



Université de Batna2
Faculté de Technologie
Département d'électrotechnique



THESE

Présentée pour l'obtention du diplôme de

DOCTORAT EN SCIENCES

EN ELECTROTECHNIQUE

Option : Matériaux électrotechniques

Par

BOUREK Yacine

Maitre-assistant (A) à l'université d'Ouargla

Magister en électrotechnique (Option : Matériaux Electrotechniques) de l'université de Batna
Ingénieur d'état en électrotechnique de l'université de Batna

THEME



ETUDE DE LA DECHARGE ELECTRIQUE PAR L'INTELLIGENCE ARTIFICIELLE



Soutenue le : 26 / 11 / 2016 devant le jury :

Prof. Rachid Abdessemed
Prof. Leila Mokhnache
Prof. Slimane Bouazabia

Université de Batna2
Université de Batna2
Université des Sciences et
Technologies - USTHB
Ecole Nationale Polytechnique
Université de Sétif 1
Université de Batna2

Président
Rapporteur
Co-Rapporteur

Examinateur
Examinateur
Examinateur

Etude de la décharge électrique dans l'air par l'intelligence artificielle

Résumé

Les phénomènes de décharge électrique dans les gaz et en particulier dans l'air sont étudiés depuis près de deux siècles, et font toujours l'objet de recherche active auprès des scientifiques. L'étude des performances des différentes configurations d'électrodes est très importante dans différentes applications industrielles. Des études par simulation numérique peuvent contribuer dans l'étude des décharges électriques et minimiser les coûts des essais expérimentaux. Ce travail a été réalisé dans ce cadre, et propose un nouveau concept de simulation numérique basé sur la logique floue et les réseaux de neurones artificiels comme deux techniques d'intelligence artificielle pour prédire les différentes étapes de la décharge électriques dans une configuration pointe-plan dans l'air atmosphérique, où la pointe est soumise à une haute tension continue de polarité positive. Le critère des streamers énoncé pour l'étude des décharges électriques dans les gaz pour des champs non-homogènes a été essentiellement utilisé dans tous les concepts de prédiction proposés durant notre travail. Les résultats obtenus ont montré la capacité et la facilité d'utiliser la logique floue et les réseaux de neurones artificiels dans de telles études.

Mots clés : Décharge électrique, configuration pointe-plan, intelligence artificielle, critère des streamers.

Study of Electric Discharge Using Artificial Intelligence

Abstract

The electrical discharge phenomena in gaseous in particular in the air, have been studied for nearly two centuries and are still the subject of active research of scientists. The study of different electrodes configurations performance is very important in different industrial applications. Numerical simulation studies can help in the study of electrical discharges and minimize the costs of experimental tests. This work was carried out in this framework, and proposes a new concept of numerical simulation based on fuzzy logic and artificial neural networks as two artificial intelligence techniques to predict the different electrical discharge steps in a point-plane configuration in atmospheric air, where the electrode is subjected to direct high voltage of positive polarity. The streamers criterion enunciated for the study of electrical discharges in gaseous for inhomogeneous fields is essentially used in all prediction concepts proposed during our work. The obtained results have shown the ability and ease of use of fuzzy logic and artificial neural networks in such studies.

Keywords: electrical discharge, point-plane configuration, artificial intelligence, streamers criterion.

دراسة التفريغ الكهربائي بواسطة الذكاء الاصطناعي

ملخص: بدأت دراسة التفريغ الكهربائي في الغازات عموماً وفي الهواء خصوصاً منذ قرنين من الزمن وكانت هذه الظاهرة محور اهتمام العديد من العلماء. إن دراسة مقدرة المجالات المشكّلة من مختلف أنواع الأقطاب مهمة في مختلف تطبيقاتها الصناعية. يمكن لدراسة مماثلة بواسطة المحاكاة الرقمية أن تساعد في البحث وتتنقص من التكاليف المادية. في هذا الإطار أنجز هذا العمل قصد اقتراح طريقة محاكاة رقمية جديدة تعتمد على المنطق الغامض والشبكات العصبية كطريقتين من طرق الذكاء الاصطناعي من أجل التنبؤ بمختلف مراحل التفريغ الكهربائي في المجال رأس مدبب – مستوي حيث طبق فرق كمون المستمر عالي التوتر ذو القطبية الموجبة على الرأس المدبب و في الهواء الجوي، إذ أن نظرية التشعيبات المستعملة في دراسة الحقول الكهربائية الغير متجانسة استعملت بشكل أساسي في عملنا هذا و النتائج المتحصل عليها أظهرت كفاءة وسهولة استعمال طرق المنطق الغامض والشبكات العصبية للتنبؤ بمراحل التفريغ الكهربائي في هذا النوع من الدراسات

كلمات البحث: التفريغ الكهربائي، المجال رأس مدبب – مستوي، الذكاء الاصطناعي، نظرية التشعيبات.

A
Mes parents, mes frères et sœurs, ma femme et mes deux fillettes...

A
Tous ceux qui me sont chers...

Remerciements

Mes remerciement vont tout premièrement à Dieu tout puissant pour la volonté, la santé et la patience, qu'il ma donné pour finir ce travail.

Ainsi je dois exprimer ma profonde gratitude et mes remerciements les plus sincères à mon encadreuse Professeur **Leila MOKHNACHE**, de l'institut d'électrotechnique à l'université de Batna. Elle m'a donnée l'occasion de travailler sur un sujet passionnant, m'a apporté ses idées originales lors de nos discussions. Son expérience dans ce domaine de recherche, ses conseils, ses encouragements m'ont été très précieux et m'ont permis de mener à bien mon travail. Je la remercie également pour la confiance qu'elle m'a toujours témoignée et pour la liberté scientifique dont j'ai disposée.

Mes remerciements s'adressent également à monsieur **Slimane BOUAZABIA**, Professeur à l'université des Sciences et Technologies - USTHB – Alger pour avoir manifesté un grand intérêt pour le sujet en acceptant d'être Co-encadreur de cette thèse.

Je tiens à remercier monsieur **Rachid Abdessemed**, Professeur à l'université de **Batna2**, pour m'avoir fait l'honneur de présider mon jury.

Je remercie chaleureusement monsieur **Ahmed Boubakeur**, Professeur à l'école nationale Polytechnique d'Alger, Monsieur **Abdelhafid Bayadi**, Professeur à l'université de Sétif 1 et Madame **Fatiha Zidani**, Professeur à l'université de **Batna2** , pour avoir participés au jury et pour avoir examiné cette présente thèse.

Je remercie toutes les personnes qui ont contribués de près ou de loin à l'aboutissement de ce travail en particulier **L. Zeghichi, S. Benharath, Kh. Benalia et T. Bentersia.**

Mr. Yacine BOUREK

Table des matières

Table des matières	i
Table des figures	v
Liste des tableaux	vii

INTRODUCTION GENERALE

1. Objectif du travail.....	2
2. Organisation du document.....	2
2.1. Etat de l'art et problématique.....	2
2.3. Modélisation de la décharge électrique dans une configuration pointe-plan.....	2
2.4. Intelligence artificielle.....	3
2.5. Prédiction de la décharge électrique dans l'air en utilisant l'intelligence artificielle.....	3

CHAPITRE I: ETAT DE L'ART ET PROBLEMATIQUE

I.1. Introduction.....	4
I.2. Historique.....	4
I.3. Mécanisme des décharges électriques dans les gaz.....	5
I.3.1. Théorie des streamers.....	7
I.4. Contexte de notre travail.....	7
I.4.1. Etudes des décharges électriques.....	8
I.4.1.1. Modélisation des décharges électriques.....	8
a. Modèles mathématiques des décharges.....	8
b. Modèles numériques des décharges.....	11
b.1. Géométries 1-D et 1,5 D.....	11
b.2. Géométrie 2-D.....	11
b.3. Géométrie 3-D.....	13
c. Méthodes basées sur les techniques de l'intelligence artificielle.....	13
d. Méthodes stochastiques (probabilistes).....	14
d.1. Méthode de Monte Carlo.....	14
d.2. Méthode des fractales.....	15
I.4.2. Position du problème.....	16
I.4.2.1. Notre contribution.....	17
I.5. Conclusion.....	18

CHAPITRE II : MODELISATION DE LA DECHARGE ELECTRIQUE DANS UNE CONFIGURATION POINTE-PLAN

II.1. Introduction.....	19
II.2. Décharge pointe positive plan dans les gaz.....	19
II.2.1. Décharges pointe négative –plan.....	22
II.3. Etapes de la décharge électrique dans un intervalle pointe-plan.....	23
II.3.1. Développement de l'avalanche électronique.....	23
II.3.2. Propagation des streamers.....	23
II.3.3. Formation de la couronne.....	24
II.3.4. Calquage de l'intervalle et formation d'un arc électrique.....	24
II.4. Critères de la décharge électrique dans les gaz.....	24
II.4.1. Critère de "Townsend".....	24

II.4.2. Critère de "Schumann"	25
II.4.3. Critère de "Jorgensen"	26
II.4.4. Critère de "Pedersen"	26
II.4.5. Critère de "Raether"	27
II.4.6. Critère de "Meek"	28
II.4.7. Critère de Gallimberti	28
II.5. Modèles d'initiation de décharge dans l'air: streamers – couronne	28
II.5.1. Modèles de seuil d'apparition	29
II.5.1.1. Modèles basés sur la loi de Peek généralisée	29
II.5.1.2. Modèle du seuil d'apparition de la couronne	29
II.5.2. Modèle de dispersion	29
II.5.3. Modèle de propagation	31
II.5.3.1. Modèles de Dawson et Winn	31
II.5.3.2. Modèles de Gallimberti	33
II.6. Etapes de la modélisation mathématique de la décharge électrique dans une configuration pointe-plan	36
II.6.1. Calcul du champ appliqué E_0	38
II.6.1.1. Formules	38
II.6.1.2. Calcul par la méthode des éléments finis	39
II.6.2. Calcul du champ résultant E_r	40
II.6.2.1. Champ de charge d'espace	40
a. Calcul de la charge d'espace	41
II.6.2.2. Champ résultant total	42
II.7 Calcul du champ électrique par la méthode des éléments finis en utilisant le code FEMM	43
II.7.1. Calcul du champ initial E_0 en l'absence de charge d'espace	43
II.7.2. Calcul du champ électrique avec la présence de charge d'espace	46
II.7.3. Prédiction des étapes de la décharge électrique dans une configuration pointe positive –plan	48
II.7.3.1. Détermination des valeurs de l'intégrale I qui correspondent aux étapes de la décharge électrique	48
II.7.3.2. Application du critère des streamers dans le système d'électrodes pointe-plan	49
a. Conditions expérimentales	50
b. Test et validation	50
II.6. Conclusion	51

