessaires.

Les résultats obtenus en utilisant la LF a démontré leur efficacité en termes de pourcentage élevé de bonnes prédictions et du temps de calcul très très très court.

La difficulté que nous avons rencontrée dans l'utilisation de la logique floue réside dans le choix de leurs paramètres, nous avons rencontré des difficultés dans, la fuzzification des variables d'entrées et de la sortie (forme de la fonction d'appartenance, nombre d'ensembles flous associés pour chaque variable) et la création des règles floues qui relient les entrées à la sortie. Nous pouvons dire ici, qu'il n'y a pas de règles pour choisir les paramètres du système d'inférence floue.

L'implémentation du système d'inférence flou (SIF) sous l'environnement MATLAB à l'aide d'interface graphique «**FIS**» se caractérise par sa simplicité. Ce chapitre montre l'efficacité de notre modèle proposé pour estimé la tension de contournement.

Conclusion Générale

La présence d'une couche de pollution à la surface d'un isolateur modifie complètement le comportement de l'isolateur de haute tension. Cette étude nous a permis, d'estimer la tension de countournement d'un isolateur de tension.

Notre travail est une contribution à l'estimation de la tension de contournement d'un isolateur capot et tige de haute tension artificiellement polluée en utilisant la logique floue dans les conditions de pollution sous tension alternative.

Ce travail nous a permis de prédire la tension de contournement de l'isolateur de haute tension (HT) et de mieux comprendre les conséquences de la pollution d'un isolateur de HT utilisé dans lignes aériennes de transport de l'énergie électrique et d'analyser des différents paramètres pouvant influencer la tension de son contournement.

La prédiction de la tension de contournement d'un isolateur de HT peut aider à améliorer les conditions de transport de l'énergie électrique par ligne aériennes (éviter les pertes de l'énergie, ...etc.). La logique floue connue comme une nouvelle technique d'intelligence artificielle, nous a permet de proposer un algorithme de prédiction basé sur cette technique et implémenté sous MATLAB en utilisant l'un de ces utilitaires qui est 'Fuzzylogictoolbox'.

L'utilisation du système d'inférence floue (SIF) créer avec ce même utilitaire en vue de prédire des tensions de contournement de l'isolateur de HT artificiellement pollué nous a donné des résultats plus proche de ceux obtenus par des essais pratiques avec une grande précision.

La logique floue a montré comme l'une des techniques de l'intelligence artificielle une grande aptitude et efficacité dans la prédiction de la tension de contournement de l'isolateur de haute tension étudié durant notre travail.

On détermine la base de règles qui va caractériser le fonctionnement désiré du système. Puis il faut transformer les variables réelles, c'est à dire celles qui ont une réalité physique en variables floues. On appelle cette étape la Fuzzification. On utilise ensuite ces variables floues dans un mécanisme d'inférence qui crée et détermine les variables floues de sortie en utilisant les opérations sur les fonctions d'appartenance.

Enfin, on opère à la défuzzification qui consiste à extraire une valeur réelle de sortie à partir de la fonction d'appartenance du sous-ensemble flou de la sortie établie par le mécanisme d'inférence.

L'intelligence artificielle à base de la logique floue nous a facilité le calcul de la tension de countournement. Les seules variables d'entrées considérées sont : la conductivité, les zones de pollution. Les tensions de countournement sont calculées à la sortie du système proposé (LF). Les résultats obtenus par la logique floue sont aussi comparés aux résultats de la littérature. L'application de la logique floue comme le montre que dans le dernier chapitre (plus de 90% des prédictions correctes obtenues par LF).

Les résultats présentés, ont montré l'efficacité de la logique floue dans l'estimation de la tension de countournement.

Comme perspectives nous espérons que ce travail sera l'application des techniques hybrides de l'intelligence artificielle pour améliorer les résultats obtenus.