CHAPITRE III : INTELLIGENCE ARTIFICIELLE

III.1. Introduction	53
III.2. Logique floue	53
III.2.1. Notions de base des ensembles flous et de la logique floue	54
III.2.1.1. Théorie des ensembles flous	54
III.2.1.1.1. Univers de discours	54
a. Fonction d'appartenance	54
b. Opérateurs de la logique floue	56
III.2.1.1.2. Raisonnement floue	56
a. Règles floues	56
a.1. Degré de vérité (poids)	57
a.2. Implication floue	58
III.2.1.2. Système flou	58
III.2.1.2.1. Fuzzification	59
III.2.1.2.2. Inférence floue	59

a. Types d'inférence.....	60
a.1. Méthode d'inférence Min-Max (Implication de Mamdani).....	60
a.2. Méthode d'inférence Max-Produit (Implication de Larsen).....	61
III.2.1.2.3. Défuzzification.....	62
a. Défuzzification par la méthode du centre de gravité.....	62
b. Méthode de moyenne des maxima.....	63
c. Méthode du maximum.....	63
III.3. Réseaux de neurones artificiels.....	63
III.3.1. Modèle mathématique d'un neurone formel.....	64
III.3.2. Architecture des réseaux de neurones.....	65
III.3.2.1. Réseaux propagation vers l'avant« FEED-FORWARD ».....	66
a. Perceptron monocouche SLP.....	66
b. Perceptron multicouches PMC.....	67
III.3.3. Apprentissage.....	67
III.3.3.1. Algorithme d'apprentissage.....	68
a. Algorithme de rétro-propagation du gradient de l'erreur.....	68
a.1 Ajustement des poids.....	69
a.2. Accélération de l'algorithme avec le momentum (Delta généralisée).....	70
a.3. Résumé de l'algorithme de rétro-propagation.....	70
III.4. Conclusion.....	70

CHAPITRE IV : PREDICTION DES ETAPES DE LA DECHARGE ELECTRIQUE DANS L'AIR EN UTILISANT L'INTELLIGENCE ARTIFICIELLE

IV.1. Introduction.....	72
IV.2. Prédiction des étapes de la décharge électrique en utilisant des techniques de l'intelligence artificielle.....	72
IV.2.1. Prédiction des étapes de la décharge par la logique floue.....	73
IV.2.1.1. Fuzzification.....	75
a. Variables linguistiques et intervalles flous.....	76
b. Fonctions d'appartenances.....	77
IV.2.1.2. Règles floues.....	78
IV.2.1.2.1. Etablissement des règles floues.....	79
IV.2.1.3. Mise en œuvre du système d'inférence floue.....	80
IV.2.1.3.1. Implémentation du système d'inférence floue (SIF) sous MATLAB... ..	80
a. Fuzzification des variables d'entrées et de sortie.....	80
b. Règles d'inférence.....	81
c. Défuzzification.....	84
IV.2.1.3.2. Tests et validation.....	84
IV.2.2. Prédiction des étapes de la décharge en utilisant les réseaux de neurones artificiels.....	85
IV.2.2.1. Conception du réseau de neurones.....	85
a. Détermination des entrées/sorties du réseau de neurones.....	86
b. Elaboration de la structure du réseau.....	86
c. Apprentissage.....	86
d. Validation et Tests.....	86
IV.2.2.2. Implémentation et simulation.....	87
a. Choix de l'algorithme de l'apprentissage.....	87
a.1. Méthodes d'apprentissage.....	87
a.1.1. Algorithme de Levenberg-Marquardt.....	88
a.1.1.1. Fonction d'apprentissage optimale.....	88
b. Choix de la fonction de transfert.....	89
c. Fonction de performance.....	89

c.1. Erreur quadratique moyenne MSE (Mean Squared Error).....	89
IV.2.2.3. Application du RNA dans la prédiction des étapes de la décharge électrique..	90
a. Modèle de réseau de neurone.....	90
a.1. Création du RNA en utilisant l'interface graphique de l'utilitaire NNtool.....	90
a.1.1. Détermination du nombre de couche cachées et nombre de neurones par couche cachée et nombre d'itération.....	91
a.1.1.1. Résultat du nombre des neurones cachés et des couches cachées.....	92
a.2. Paramètres finaux du RNA utilisés.....	95
b. Performance du réseau.....	95
c. Résultats.....	97
IV.3. Discussions des résultats obtenus.....	101
IV.4. Conclusion.....	103

CONCLUSION GENERALE

C1. Perspectives.....	106
Bibliographie.....	107

Table des figures

CHAPITRE I

Figure I.1. Schéma des processus d'ionisations.....	5
--	---

CHAPITRE II

Figure II.1. Topographie de la décharge couronne en configuration pointe-plan.....	21
Figure II.2. Mécanisme de développement du streamer proposé par Townsend.....	21
Figure II.3. Mécanisme de propagation du streamer par photoionisation.....	22
Figure II.4. Représentation schématique du développement d'un streamer négatif.....	23
Figure II.5. Champ électrique de claquage et valeurs de K en fonction de la distance inter-électrodes	27
Figure II.6. Définition du volume critique.....	31
Figure II.7. Développement d'une avalanche en tête d'un streamer positif selon le modèle de Dawson et Winn.....	32
Figure II.8. Représentation schématique du mécanisme de développement d'un streamer.....	35
Figure II.9. Distribution du champ électrique non uniforme dans un intervalle d'air pointe- plan.....	37
Figure II.10. Distribution du champ pour des moyennes valeurs de d/R	39
Figure II.11. Distribution du champ initial « E_0 » en configuration pointe plan.....	39
Figure II.12. Géométrie pointe plan à étudier par modèle élément fini (deux cas proposés parmi les cas géométriques possibles).....	41
Figure II.13 Dimensions de l'arrangement pointe-plan à étudier.....	44
Figure II.14. Mode de schématisation de la géométrie pointe-plan à étudier sous FEMM et affichage de ces accessoires (une case=1cm×1cm) ($R=0,25$ cm et $d=50$ cm).....	44
Figure II.15. Champ électrique initial dans la géométrie pointe-plan étudiée et simulée en utilisant FEMM pour $V=80$ kV, $R=0,25$ cm et $d=50$ cm.....	45
Figure II.16. Potentiel électrique dans la géométrie pointe-plan étudiée et simulée en utilisant FEMM pour $V=80$ kV, $R=0,25$ cm et $d=50$ cm.....	46
Figure II.17. Champ électrique initial calculé sur la ligne de haute intensité par la méthode des éléments finis (MEF), et par les équations (II.46) et (II.48) en fonction de la distance inter-électrodes.....	46
Figure II.18. Champ électrique initial, champ total et champ de la charge d'espace en fonction de la distance inter-électrodes.....	48
Figure II.19. Densités des électrons libres et des ions positifs en fonction de la distance inter-électrodes par cm^3	48
Figure II.20. Etapes de prédiction des étapes de la décharge électrique en utilisant le critère des streamers.....	50

CHAPITRES III

Figure III.1. Exemple de fonctions d'appartenance.....	56
Figure III.2. Système flou.....	60
Figure III.3. Exemple d'inférence Min-max.....	62
Figure III.4. Exemple d'inférence Max- produit.....	63

Figure III.5. Défuzzification par la méthode du centre de gravité.....	63
Figure III.6. Défuzzification par la méthode de la moyenne des maxima.....	63
Figure III.7. Défuzzification par la méthode du maximum.....	64
Figure III.8. Schéma d'un neurone formel.....	65
Figure III.9. Topologies des réseaux de neurones artificiels.....	67
Figure III.10. Perceptron.....	67
Figure III.11. Exemple d'un réseau de type perceptron multicouches.....	68

CHAPITRE IV

Figure IV.1. Architecture d'un système d'inférence floue(SIF).....	75
Figure IV.2. Fonction d'appartenance de la sortie (I).....	78
Figure IV.3. Fonction d'appartenance de la tension appliquée (V).....	78
Figure IV.4. Fonction d'appartenance de la longueur de l'intervalle (d).....	79
Figure IV.5. Fonction d'appartenance de la courbure de la pointe (R).....	79
Figure IV.6. Fenêtre principale de l'éditeur du système d'inférence flou « Fis Editor » utilisé.....	82
Figure IV.7. 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.....	84
Figure IV.8. Fenêtre de l'éditeur de base de règles floues.....	84
Figure IV.9. Fenêtre de visualisation des règles floues pour un exemple d'entrées (V=500 kV, d=60 cm et R=20 cm) avant et après l'adaptation des fonctions d'appartenance des variables.....	85
Figure IV.10. Structure de RNA dans le cas d'utilisation d'une seule couche cachée et 3 neurones par couche.....	91
Figure IV.11. Paramètres du RNA (RP) dans le cas d'utilisation d'une seule couche cachée et 3 neurones par couche.....	91
Figure IV.12. Procédure de la détermination du nombre de couches cachées et le nombre des neurones par couche.....	93
Figure IV.13. Fenêtre de l'apprentissage de l'outil ntool dans le cas d'utilisation d'une seule couche cachée et 3 neurones par couche.....	94
Figure IV.14. Courbes de régressions.....	97

Liste des tableaux

CHAPITRE II

Tableau II.1. Etapes de la décharge codées par les valeurs de l'intégrale 'I' selon [Abd-88, Osm-93, Pet-99].....	49
Tableau II.2. Résultats de prédiction des étapes de la décharge électrique par le critère des streamers proposé via le calcul de "I".....	52

CHAPITRE III

Tableau III.1. Exemple d'opérateurs flous.....	57
Tableau III.2. Exemple d'une matrice d'inférence.....	58
Tableau III.3. Exemple de calcul de degré de Vérité.....	59
Tableau III.4. Exemple des opérateurs d'implication floue.....	59
Tableau III.5. Résumé des fonctions Net.....	66
Tableau III.6. Fonctions d'activations et leurs dérivées.....	66

CHAPITRE IV

Tableau IV.1. Variables d'entrées et sortie.....	76
Tableau IV.2. Décomposition de la variable de sortie en sous ensembles.....	77
Tableau IV.3. Décomposition des variables d'entrées.....	78
Tableau IV.4. Matrice d'inférence.....	81
Tableau IV.5. Paramètres du réseau de neurones artificiel utilisé.....	91
Tableau IV.6. Différents paramètres du RNA testés pour optimiser le nombre de couches cachées et neurones par couche.....	93
Tableau IV.7. Optimisation de la structure du RNA.....	95
Tableau IV.8. Paramètres finaux de la structure et d'apprentissage du RNA.....	96
Tableau IV.9. Données expérimentales collectées et résultats de prédiction par IA et par modèle.....	99
Tableau IV.10. Comparaisons des résultats de la prédiction par différentes techniques de simulation par rapport aux données pratiques collectées de la littérature.....	102

INTRODUCTION GENERALE

INTRODUCTION GENERALE

Les matériaux ont joué un rôle prépondérant dans les progrès accomplis dans la mise au point des matériels électriques. L'évolution de la qualité de ces matériaux s'est étalée sur plus d'un siècle. Bien que cette évolution soit lente en terme de qualité elle a été considérable. Dans le domaine du génie électrique, les matériaux diélectriques sont utilisés pour assurer une fonctionnalité optimale des équipements tout en garantissant la sécurité des biens et des personnes. L'air en tant que diélectrique, est largement rencontré comme unique isolation entre électrodes dans la technique des hautes tensions. Ces électrodes peuvent être soit les parties métalliques sous tension de différents appareillages, transformateurs, disjoncteurs,...etc., soit aussi des conducteurs de lignes aériennes ou des bornes à haute tension dans les laboratoires d'essais [Roy-84]. Les décharges électriques dans l'air ambiant servent dans de nombreuses applications comme la décontamination chimique et biologique en volume et en surface (dépollution des gaz, stérilisation, traitement des bio-films), le développement d'actionneur à plasma dans le médical par exemple (micro-pompe pour l'injection et le dosage des médicaments) ou l'aéronautique (contrôle d'écoulement pour recollement des couches limites et amélioration du CX) ou encore les traitements plasmas en biomédical (traitement de la peau et des tumeurs, effet de coagulation et de cicatrisation)[Kac-11]. C'est pourquoi l'étude de l'amorçage et du développement de la décharge électrique dans l'air a mobilisé depuis des décennies un nombre de physiciens, chercheurs et ingénieurs [Fof-06, Kac-11].