References Bibliographiques

- [1] C. Bentriou, « Simulation Numérique d'un Isolateur de Haute Tension a Fréquence Industrielle 50 Hz »Mémoire de master académique, dept. G. électrique, Université de M'sila, juin 2016.
- [2] S. Bouchoukh, S.L Badraeddine, « Influence de la Pollution Artificielle sur la Tension de Contournement d'une Chaîne d'Isolateurs MT», Mémoire de master académique, Université de Ouargla, juin 2014.
- [3] A. Kara, «Contribution à l'étude d'un modèle dynamique de contournement d'un isolateur pollué », Mémoire de Magister, Université de Sétif 1, décembre 2013.
- [4] S. Mebaoudj, H. Mezaour, « Prédiction de la tension de contournement d'un isolateur de haute tension en utilisant la logique floue » Mémoire master académique université kasdi merbah Ouargla, juin 2015.
- [5] M.B. Sayah, «Prédiction du contournement d'une Chaîne d'isolateur MT 175 CTV-Sonalgaz Polluée Artificiellement par la logique floue», Mémoire master académique Université de Biskra, juin 2014.
- [6] A. Mekhaldi, «Etude du développement d'un arc électrique sur des surfaces isolantes contaminées par la pollution désertique», Mémoire de Magister, Département de Génie Electrique, ENP, El-Harrach, Alger, 1993.
- [7] M. Terkmani, M. Babouamer, « Contournement des Isolateurs des Lignes de Haute Tension », Mémoire d'ingénieur, département génie électrique, USTO, Oran, juin 2005.
- [8] H. Lyes A. Slimanou, « Effet de l'épaisseur d'un écran pollué sur la rigidité diélectrique d'un système d'électrodes a champ non uniforme », Mémoire d'ingénieur, Université de Bejaïa, 2010.
- [9] M.A Boudjmaa, R. Sbeti, « Modélisation de pollution des isolateurs de haute tension », Mémoire de master en Génie Electrique Université de Ouargla, juin 2012.
- [10] N. Elmihoub, A. Hakmi « Comportement d'un Modèle d'isolateur HT pollué sous tension alternative 50Hz», mémoire master académique université iben khaldoun –Tiaret.
- [11] S. Satta, «Contribution a l'étude de l'influence de la pollution discontinue sur le comportement des isolateurs expérimentation et simulation » mémoire de magister en électrotechnique université de Sétif, 2010.
- [12] A. Bouarouri, R. Ladjal « Comportement et Caractérisation Electriques d'un Modèle d'Isolateur sous Tension Alternative » Projet de Fin d'Etudes Pour l'obtention du diplôme d'ingénieur d'Etat en Electrotechnique, juin 2006.

- [13] D.Namane, « Effet de la discontinuité de la couche de pollution sur le comportement d'isolateur de haute tension, sous la fréquence 50Hz », Mémoire de Magister, Département de Génie Electrique, ENP, El-Harrach, Alger, Février 1998.
- [14] M.Teguar, «Etude Mathématique des Mécanismes de Développement des Décharges Electrique sur des Isolateurs Installé en Régions Polluées », Mémoire de Magister Département de Génie Electrique, ENP, El-Harrach, Alger, Juillet 1993.
- [15] S. Zeghlache, «Cours Commande Intelligente» Faculté de Technologie, Département de Génie Electrique Université de M'sila, 2019.
- [16] D. Mokeddem «Contrôle Flou des Processus Biotechnologiques à Base d'Algorithmes Génétiques» Thèse Présentée pour l'Obtention du Diplôme de Doctorat En Sciences en Electronique universitéFerhatAbbas de Sétif, juillet 2010.
- [17] H.E Bouzid, S. Benmeriem, «Application de la technique de la logique floue pour la prédiction de l'amorçage des intervalles d'air pointes-plans» Mémoire de Master académique, Université de Ouarglale, juin 2013.
- [18] E. Rebaa, «Génération automatique et optimisation de systèmes à inférence floue» Thèse Présentée pour l'Obtention un Diplôme de Doctorat université Paris XII, Décembre 2003.
- [19] F. Belhachat, « commande neuro-floue d'un hacheur MPPT »Mémoire de Magister ENP Département d'Electronique, Juin 2007.
- [20] A. Khelfaoui, O. Bouberra « modélisation par méthode des éléments finis des phénomènes de conduction surfacique sur l'isolateur pollues», mémoire de master académique, université kasdi merbah, juin 2014.
- [21] chayma abdelkebir, Samia barkat « Implémentation de Méthode d'intelligence Artificielle Pour La Prédiction de La Tension de Contournement D'un Isolateur de Haute Tension Artificiellement Pollué Sous MATLAB/Simulink. » mémoire de master académique d'université Mohamed Boudiaf M'sila le : 2017 /2018
- [22] Bourek Yacine « étude de la décharge électrique par l'intelligence artificielle » Thèse Présentée pour l'obtention du diplôme de doctorat en sciences En électrotechnique université de Batna le 26 / 11 / 2016