De nombreuses études ont été consacrées à la décharge électrique dans l'air pour différentes géométries et configurations, tant expérimentales que numériques et plusieurs modèles mathématiques ont été proposés pour étudier les décharges électriques. Parmi les configurations variées de systèmes d'électrodes étudiées, les plus courantes sont les systèmes pointe-plan, multi pointes-plan, couteau-cylindre, fil-cylindre ou cylindre-cylindre. Suivant les applications envisagées, la haute tension, qui est généralement appliquée à l'électrode active, peut être impulsionnelle, alternative ou continue de polarité positive ou négative [Gir-09, Vin-02, Fof-02]. Au cours de ces dernières décennies, de nombreuses études expérimentales ont été menées. Elles ont, notamment, permis d'acquérir des connaissances permettant l'élaboration de modèles qui

visent à reproduire soit une phase particulière de la décharge, soit son développement global [Gir-99].

De nouvelles techniques ont été introduites dans l'étude des décharges électriques, telle que les outils basés sur l'intelligence artificielle (réseaux de neurones artificiels, la logique floue et les algorithmes génétiques,...etc.), qui ont démontré un grand succès dans l'étude des différents types de décharges [Amm-07, Man-12].

1. Objectif du travail

Ce travail de thèse a été réalisé pour l'étude des décharges positives en configuration pointe-plan dans l'air ambiant. C'est un travail qui a pour objectif de prédire les phases d'une décharge électrique durant son développement. Une telle étude est difficilement abordable par des méthodes de modélisation classiques [Gir-09, Fof-06]. Par contre, l'utilisation de méthodes basées sur l'intelligence artificielle (IA) peut présenter une approche convenable. Les techniques d'intelligence artificielle (IA) sont considérées comme de nouvelles méthodes utilisées dans l'étude des décharges électriques. Alors, cette étude vise à établir une méthodologie originale de prédiction des étapes de la décharge électrique dans l'air et dans les conditions normales (20°C, 11g/m³ d'humidité et à pression normale) en utilisant la logique floue (LF) et les réseaux de neurones artificiels (RNA) comme techniques d'intelligence artificielle.

2. Organisation du document

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

Chapitre 1 : Etat de l'art et problématique

Chapitre 2 : Modélisation de la décharge électrique dans une configuration pointe-plan

Chapitre 3: Intelligence artificielle

Chapitre 4: Prédiction de la décharge électrique dans l'air en utilisant l'intelligence artificielle

2.1. Etat de l'art et problématique

Ce premier chapitre se décompose en trois sections. La première section présente un bref historique sur les décharges électriques et un petit rappel sur le mécanisme des décharges électriques dans les gaz. La deuxième partie présente quelques travaux publiés concernant l'étude des décharges électriques dans un système pointe plan. La troisième partie est dédiée à montrer notre contribution dans l'étude d'une décharge pointe positive-plan.

2.2. Modélisation de la décharge électrique dans une configuration pointe-plan

Le deuxième chapitre est consacré, dans un premier temps, à rappeler brièvement les étapes du développement de la décharge électrique dans une configuration pointe positive-plan. Nous

présentons ensuite une synthèse de quelques critères et modèles connus dans la littérature des décharges dédiés à l'étude des décharges électriques dans l'air en champ non-uniforme. Dans un troisième temps, nous détaillons la méthodologie suivie pour prédire les étapes de la décharge dans une telle configuration en utilisant un modèle mathématique que nous proposons.

2.3. Intelligence artificielle

Ce chapitre présente la théorie de la logique floue et des réseaux de neurones artificiels. Ces deux techniques d'intelligence artificielle sont relativement nouvelles dans l'étude des décharges électriques. Il est important de bien préciser les notions fondamentales employées pour une bonne utilisation de ces deux techniques dans notre travail.

2.4. Prédiction de la décharge électrique dans l'air en utilisant l'intelligence artificielle

Ce chapitre décrit la méthodologie suivie pour l'application des techniques de l'intelligence artificielle pour la prédiction des étapes de la décharge électrique dans la configuration pointe-plan, où la pointe est soumise à une tension positive continue. En premier lieu, nous appliquons la technique basée sur la logique floue. Par la suite nous appliquons celle basée sur les réseaux de neurones artificiels.

CHAPITRE I: ETAT DE L'ART ET PROBLEMATIQUE

I.1. Introduction

Un gaz est constitué d'un grand nombre de particules de types différents, atomes, molécules, ions, électrons ; en agitation incessante. Sous l'action d'un champ électrique appliqué, les particules chargées et neutres prennent mouvement dans la direction du champ électrique et causent la formation d'un courant électrique dans le gaz [Roy-84, Pla-02]. Cela veut dire, si dans un gaz, au moyen d'un mécanisme quelconque, apparaissent des charges électriques libres (électrons, ions positifs, ions négatifs), le gaz devient conducteur d'électricité [Bad-68, Cas-01] et on parle de décharge électrique dans un gaz. Ce phénomène est particulièrement intéressant comme il est utilisé dans de nombreuses applications technologiques. L'étude de la décharge électrique dans les gaz est un domaine vaste, sujet qui a fait l'objet de nombreuses études. Cela n'est dû qu'à la très grande complexité du phénomène et des mécanismes qui le constituent. Les décharges électriques peuvent être classées suivant différents critères: Conditions atmosphériques, la configuration des électrodes, le type de la tension appliquée,... etc. Cependant de grandes avancées ont été faites ces dernières décennies dans l'amélioration des moyens d'étude des mécanismes d'initiation et développement de différents types de décharges électriques dans les gaz. Cela a permis d'accroître les connaissances sur le phénomène et d'avancer dans les applications qui ont d'ailleurs connu de bien plus larges expansions [Aba-09].

Dans ce premier chapitre nous exposerons une brève présentation de quelques phénomènes physiques fondamentaux dans l'initiation et le développement d'une décharge électrique et nous effectuerons aussi une courte synthèse bibliographique sur les différents travaux réalisés dans le cadre de l'étude des décharges électriques dans les gaz et en particulier dans l'air. Nous commençons dans un premier temps par la justification de l'utilisation de l'intelligence artificielle dans notre étude et nous montrons dans un second temps notre contribution dans l'application de l'intelligence artificielle dans l'étude des décharges électriques pour des intervalles d'air pointe-plan.

I.2. Historique

L'étude scientifique des décharges électriques a commencé au XVI^e siècle par l'observation expérimentale d'étincelles produites par des générateurs électrostatiques et des éclairs des orages. Vers 1750 et 1752, L'abbé Nollet et B. Franklin énumérèrent et prouvèrent les points communs entre la foudre et les étincelles qu'ils étudièrent. Au cours du XIX^e siècle, Faraday, décrit beaucoup d'expériences et inventa les terminologies pour les expliquer. Il définit notamment, les termes «électrode», « anode », « cathode », « ion », « anion » et « cation ». L'invention de piles suffisamment puissantes a permis à V.V. Petrov de produire le premier arc électrique en 1803 dans l'air. Humphrey Davy en fit ensuite l'étude. Mais ce fut Michael Faraday qui, entre 1831 et

1835, découvrit et commença l'étude des décharges lumineuses en utilisant des tubes contenant des gaz à une pression de l'ordre de 100 Pa sous 1000 V. Apparue après 1841, la lampe électrique à arc qui émit entre deux électrodes de graphite une lumière très brillante qui ne convient pas à l'usage domestique. Elle fut utilisée pour l'éclairage public avant d'être supplantée dans ce domaine par la lampe d'Edison. Par la suite, à la fin du XIX^e siècle et au début du XX^e siècle, la physique des décharges électriques dans les gaz a permis à la physique atomique de faire ses premiers progrès avec les travaux de William Crooke et de Thomson, avec en particulier la mise en évidence du rôle fondamental des électrons dans la décharge et la mesure du rapport e/m . Vers 1900, un élève de Thomson, Townsend, réalisa la première modélisation d'une décharge, correspondant au cas de la décharge lumineuse en champ uniforme. Langmuir travailla aussi sur les décharges et introduisit le concept de plasma. Le générateur de Van de Graaf a été mis au point vers 1930 pour produire de très hautes tensions (1MV). Au cours du XX^e siècle on passa à l'exploration des décharges en fonction de la fréquence, tandis que la modélisation progressait en raison du développement d'applications de plus en plus nombreuses des décharges [Sal-05].

I.3. Mécanisme des décharges électriques dans les gaz

Sous l'effet des rayonnements (naturels) ionisants, un gaz contient toujours une certaine quantité de particules chargées. Soumises à un champ électrique et donc à la force de Coulomb, les particules chargées vont entrer en collision avec les espèces environnantes. On distingue alors deux types de chocs: élastiques et inélastiques. Dans les chocs élastiques, les particules conservent leur énergie, seule leur vitesse est modifiée. L'énergie cinétique globale du système reste inchangée. Par contre, dans les chocs inélastiques, l'énergie interne des particules change. L'énergie de la particule incidente, dans ce cas, est suffisante pour que la particule heurtée passe à un niveau d'énergie supérieure ou soit ionisée [Kol-09, Vin-02]. La production des charges (ex : électrons, ions positifs, ions négatifs) est le mécanisme le plus important dans la conduction des gaz. Il y a plusieurs processus pour générer ces charges [Let-99, Kuf-00], les processus importants responsables de l'ionisation d'un gaz sont résumés dans la figure suivante:

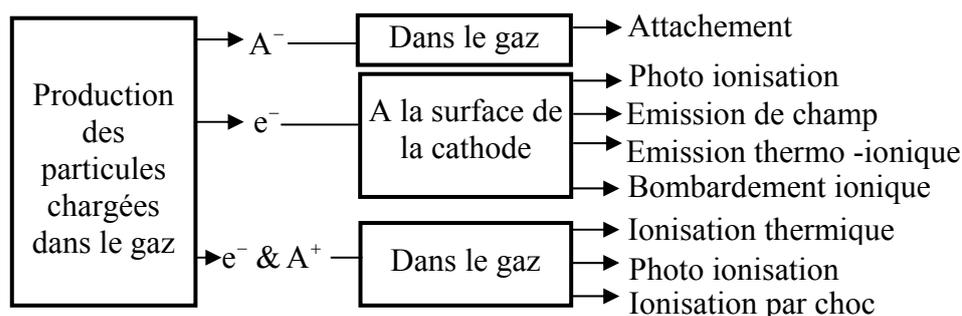


Figure I.1. Schéma des processus d'ionisations

Considérons un gaz à une pression "p", il peut exister dans ce gaz, en l'absence de tout champ électrique appliqué, un certain nombre d'électrons libres produits, soit par des mécanismes naturels, tels que radioactivité terrestre et atmosphérique, soit par des mécanismes artificiels, par exemple en bombardant la surface cathodique par un rayonnement ultraviolet (x ou γ) pour en extraire des électrons [Kuf-00]. Si une tension "V" et donc un champ électrique "E" sont appliqués entre les deux électrodes (cas d'un champ uniforme par exemple). L'électron germe accéléré par le champ puisse acquérir une énergie suffisante pour ioniser par collision les molécules rencontrées au cours de son trajet vers l'anode. Cet électron va libérer un nouvel électron et un ion positif (ionisation par collision). Les deux électrons, sous l'effet du même champ électrique vont se déplacer et causer d'autres ionisations et ramener le nombre d'électrons à "quatre" et le nombre d'ions positifs à "trois" et ainsi de suite. C'est ce phénomène, dit d'avalanche, qui provoque un accroissement exponentiel de la densité de charge électronique [Roy-84, Kuf-00, Gir-99].

La multiplication décrite précédemment peut s'étudier quantitativement à partir de la connaissance du coefficient (α), dit "premier coefficient de Townsend" et qui représente le nombre d'électrons (ou d'ions positifs) créés par un électron par unité de longueur dans la direction du champ. A température constante, Townsend a déduit l'expression approchée de coefficient (α) suivante [Raj-06]:

$$\alpha = A.p.e^{\frac{B.p}{E}} \quad (I.1)$$

Où "p" représente la pression du gaz de remplissage et "E" le champ électrique appliqué.

Les coefficients "A" et "B" sont liés aux propriétés du gaz.

L'apparition d'un électron primaire au niveau de la cathode se traduit par l'arrivée de $e^{\alpha.d}$ électrons au niveau de l'anode. La relation de Townsend s'écrit alors :

$$I = I_0 e^{\alpha.d} \quad (I.2)$$

Avec I : Courant (A)

I_0 : Courant initial dû aux électrons primaires (A)

d: Distance interélectrodes (m)

α : Premier coefficient de Townsend (m^{-1})

En dehors de ce mécanisme de multiplication des électrons proposé par Townsend, des électrons secondaires peuvent être émis par impact d'ions positifs sur la cathode.

Quantitativement, on définit un coefficient " γ ", dit "deuxième coefficient d'ionisation de Townsend", qui représente le nombre moyen d'électrons arrachés à la cathode par ions positifs incidents [Aky-02].

La formule du courant obtenue quand le bombardement de la cathode par les ions positifs est pris en considération sera:

$$I = I_0 \frac{e^{\alpha d}}{1 - \gamma(e^{\alpha d} - 1)} \quad (I.3)$$

Le critère d'auto-entretien de la décharge s'écrit alors :

$$\gamma(e^{\alpha d} - 1) = 1 \quad (I.4)$$

Pour prendre en compte le phénomène d'attachement η , il convient alors de l'introduire dans la relation de Townsend:

$$I = I_0 e^{(\alpha - \eta)d} \quad (I.5)$$

Le critère d'auto-entretien de la décharge s'écrit donc :

$$\gamma(e^{(\alpha - \eta)d} - 1) = 1 \quad (I.6)$$

I.3.1. Théorie des streamers

Un "streamer" ou "dard" est un fin canal partiellement ionisé qui se forme à partir de l'avalanche primaire dans lequel coexistent des charges positives et négatives, qui va croître vers les deux électrodes. Si le streamer se dirige vers la cathode, il est dit "positif". Dans le cas contraire, correspondant à de très fortes tensions et de grandes distances inter-électrodes on parle du streamer "négatif". La situation intermédiaire restant possible [Roy-84].

La formation d'un streamer s'explique par les mécanismes de photoionisation se produisant à l'intérieur de l'avalanche primaire. Les électrons accélérés par le champ électrique excitent par collision des atomes du gaz environnant qui reviennent à leur état fondamental avec émission des photons. Si ces photons ont une énergie inférieure à l'énergie d'ionisation des atomes du gaz environnant, ils peuvent être absorbés par ces atomes avant d'être émis de nouveau. Si leur énergie est supérieure à l'énergie d'ionisation des atomes du gaz, de nouveaux des électrons peuvent être libérés. Si les électrons ainsi produits sont situés au voisinage de l'avalanche primaire, ils vont créer de nouvelles avalanches dites secondaires [Roy-84, Kuf-00].

Ainsi le streamer consiste en [Kuf-00]:

- Une région ionisée, légèrement conductrice (5kV/cm) composée d'ions positifs et d'électrons.
- Une région "active" composée d'ions positifs qui favorisent le développement d'avalanches.

I.4. Contexte de notre travail

La décharge électrique dans l'air a fait l'objet de nombreuses études expérimentales et théoriques, non seulement en raison de l'intérêt scientifique du mécanisme des décharges, mais aussi en raison de ses applications importantes dans l'industrie, telles que les précipitateurs électrostatiques, générateurs d'ozone, traitement de surface et d'autres. L'étude des décharges

électriques dans l'air, à pression atmosphérique, a été effectuée essentiellement en polarité positive. En effet, du point de vue diélectrique, cette polarité constitue la contrainte la plus sévère pour les matériels électriques en comparaison avec celle en polarité négative [Gir-09, Sat-09].

La disposition pointe- plan constitue l'une des configurations de base dans la recherche sur les champs électriques non-uniformes et les propriétés diélectriques en haute tension. La majorité des études publiées traitent les systèmes d'électrodes pointe -plan sous tensions continue plutôt que sous tension impulsionnelle, c'est parce que les systèmes à courant continu sont beaucoup plus simples à comprendre et à analyser. Ils sont aussi moins rigides que sous tensions impulsionnelles.

Du fait de la disponibilité d'une large base de données dans la littérature [Sal-05, Aba-09], nous nous sommes intéressés à l'étude de la décharge positive dans une configuration pointe-plan dans l'air ambiant à pression atmosphérique normale et dans des conditions normales de température et d'humidité.

I.4.1. Etudes des décharges électriques

Un très grand nombre d'essais de laboratoire, réalisés sur différents systèmes d'électrodes, a permis de mieux comprendre les décharges électriques et même d'avoir des formules empiriques pour calculer la tension d'amorçage. La complexité des tests réalisés au laboratoire à cause de l'influence de différents paramètres sur ces études les rend d'usage limité. Par ailleurs, plusieurs travaux ont été réalisés dans le cadre de la modélisation des décharges pour améliorer la compréhension des processus fondamentaux des décharges électriques dans les gaz en particulier dans l'air, dont le but est d'obtenir de bons résultats [Zeg-10, Rez-07, Sat-09].

I.4.1.1. Modélisation des décharges électriques

Du fait de la complexité des phénomènes qui les composent, les décharges électriques se produisant dans l'air sont cependant particulièrement difficiles à modéliser. Celles-ci sont régies par des mécanismes fortement non-linéaires et multi-échelles, à la fois dans le temps et dans l'espace [Sei-11, Kha-08]. Ainsi plusieurs modèles ont été proposés pour l'étude de la décharge électrique dans les gaz et en particulier dans l'air. Dans ce qui suit nous présentons une synthèse critique de quelques travaux effectués dans le domaine de la modélisation de la décharge électrique et nous mettrons la lumière sur notre contribution dans ce travail vis-à-vis de ces travaux.

a. Modèles mathématiques des décharges

Les modèles mathématiques décrivant les décharges électriques doivent reproduire aussi finement que possible les phénomènes physiques mis en jeu dans la décharge étudiée. Du fait de

la complexité des décharges électriques étudiées, cette représentation mathématique est liée au choix d'approximations et d'hypothèses qui rendent le problème soluble [Zeg-10]. En l'absence de champs magnétiques (comme dans notre cas d'étude), les équations définissant le champ électrique et la densité de charges sont obtenues comme suit [Ada-94, Sat-09]:

$$\nabla \cdot \vec{D} = \rho \quad (\text{I.7})$$

$$\nabla \cdot \vec{j} = -\frac{\partial \rho}{\partial t} \quad (\text{I.8})$$

$$\vec{D} = \epsilon \vec{E} \quad (\text{I.9})$$

$$E = -\nabla V \quad (\text{I.10})$$

$$\vec{j} = -k\rho \vec{E} - D\nabla \rho \quad (\text{I.11})$$

Où \vec{D} est le vecteur déplacement électrostatique, ρ est la densité de la charge d'espace, V est le potentiel électrique, \vec{j} est la densité du courant électrique, ϵ est la permittivité du gaz, \vec{E} est le champ électrique, k est la mobilité des charges créées.

Les équations (I.10) et (I.11) peuvent être combinées avec l'équation (I.7) pour obtenir l'équation de Poisson donnée par :

$$\nabla \cdot E = \nabla^2 V = -\frac{\rho}{\epsilon_0} \quad (\text{I.12})$$

La substitution de l'équation (I.11) dans (I.8) pour obtenir l'équation de continuité suivante :

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + k\vec{E} \cdot \nabla \rho + \frac{k}{\epsilon} \rho^2 - D\nabla^2 \rho = 0 \quad (\text{I.13})$$

L'équation (I.12) est habituellement utilisée pour déterminer le potentiel électrique (champ électrique) et la densité de charge donnée par l'équation (I.13).

Dans une décharge électrique, il y a une compétition entre génération et perte des particules chargées. Selon les taux de ces processus, la décharge peut se transformer en différents types ou peut être arrêtée [Ser-04]. La description complète du comportement dynamique d'un ensemble de particules dans une décharge électrique peut être donnée par la fonction de distribution $f(\mathbf{v}, \mathbf{r}, t)$ qui suit l'équation de Boltzmann suivante [Rad-99] :

$$\frac{\partial f}{\partial t} + \mathbf{v} \cdot \nabla_{\mathbf{r}} f + \left(\frac{q\mathbf{E}}{m} \right) \cdot \nabla_{\mathbf{v}} f = \left(\frac{\partial f}{\partial t} \right)_{\text{coll}} \quad (\text{I.14})$$

Où, t est le temps, \mathbf{r} est le vecteur position, \mathbf{v} est la vitesse du vecteur \mathbf{r} , m est la masse de la particule. La fonction de distribution représente la densité des particules, à un temps t , dans le volume entre \mathbf{r} et $\mathbf{r} + d\mathbf{r}$ avec des vitesses entre \mathbf{v} et $\mathbf{v} + d\mathbf{v}$.

A la base de l'hydrodynamique, et dans le cas de la propagation d'une avalanche et d'un streamer entre deux électrodes métalliques, les densités des espèces chargées dans une décharge électrique sont calculées par les équations de continuité couplées suivantes [Rad-99]:

$$\left\{ \begin{array}{l} \frac{\partial n_e}{\partial t} + \nabla \cdot (v_e n_e) - \nabla \cdot (D_e \nabla n_e) = (\alpha - \eta_u - \eta_s) |v_e| n_e + n_{un} f_{ud} + n_{sn} f_{sd} - \beta_{ep} n_e n_p + S_{ph} \\ \frac{\partial n_p}{\partial t} - \nabla \cdot (v_p n_p) = \alpha |v_e| n_e - n_p (\beta_{pe} n_e + \beta_{pn} (n_{un} + n_{sn})) + S_{ph} \\ \frac{\partial n_{sn}}{\partial t} + \nabla \cdot (v_{sn} n_{sn}) = \eta_s |v_e| n_e - n_{sn} f_{sd} + n_{un} f_c - \beta_{pn} n_{sn} n_p \\ \frac{\partial n_{un}}{\partial t} + \nabla \cdot (v_{un} n_{un}) = \eta_u |v_e| n_e - n_{un} (f_{ud} + f_c) - \beta_{pn} n_{un} n_p \end{array} \right. \quad (I.15)$$

$n_{e,p,sn,un}$: Densités des électrons, ions positifs, ions négatifs stables, et ions négatifs instables respectivement

$v_{e,p,sn,un}$: Vitesse de dérive des électrons, ions positifs, ions négatifs stables et ions négatifs instables respectivement.

D_e : Diffusion des électrons.

α : Coefficient d'ionisation.

$\eta_{s,u}$: Coefficients d'attachement des ions négatifs stables et instables.

$f_{sd,ud}$: Fréquence de détachement des électrons des ions négatifs stables et instables.

f_c : Fréquence de conversion de charge.

$\beta_{pe,pn}$: Coefficients de recombinaison électron- ion positif et ion positif- ion négatif.

S_{ph} : Terme source dû à la photo-ionisation.

Quand le champ électrique local est influé par la charge d'espace, les coefficients dans les équations précédentes deviennent dépendants du temps et de l'espace.

La loi de Gausse donne l'expression du champ de la charge suivante [Ser-04, Ser-03] :

$$\nabla \cdot E_{\text{charge d'espace}} = \frac{\rho}{\epsilon_0} = \frac{e^-}{\epsilon_0} (n_p - n_e - n_{un} - n_{sn}) \quad (I.16)$$

Le champ résultant sera :

$$E(\vec{r}, t) = E_{\text{Laplacian}}(\vec{r}, t) + E_{\text{charge d'espace}}(\vec{r}, t) \quad (I.17)$$

Il est à mentionner, que les équations précédentes décrivant l'évolution d'une décharge électrique dans un gaz sont couplées et non- linéaires. Alors il est en général, difficile de les résoudre analytiquement, et cela nécessite de nombreuses hypothèses simplificatrices qui réduisent considérablement la fiabilité de la solution. Par conséquent, la seule façon d'obtenir des résultats significatifs physiquement est d'appliquer les méthodes numériques pour les résoudre. Dans cet objet, plusieurs méthodes et techniques numériques sont proposées pour le calcul du

champ électrique et de la densité de charge [Ser-04, Sat-09]. Dans ce qui suit nous citerons quelques travaux réalisés pour le calcul du champ électrique (résolution de l'équation de Poisson) et de la densité de charge d'espace (résolution de l'équation de continuité).

b. Modèles numériques des décharges

Malgré l'utilisation très répandue de la décharge des systèmes d'électrodes inhomogènes (décharge couronne), il n'y a pas de modèle numérique fiable et précis pour la simulation par ordinateur de ce phénomène. Les techniques numériques actuelles sont suffisantes pour estimer approximativement les caractéristiques de base de la décharge électrique (courbe de V-I, champ électrique, densité de courant,...etc.)[Ada-04, Kha-06]. Diverses méthodes ont été utilisées pour résoudre l'équation de Poisson et l'équation de la continuité de la charge. Les auteurs ont étudié diverses géométries d'électrodes à, une dimension (1D), quasi bi-dimensions (1,5D), deux dimensions (2-D) et en trois dimensions (3-D) [Ser-03].

b.1. Géométries 1-D et 1,5 D

De nombreux documents décrivant tels modèles de la décharge électriques ont été publiés, tandis que de nombreuses techniques numériques ont été utilisées pour le calcul numérique de la densité de charge d'espace et du champ électrique local.

Y. Serdyuk et al [Ser-03] ont utilisé dans leur travail un modèle quasi bi-dimensionnel (**1,5 D**), pour l'étude d'un streamer négatif dans l'air à pression atmosphérique où ils ont considéré que le streamer a une forme d'un canal cylindrique d'un rayon fixe, et que la charge est distribuée uniformément sur toute la section transversale du canal. L'équation (**I.9**) a été utilisée dans leur travail pour le calcul des densités des particules. Le champ électrique est calculé par la résolution de l'équation de Poisson en appliquant les coordonnées cylindriques.

J.M. Park et al [Par-02] ont développé dans leur application numérique, un modèle numérique **3-D** qui dépend du temps. Ce modèle a été comparé avec un modèle **1-D** de la couronne et un modèle **1,5** d'un streamer simple pour obtenir une meilleure analyse des caractéristiques de la propagation du streamer dans un réacteur fil-cylindre. Pour résoudre l'équation (**I.10**), ils ont utilisé l'algorithme du transport du flux corrigé (FCT) donné par **Zalesak** [Zal-79]. Ils ont résolu l'équation de Poisson en utilisant un gradient stabilisé biconjugué (BiCGStab).

b.2. Géométrie 2-D

Différentes techniques ont été utilisées pour la résolution de l'équation de Poisson qui régit la distribution du champ électrique dans l'espace inter-électrodes. La méthode des différences finies a été utilisée pour la résolution de cette équation au début de l'apparition des techniques numériques et des méthodes itératives [Ada-04, Kha-06].

McDonald et al [McD-78] ont construit un maillage structuré pour appliquer la méthode des différences finies. Ils ont utilisé la **MDF** pour résoudre les deux équations (champ et densité de charges) et utilisé la solution harmonique analytique pour déterminer le champ électrique en l'absence de charge d'espace. La **MDF** a été adoptée pour calculer la densité de charge d'espace à partir du champ calculé. Après le calcul de la densité de charge d'espace, les auteurs ont calculé la nouvelle distribution du potentiel en utilisant la **MDF** et les deux équations ont été résolues de manière itérative jusqu'à la convergence ("self-consistent solution"). Cet algorithme donne des résultats satisfaisants, mais nécessite un grand nombre de noeuds et d'itérations pour arriver à la convergence [Kha-06]. La plupart des travaux antérieurs réalisés pour la résolution de l'équation de Poisson par la méthode des différences finies n'ont pas donné de bons résultats à cause de la limitation de cette technique pour des géométries à courbure d'électrodes pointue. L'utilisation de la méthode des éléments finis a pallié ce problème dans la plupart des cas d'études [Ada-07]. L'utilisation de la **MEF** pour résoudre l'équation de Poisson et l'équation de la conservation de charge est très rare.

K. Yamazawa et al. [Yam-97] ont utilisé la méthode des éléments finis (FEM) pour calculer le champ électrique dans la configuration pointe-plan. Ils ont calculé les distributions de champ pour différentes courbures de la pointe qui varient de $0,1 \mu\text{m}$ à $30 \mu\text{m}$. La longueur de l'entrefer et le diamètre du plan ont été fixés à 5 et 30 mm respectivement. Durant leur travail, les auteurs ont utilisé un procédé d'optimisation basée sur les lignes de potentiel pour calculer la distribution du champ pour la tension de seuil d'initiation du streamer dans le cyclohexane.

L. Mokhnache et al. [Mok-00] ont utilisé la MEF pour calculer le champ électrique dû aux ions positifs et aux électrons créés à la tête de l'avalanche dans un intervalle d'air pointe-plan. Leur modélisation a été basée sur la formulation du champ résultant obtenu par la sommation vectorielle du champ électrique appliqué E_0 , le champ des charges d'espace et le champ de polarisation d'une barrière isolante introduite dans l'intervalle d'air. Le champ résultant est obtenu grâce à la résolution des équations de Maxwell par la MEF.

K. Adamiaka et al.[Ada-04] ont proposé une technique numérique pour déterminer les distributions du champ électrique et densité de charge dans le cas d'une décharge couronne positive dans le gaz contenant dans une géométrie pointe-plan. Cette technique est basée sur la méthode des éléments de contours, celle des éléments finis et sur la méthode des caractéristiques appliquée le long des lignes du champ électrique et des trajectoires des ions positifs point par point. Les deux premières méthodes sont utilisées pour obtenir la composante harmonique du champ de la charge et du champ électrique total, respectivement, et la dernière méthode a été utilisée pour déterminer la distribution de la densité de charge. La simulation numérique donne la

distribution de la densité de courant qui est comparée avec la densité du courant mesurée pratiquement.

P. Sattari et al. [Sat-10] ont proposé un algorithme numérique pour la simulation de la dynamique de la décharge couronne dans l'air dans une configuration formée d'une électrode parabolique et d'un plan en supposant un seul type de porteurs de charge. Les résultats des simulations montrent le comportement du courant de la couronne et de la densité de charge d'espace sous deux types de formes d'onde de la tension appliquée où le champ électrique a été calculé au moyen de la méthode des éléments finis, et la technique de transport de flux-corrigée a été utilisée pour le calcul de la densité de charge d'espace.

b.3.Géométrie 3-D :

L'étude de géométries **3-D** est plus difficile et plus complexe numériquement. Le problème le plus important en **3-D** est la définition du maillage [Kha-06, Ada-04].

P. Atten et al [Att-12] ont résolu les deux équations couplées (de la densité de charge et du champ locale) pour la configuration pointe-plan (géométrie 3-D avec symétrie de révolution).

K. Yanallah et al [Yan-12] ont proposés un modèle semi -analytique statique de la décharge couronne dans un intervalle pointe-plan, où les expressions des espèces chargées sont formulées le long des lignes de champ. Ce même modèle a été utilisé pour déterminer la distribution spatiale (3-D axisymétriques) du champ électrique et les densités des électrons et des ions positifs dans la configuration d'électrodes étudiée.

J.H. Davidson et al [Dav-96] ont commencé leur travail par l'étude de la géométrie 3-D avec symétrie de révolution pour la configuration pointe-plan [Kha-06]. Ils passent de cette configuration à une géométrie complètement 3-D pour déterminer la densité de charge d'espace dans l'intervalle inter- électrodes. Ces auteurs ont aussi résolu le problème de deux électrodes sphériques concentriques comme un problème 3-D [Kha-06].

A.A. Elmoursi et al [Elm-90] ont aussi étudié la distribution de la densité de la charge d'espace dans une géométrie **3-D** avec symétrie de révolution. Ils ont travaillé sur la configuration tige-plan où une tige qui se termine par une calotte sphérique est placée en face du plan collecteur [Kha-06].

c. Méthodes basées sur les techniques de l'intelligence artificielle

Avec le développement des outils de calcul et de simulation numérique; différentes techniques d'intelligence artificielle ont été utilisées dans l'étude des décharges électriques. Ces techniques peuvent être classées en quatre groupes: techniques basés sur les réseaux de neurones, logique floue logique, algorithme génétique et les systèmes experts [Vai-08, Jos-11]. De nombreux

auteurs ont montré la possibilité d'appliquer des techniques de l'intelligence artificielle dans différentes méthodes d'analyse et d'étude des décharges électriques.

L. Mokhnache et al. [Mok-01] ont prédit la tension de claquage d'un intervalle pointe- barrière-plan en utilisant les réseaux de neurones artificiels (RNA). Ils ont utilisés les résultats expérimentaux des travaux antérieurs pour valider leur étude par le RNA.

S.S. Tezcan et al. [Taz-05] ont prédit la tension de claquage dans le mélange des gaz Ar et SF6 en utilisant un réseau de neurone. Ils ont utilisé des données expérimentales disponibles pour les gaz cités dessus pour l'apprentissage du réseau de neurones proposé. A la fin de leur travail, ils ont comparé les résultats obtenus par le RNA avec les données expérimentales ainsi avec résultats calculées en utilisant le critère de streamer.

D. Mandal et al. [Man-07] ont essayé de modéliser et d'optimiser le processus complexe du mécanisme de la décharge électrique (EDM) en utilisant des techniques de « Soft computing ». Ils ont utilisé les réseaux de neurones artificiels avec l'algorithme d'apprentissage de retro-propagation pour modéliser le processus. Ils ont optimisé le processus par une méthode d'optimisation multi- objectif basé sur les algorithmes génétiques dite « non-dominating sorting genetic algorithm-I ».

W.F Chang et al. [Cha-04] ont proposé une approche mathématique précise basée sur les systèmes «grey» (un système avec des informations partiellement connues ou partiellement inconnues) et « floues » pour prédire le claquage du gaz. Les performances de l'approche proposée sont améliorées par la détermination de la valeur appropriée du coefficient d'identification en utilisant une fonction d'appartenance floue. Ils ont montré que l'approche Fuzzy-grey a des performances mieux que celle de l'approche normal -grey.

d. Méthodes stochastiques (probabilistes)

Le développement de l'informatique a facilité l'application des méthodes stochastiques (probabiliste), un développement qui a permis leurs expansions et leurs utilisations dans plusieurs domaines. Dans ce qui suit, nous nous n'intéresserons qu'aux deux méthodes stochastiques (probabilistes) les plus appliquées dans l'étude des décharges électriques.

d.1. Méthode de Monte Carlo

La méthode de Monte Carlo est une approche qui permet la simulation d'un grand nombre de particules (avec ou sans interactions entre elles) en utilisant une représentation probabiliste. Son utilisation ne se limite pas à la physique, et encore moins à la modélisation des décharges [Rev-99].

A. Settaouti et al [Set-11] ont étudié, par simulation numérique, une décharge couronne dans un intervalle pointe positive–plan. Dans leur travail, ils ont simulé l'initiation et le développement de l'avalanche dans telle géométrie d'électrodes par la méthode de Monte Carlo, où ils ont obtenu avec cette méthode, la variation spatio-temporelle du champ électrique et de la densité de charge ainsi que la vitesse de l'avancement de la tête de l'avalanche dans l'espace inter - électrodes étudié.

L. Zeghichi et al [Zeg-13] ont utilisé la méthode de Monte-Carlo pour simuler une décharge électrique dans l'oxygène en suivant l'historique aléatoire des électrons libres. Ils ont aussi utilisé cette même technique pour déterminer quelques paramètres de la décharge durant son développement temporel en déterminant l'influence de la pression et la tension appliquée sur la tension de seuil de claquage de l'intervalle étudié.

d.2. Méthode des fractales

La morphologie des décharges électriques a fait l'objet de nombreux travaux [Keb-06]. C'est dans les années 70 que le terme de "géométrie fractale" a été inventé pour désigner la forme des figures aléatoires et des figures auto similaires [Cou-09].

Y. Sawada et al [Saw-82] ont introduit le modèle stochastique pour décrire les structures ramifiées des décharges; ils ont aussi analysé les propriétés fractales d'une structure aléatoire en 2 dimensions obtenue par simulation, en utilisant la géométrie fractale.

L. Niemeyer et al [Nie-82] ont utilisé la théorie des fractales pour élaborer un modèle maillé en treillis de décharges électriques dans les gaz. Dans ce modèle, appelé aussi **NPW** (Niemeyer, Pietronero et Wiesmann), la probabilité de propagation des décharges est explicitement liée au champ électrique local.

H.J. Wiesmann et al [Wie-86] par la suite, ont introduit plusieurs caractéristiques du champ électrique dans le modèle NPW et ils ont effectué des recherches sur le caractère stochastique des décharges surfaciques (2 dimensions) [Keb-06].

J.A. Rioussset et al [Rio-07] ont présenté un nouveau modèle probabiliste tridimensionnel (en 3 dimensions) pour étudier la structure du développement bidimensionnel d'un leader positif et négatif (foudre). Le modèle qu'ils ont proposé représente une synthèse du modèle de claquage électrique basé sur l'approche des fractales proposé par Niemeyer et al (1984)[Nie-84]. Ils ont proposé un modèle de la décharge de la foudre dans un domaine cartésien en 3-D. Le domaine d'étude a été discrétisé avec un maillage équidistant.

I.4.2. Position du problème

La présentation décrite dans les paragraphes précédents illustre les progrès réalisés dans l'étude des décharges électriques. La décharge pointe positive –plane reste parmi les configurations les plus étudiées [Sat-99, Ada-04]. Plusieurs modèles, techniques et méthodes ont été utilisés pour l'étude des décharges électriques dans de telle configuration. D'après l'analyse des travaux cités dans ce chapitre, nous pouvons les classer en deux catégories:

1. Modèles mathématiques: Ces modèles sont relativement complexes, à cause des nombreux phénomènes mis en jeu dans la décharge et de leur fort couplage. L'absence des solutions analytiques des équations différentielles permettant de déterminer les caractéristiques essentielles de la décharge (champ électrique, densité de charge d'espace,...etc.) a obligé les chercheurs de se diriger vers l'utilisation des outils informatiques où les solutions numériques et semi –analytique de ces équations restent possibles.

2. Modèles et techniques basés sur les outils numériques et intelligents: Les études de la décharge électrique dans les gaz par simulation numérique ont pu fournir des informations précieuses sur son processus complexe de son développement. Plusieurs modèles et techniques numériques ont été utilisés dans ces études, telle que les différences finies, les éléments finis, les volumes finis, méthode des fractales, méthodes de Monte Carlo, les techniques de l'intelligence artificielle, les méthodes hybrides,...etc. [Yan-12, Sat-99, Ada-04]. Habituellement, les simulations numériques donnent des solutions plus au moins précises, mais il reste toujours des difficultés à contourner pour chaque méthode, nous en citons :

a. Le choix du type de maillage, les conditions aux limites et le type des frontières par exemple, peuvent influencer sur les résultats de simulation lors de l'utilisation des méthodes numériques basées sur les éléments finis, volume finie,...etc.

b. Le choix des premières valeurs numériques initiales au hasard par exemple au début de l'utilisation des méthodes stochastiques peut mal influencer sur les résultats obtenus.

c. Les techniques de l'intelligence artificielle nécessitent toujours une base de données pour les appliquer où la structure et la taille de cette dernière peut influencer sur les résultats obtenus. L'utilisation hybride de ces techniques peut améliorer les résultats, mais aussi peut augmenter le temps de calcul,...etc.

La démarche adoptée au cours de cette thèse porte sur le développement d'une technique de prédiction des étapes de la décharge dans une géométrie pointe -plan autorisant une amélioration globale des résultats. Les techniques de l'IA sont déjà utilisées dans l'étude des décharges

électriques et elles s'avèrent plus simples à appliquer que les méthodes numériques, pour notre cas d'étude.

I.4.2.1. Notre contribution

L'utilisation des techniques d'intelligence artificielle pour les études de prédiction a toujours donné de bons résultats dans différents domaines scientifiques. Notre contribution s'articule sur les points essentiels suivants :

- L'utilisation de ces techniques d'intelligence artificielle pour la prédiction des étapes de l'avancement de la décharge électrique dans un intervalle d'air pointe –plan reste l'un des sujets peu étudiés.

- La plupart des auteurs traitent dans leur travaux publiés l'une des étapes de l'avancement de la décharge électrique uniquement (couronne seule ou streamer ;...). L'application de l'IA pour la prédiction des différentes phases de propagation de la décharge électrique de notre part, peut contribuer à présenter un outil d'aide à la prédiction des types de décharges électriques. L'obtention des résultats de prédictions pour différentes configurations électro-géométriques pointe- plan dans une courte durée et avec une bonne précision est aussi une contribution dans l'étude des décharges électriques.

- La logique floue et les réseaux de neurones artificiels sont les deux techniques de l'IA que nous utiliserons pour cette prédiction. La méthodologie de l'application de ces deux techniques dans la prédiction des étapes de la décharge, représente notre contribution la plus importante. L'idée de l'application de ces deux techniques repose sur l'analyse physique de travaux antérieurs réalisés par l'application du théorème du streamer dans l'étude des décharges électriques. Nous citons :

M. Abdel-salam [Abd-88] qui a proposé une nouvelle méthode pour la prédiction du claquage d'un intervalle d'air en utilisant le critère des streamers. Il a mentionné dans son travail, la variation de la valeur de la constante "K" qui est la valeur de l'intégrale qui décrit le critère du passage au streamer, avec la variation de la longueur de l'espace inter-électrodes sous la même pression. La variation de la valeur de "K" est causée par la variation de la taille de l'avalanche durant le processus du claquage.

P. Osmokrovic. [Osm-93] qui a utilisé le critère des streamers pour l'étude du claquage dans les gaz à très basses tensions, il a considéré les valeurs de l'espace inter-électrodes de (0,1 à 1 mm). Dans son application de ce critère, il a utilisé une autre valeur de "k "(différentes des valeurs comprises entre 18 et 20 connues pour la vérification du critère du streamer).

L'analyse de ces travaux et d'autres, nous a conduit à remarquer que l'application de ce critère donne différentes valeurs de « K ». Notre contribution essentielle, réside donc dans une première étape, à attribuer à chaque étape de la décharge un intervalle de valeur de « K » dans le cas d'un intervalle d'air pointe positive –plan.

Dans une deuxième étape, elle réside dans le calcul des valeurs de "K" avec un modèle mathématique que nous avons développé et avec deux techniques d'intelligence artificielle (RNA et LF). Alors, chaque valeur de "K" calculée peut présenter une étape de l'avancement de la décharge. La méthodologie que nous avons proposée, pour le calcul de cette constante en utilisant la LF et les RNA présente une grande facilité pour la prédiction des différentes étapes de la décharge électrique dans différentes configurations électro-géométriques pointe-plan.

I.5. Conclusion

Le problème dans la modélisation des décharges dans les gaz réside dans la difficulté d'obtention de modèles globaux qui mettent en évidence tout les paramètres influant sur la progression de la décharge jusqu'au claquage. Dans les dernières décennies, la modélisation numérique des décharges électriques est devenue très répandue, à cause de la fiabilité et la capacité des différentes méthodes et technique numériques dans la résolution des équations à dérivées partielles décrivant la physique des décharges électrique.

Nous avons cité dans cette partie du travail certains travaux publiés dans le cadre de l'étude des décharges électriques qui sont proches de notre travail. L'analyse de ces travaux, nous a permis de proposer une approche originale de prédiction des étapes de la décharge électrique basée sur l'application de la logique floue et des réseaux de neurones artificiels pour calculer les valeurs de "K" pour différentes géométrie pointe-plan et de faire correspondre à chaque valeur calculée une étape de la décharge électrique.

La complexité des mécanismes des décharges électriques, nécessite la connaissance et la compréhension des phénomènes physiques responsables du développement d'une décharge électrique. La définition ou le choix d'un modèle pour étudier l'évolution d'une décharge électrique est donc particulièrement délicat à cause de la complexité du phénomène. Dans le second chapitre nous présenterons dans une première étape la physique du développement de la décharge électrique dans un intervalle d'air pointe-plan et les modèles et critères utilisés pour l'étude de la décharge électrique dans tel intervalle. Dans une deuxième étape, nous détaillerons un modèle mathématique que nous avons proposé pour la prédiction des étapes de l'avancement de la décharge électrique dans une géométrie d'électrodes d'air de type pointe –plan.

CHAPITRE II : MODELISATION DE LA DECHARGE ELECTRIQUE DANS UNE CONFIGURATION POINTE-PLAN

II.1. Introduction

Du fait de leurs larges applications industrielles, les décharges électriques dans les gaz ont été beaucoup étudiées à la fois expérimentalement et théoriquement. Pour améliorer la compréhension de leur comportement général, l'élaboration des modèles caractérisant des différentes phases de la décharge électrique a toujours accompagné l'étude expérimentale. Le développement de la décharge électrique jusqu'au claquage dépend d'un ensemble de phénomènes physiques complexes qui se traduisent par des changements structuraux irréversibles du gaz, où le champ électrique reste le paramètre le plus influent [Sat-09]. Lorsque ce champ dépasse le seuil critique d'un gaz il provoque sa détérioration partielle ou complète [Kuf-00, Roy-07]. La modélisation de la progression de la décharge a fasciné depuis longtemps les chercheurs. L'amélioration des résultats de ces modèles est l'objectif fondamental. Elle est principalement liée aux différentes hypothèses simplificatrices considérées dans l'étude de la décharge électrique [Min-03].

Le but principal de ce chapitre est la prédiction des étapes du développement de la décharge électrique dans un intervalle d'air pointe-plan à pression atmosphérique normale en considérant que trois paramètres qui influent sur l'initiation et le développement de la décharge électrique dans l'intervalle d'air étudié qui sont: la tension électrique appliquée (continue positive), rayon de courbure de la pointe et distance inter-électrodes. Nous commencerons dans un premier temps par une brève explication des différentes étapes de l'évolution de la décharge électrique dans l'intervalle d'air à étudier. Puis, dans un second temps, nous présenterons des critères et modèles utilisés dans l'étude des décharges électriques dans tel intervalle. Dans un troisième temps, nous détaillerons une méthodologie de prédiction des étapes de l'avancement de la décharge électrique dans la géométrie d'électrodes étudiée en utilisant un modèle mathématique développé.

II.2. Décharge pointe positive plan dans les gaz

Dans le cas d'une géométrie pointe –plan, le champ intense qui règne à proximité de l'électrode active permet l'ionisation du gaz entraîne une répartition de l'espace inter-électrodes en deux régions. Les ions présents dans cette zone peuvent être positifs ou négatifs (figure II.1).

- La première région voisine de l'électrode à faible rayon de courbure où le champ électrique est intense, elle est le siège d'ionisation du gaz, c'est la zone active. Les électrons libres sont accélérés par le champ électrique provoquant ainsi des collisions avec des atomes neutres ou des molécules; il y a alors multiplication électronique par avalanche [Dub-06, Mar-05].

- Le reste de l'espace inter-électrodes constitue la deuxième région où le champ électrique est faible, c'est la zone de "dérive". Dans cette zone, les électrons ne peuvent pas se multiplier. Des

ions négatifs sont alors formés par attachement électronique. Il sont ensuite entraînés le long des lignes de champ et réagissent avec les molécules rencontrées. Les ions créés par collisions dérivent vers l'électrode plane (ou à grand rayon de courbure) sous l'effet du faible champ en constituant ainsi une charge spatiale mono polaire [Dub-06]. La zone de dérive ionique, électriquement passive, est le siège d'une intense activité physico-chimique (dispersion des espèces, réactions radicalaires...) [You-07]. A l'interface entre la zone d'ionisation et la zone de dérive ionique, la consommation d'électrons par attachement électronique égale leur libération par impact électronique: les coefficients α et η sont alors égaux [Vin-02].

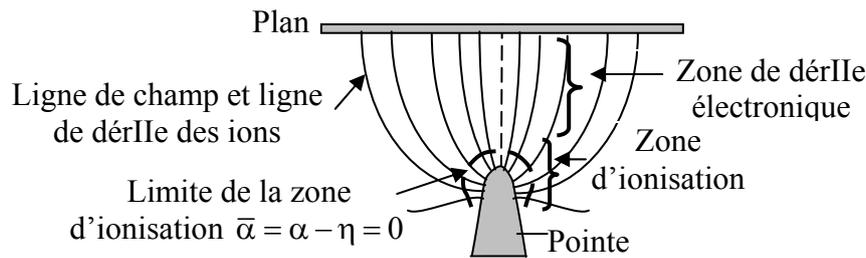


Figure II.1. Topographie de la décharge couronne en configuration pointe-plan

Dans un système pointe positive- plan, l'électrode sous tension est ici positive et l'ionisation se produit uniquement près de la pointe (pas près de l'électrode plane) et la condition d'existence d'une décharge est la présence de particules chargées dans le gaz et l'application d'une tension suffisamment élevée entre les électrodes. En augmentant la tension, les électrons présents au voisinage de la pointe sont accélérés vers celle-ci par le champ électrique. La présence de ces électrons est expliquée par la photoionisation de molécules du gaz par le rayonnement cosmique. Ces électrons accélérés vers la pointe, subissent sur leur trajet des collisions ionisantes, produisant une avalanche (dite primaire) d'électrons attirés eux aussi vers la pointe. Après leur collecte par l'anode, ils laissent dans leur sillage des cations qui forment une zone de charges d'espace positive (figure (II.2)). Celle-ci modifie localement le champ électrique, prolongeant celui créé par l'anode dans l'espace interélectrodes [Vin-02, Mat-06].

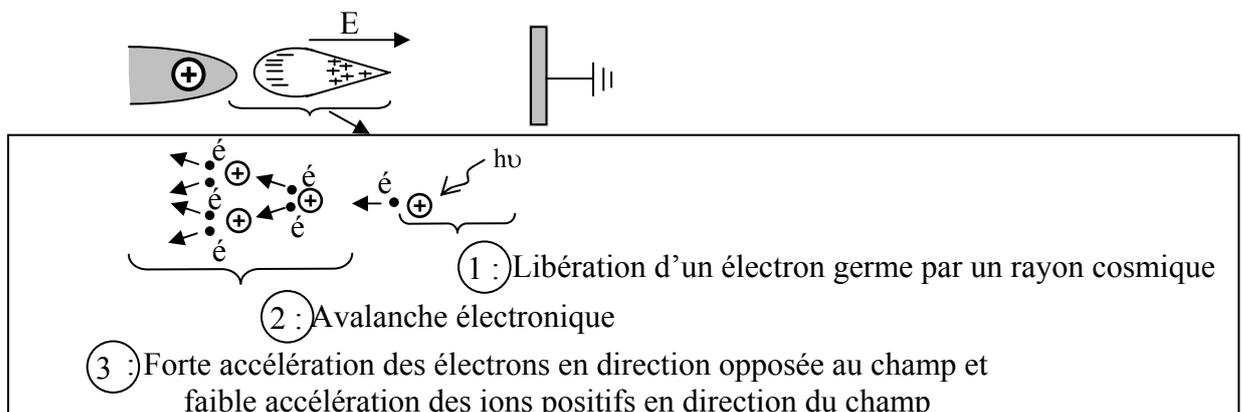


Figure II.2. Mécanisme de développement du streamer proposé par Townsend

En effet, pendant les avalanches électroniques primaires, les collisions inélastiques engendrent, parallèlement à l'ionisation, des processus d'excitation des molécules neutres de leur état fondamental vers des états radiatifs. La relaxation de ces états vers un niveau d'énergie inférieur conduit à l'émission de photons. Le processus de photo-ionisation requiert des photons dont l'énergie correspond au potentiel d'ionisation d'une autre espèce présente dans le gaz. Si les probabilités de transition sont suffisamment élevées, un électron germe est formé dans le gaz. Cet électron est accéléré par le champ de charge d'espace et déclenche une avalanche électronique secondaire. Parmi ces électrons secondaires, ceux proches de la charge d'espace positive vont déclencher des avalanches dites secondaires provoquant la propagation du streamer (Figure (II.3)), et à l'établissement d'un champ de charge d'espace qui s'oppose au champ Laplacien.

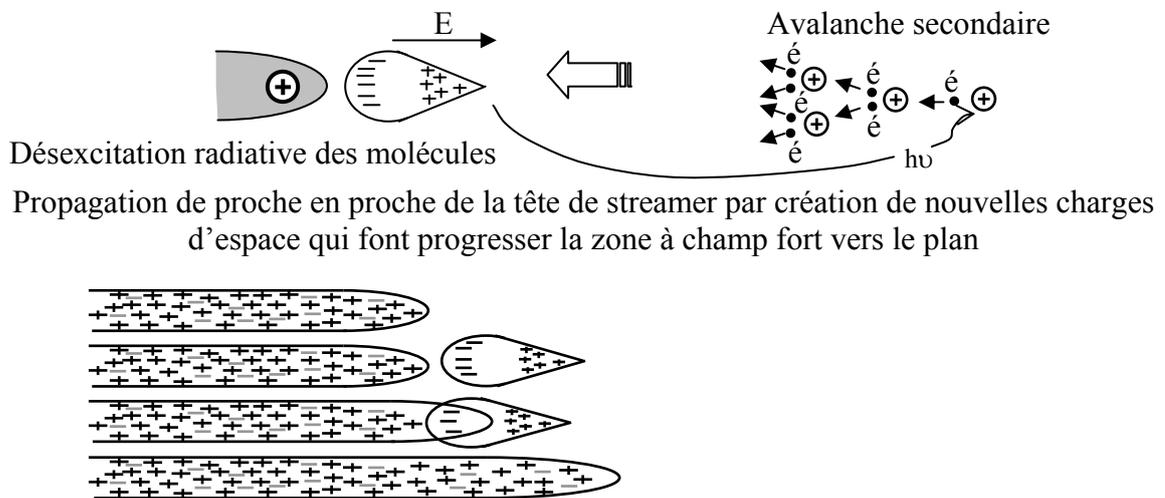


Figure II.3. Mécanisme de propagation du streamer par photoionisation

L'action du champ de charge d'espace fait en sorte que le champ total devient trop faible pour entretenir la décharge ou permettre l'initiation d'une autre avalanche. On assiste à une déplétion des électrons par attachement avec les molécules du gaz ou absorption à l'anode. Il reste une charge d'espace positive formée par les ions positifs produits lors de la phase de décharge. Ces ions vont dériver loin de l'anode [Mar-05, Vin-02, Eym-03, Red-07].

Lorsqu'on augmente la tension, les streamers créés dans la décharge sont plus énergétiques. Si le gaz n'est pas électronégatif, c'est-à-dire si l'attachement électronique reste faible, alors la charge d'espace créée initie un streamer en direction de la cathode. Ce streamer peut présenter des ramifications tridimensionnelles. Si la tension reste sous un niveau tel que le streamer n'atteint pas la cathode, la décharge s'éteint avant d'être ré-initiée.

Lorsque l'on augmente encore la tension, les streamers se développent à des vitesses très élevées vers la cathode. Lorsque la zone cathodique est atteinte, le champ électrique s'intensifie, ce qui provoque l'extraction forte d'électrons et le passage à l'arc [Low-94, Mat-06].

Remarque

Dans les gaz électronégatifs (SF_6 , O_2 , H_2O , $\text{CO}_2\dots$), les électrons s'attachent aux atomes pour former des ions négatifs, le courant électronique devient courant ionique.

Si le gaz présente un pouvoir d'attachement important, les avalanches près de l'anode vont donner lieu à la formation d'un nuage d'ions négatifs qui va induire un champ de charge d'espace au voisinage de la décharge. Dans cette zone relativement limitée et comprise entre le nuage d'ions négatifs et l'anode, règne un champ fort qui peut donner lieu, si le gaz est suffisamment attachant à un claquage de type Townsend où le nuage d'électron négatif joue le rôle de cathode. Les électrons formés par photoionisation dans l'espace compris entre le nuage d'ions négatifs et l'anode vont être accélérés vers l'anode en induisant une forte ionisation dans cette espace. Les ions positifs produits par l'ionisation sont accélérés vers les ions négatifs où ils subissent une neutralisation mutuelle. Le régime de décharge ainsi obtenu est stable, stationnaire et auto-entretenu. Si on continue à augmenter la tension, les streamer, générés sont de plus en plus importants et finissent par atteindre la cathode [Low-94, Mat-06].

II.2.1. Décharges pointe négative -plan

La figure (II.4) représente schématiquement la propagation d'un streamer négatif [Roy-84].

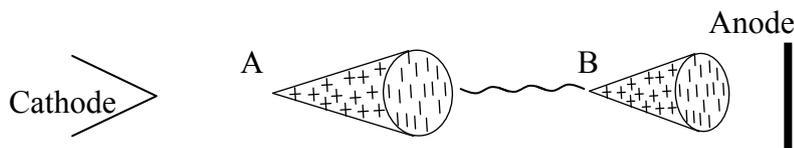


Figure II.4. Représentation schématique du développement d'un streamer négatif.

Dans le cas où la pointe est portée à un potentiel négatif, il y a toujours création d'électrons par photo-ionisation et apparition de la zone d'ionisation autour de la pointe. La charge d'espace ainsi créée modifie localement le champ électrique. Une avalanche se forme à partir de la cathode et se développe dans un champ appliqué décroissant rapidement. En A, un streamer positif dit « streamer rétrograde » se développe en direction de la cathode en même temps qu'un photon crée en B une avalanche secondaire se développant sous l'effet du champ de charge d'espace de l'avalanche primaire. Un streamer rétrograde, analogue à celui formé en A, se crée en queue de l'avalanche secondaire et se propage vers la tête de l'avalanche primaire [Roy-84, Kuf-2000]. Le streamer négatif se propage à partir de la cathode, les ions positifs créés par les avalanches successives viennent d'extraire des électrons de la cathode qui neutralisent les ions positifs et donnent au streamer un excédent de charge négative. Il faut noter qu'à la différence du streamer positif, où les avalanches se développent vers la tête du streamer, c'est-à-dire dans le sens où le champ de charge d'espace croît, les avalanches secondaires se propagent maintenant vers l'anode

dans le sens où l'effet de la charge d'espace décroît rapidement. Il s'ensuit d'une part que la propagation du streamer négatif dépend beaucoup plus des lignes de force du champ appliqué, et présente moins de ramification que le streamer positif, d'autre part que le développement des avalanches secondaire est réduit par la décroissance rapide du champ électrique. Le dernier phénomène explique que la tension nécessaire au développement des streamers et à l'obtention de la décharge entre les électrodes soit plus grande en polarité négative qu'en polarité positive [Roy-84].

II.3. Etapes de la décharge électrique dans un intervalle pointe-plan

Avant de détailler le modèle développé, il est important de décrire l'ensemble des phases du développement de la décharge électrique dans l'intervalle inter-électrodes à étudier jusqu'au claquage. La distance inter-électrodes de la géométrie à étudier est inférieure à 1 m, ce qui met notre configuration dans la gamme des faibles distances inter-électrodes, où le phénomène du leader n'apparaît pas et donc le leader et tout autres phénomènes qui conduisent à sa formation ne seront pas considérés dans notre étude.

Les étapes du développement de la décharge électrique dans la configuration d'électrodes étudiée sont :

II.3.1. Développement de l'avalanche électronique

L'avalanche électronique est initiée lorsque le champ électrique appliqué est élevé. Les électrons au voisinage de la pointe sont accélérés vers celle-ci puissent acquérir une énergie suffisante pour ioniser les molécules rencontrées au cours de leurs trajets vers l'anode par collision [Kuff-00, Vin-02].

N.B. Dans une avalanche, les électrons se situent à sa tête et les ions positifs à sa queue. Les avalanches primaires se propagent vers l'anode par la formation des avalanches secondaires.

II.3.2. Propagation des streamers

La formation d'un streamer s'explique par les phénomènes de photo-ionisation dans les avalanches primaires. La formation et la propagation des avalanches secondaires vers l'anode laissent dans leur sillage des ions positifs et moins d'électrons (absorbés par le métal de la pointe) qui forment une zone de charges d'espace dite "streamer". A cause de leur nombre très élevé, les ions positifs modifient localement le champ électrique en prolongeant celui créé par l'anode dans l'espace inter-électrodes. Le champ local élevé accélère les électrons libres et engendre des avalanches secondaires en provoquant la propagation du streamer [Roy-84, Raj-06, Raj-12]. Sous un champ non-uniforme, la propagation des streamers dépend de la distorsion du champ électrique et elle peut être stoppée après une certaine distance si le champ résultant n'est pas

suffisamment fort pour maintenir un processus d'ionisation suffisamment intense [Kuf-00]. La propagation des streamers est une étape fondamentale dans le processus de décharge électrique. Son mécanisme est lié au nombre d'électrons et d'ions positifs créés par les avalanches, donc à la densité de la charge d'espace et à l'efficacité des photo-ionisations [Red-07].

II.3.3. Formation de la couronne

Le développement soutenu des streamers conduit à un phénomène connu sous le nom de couronne de streamers, expression qui a été utilisée pour décrire la classe générale des phénomènes lumineux produits par le regroupement des streamers autour de l'électrode de faible rayon sous forme de « couronnes » [Vin-02].

II.3.4. Calquage de l'intervalle et formation d'un arc électrique

Lorsque l'on augmente encore la tension, les streamers se développent à des vitesses très élevées vers la cathode. Lorsque la zone cathodique est atteinte, le champ électrique y est concentré, ce qui provoque l'extraction forte d'électrons et le passage à l'arc [Kas-11].

II.4. Critères de la décharge électrique dans les gaz

La décharge électrique dans sa propagation se présente comme un enchaînement de différentes phases ayant des caractéristiques électriques différentes. On trouvera donc des modèles et critères utilisés soit pour décrire une phase particulière de la décharge, soit pour décrire globalement le développement de la décharge avec la succession de ses différentes phases [Roy-84, Don-98]. Il est à noter que nous ne présenterons dans ce chapitre que les modèles d'initiation (avalanche, streamer, couronne) concernant la polarité positive de la pointe mise sous H.T en champ divergent qui est le cas de la géométrie d'électrodes concernée par notre étude.

II.4.1. Critère de "Townsend"

Le concept de claquage de "Townsend" est associé à la transition d'un état d'équilibre du gaz à une décharge entretenue par le développement successif des avalanches électroniques. Dans un champ non -uniforme, le critère de "Townsend" peut être écrit comme suit [Ped-89, Don-98, Don-97]:

$$\int_0^{z_0} \gamma(z) \exp \left[\int_0^z \bar{\alpha}(z') dz' \right] dz = 1 \quad (\text{II.1})$$

Où: " $\bar{\alpha}$ " est le coefficient d'ionisation efficace, " z " est une distance le long du parcours de l'avalanche et " z_0 " est la distance entre l'électrode et la tête de l'avalanche (longueur critique de l'avalanche).

Le coefficient efficace d'ionisation est donné par:

$$\bar{\alpha} = \alpha - \eta \quad (\text{II.2})$$

Où: " α " est le coefficient d'ionisation, " η " est le coefficient d'attachement, " γ " = coefficient d'ionisation secondaire.

Une application directe du critère de "Townsend" pour différentes configurations d'électrodes exige une connaissance des paramètres " $\bar{\alpha}$ " et " γ ". Sachant que " $\bar{\alpha}$ " est difficile à mesurer dans certaines conditions pour quelques gaz, mais il a été mesuré et catalogué pour l'air aux conditions atmosphériques standard par plusieurs auteurs, mais le paramètre " γ " est légèrement disponible car il dépend non seulement de l'intensité du champ et pression de gaz, mais aussi de la géométrie du système à étudier [Ped-89, Don-98, Don-97].

II.4.2. Critère de "Schumann"

"Schumann" a introduit une hypothèse simplificatrice ou il considère que le coefficient d'ionisation secondaire généralisé est directement proportionnel au coefficient efficace d'ionisation [Ped-89, Don-97, Don-98]. C'est-à-dire:

$$\gamma(z) = k_1 \cdot \bar{\alpha}(z) \quad (\text{II.3})$$

k_1 : est une constante.

La reformulation de (II.1) en considérant (II.3) donne:

$$\int_0^{z_0 < d} \bar{\alpha}(z) dz = K \quad (\text{II.4})$$

d : est la distance inter-électrodes

$$K = \ln \left[\frac{k_1 + 1}{k_1} \right] \quad (\text{II.5})$$

Où: " K " est une constante empirique arbitraire.

Pour les champs uniformes (II.4) devient [Pet-99] :

$$\bar{\alpha} \cdot d = K \quad (\text{II.6})$$

L'équation (II.4) est le critère de "Schumann" connu aussi par "critère de streamer" [Kuf-00, Ped-89, Don-97, Don-98].

Le critère de Schumann (streamer) est généralement utilisé pour calculer la tension d'initiation du claquage d'un gaz sous diverses pressions et pour diverses distributions du champ électrique. L'application de ce critère dépend de trois paramètres: premièrement, la distribution du champ électrique $E(x)$ dans l'espace inter-électrodes, deuxièmement, le rapport entre le coefficient d'ionisation efficace ($\bar{\alpha}$) et le champ électrique et enfin, la valeur de la constante " K " [Pet-99].

II.4.3. Critère de "Jorgensen"

Ce critère est pratiquement équivalent au critère de Schumann. "Jorgensen" a exprimé la constante "K" en fonction de la distance inter-électrodes (d). La figure (II.5) montre la variation de cette constante en fonction du champ électrique et la distance inter-électrodes. Les valeurs de "K" sont obtenues expérimentalement pour des distances inter électrodes < 150 mm et pour des champs uniformes et quasi-uniformes [Ped-99, Don-98, Don-99].

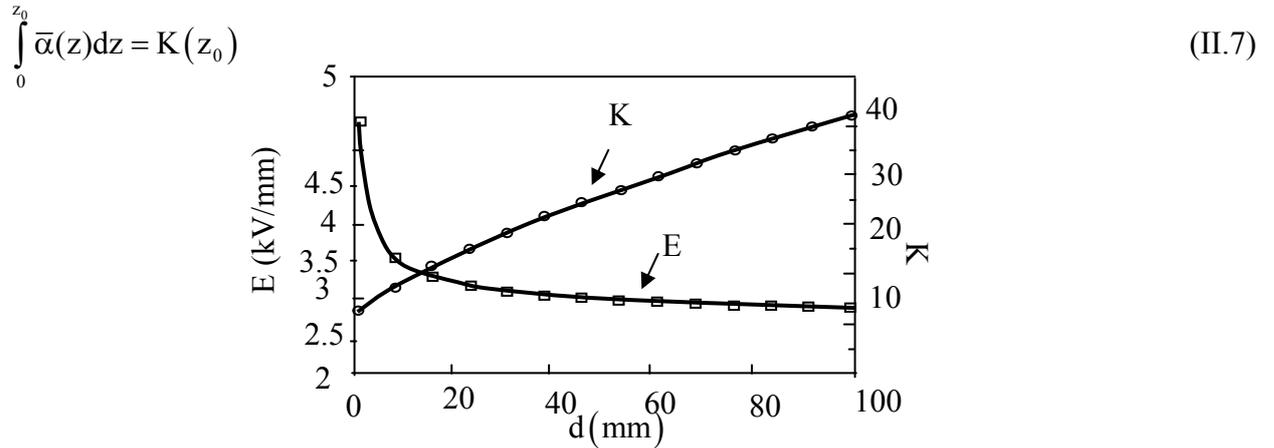


Figure II.5. Champ électrique de claquage et valeurs de K en fonction de la distance inter - électrodes

II.4.4. Critère de "Pedersen"

Le coefficient d'ionisation efficace " $\bar{\alpha}$ " est déterminé généralement de la base de données expérimentale qui donne $(\bar{\alpha}/p)$ en fonction de (E/p) . Cette base de données est méconnue pour les gaz fortement électronégatifs tels le SF₆ et pour des pressions réalistes de gaz dans la gamme d'intérêt technique [Kuf-00]. Ce qui rend l'application directe du critère de "Schumann" difficile. En considérant l'expression de "Boyd" donnée pour les champs uniformes [Ped-89] :

$$E = A + \frac{B}{\sqrt{d}} \quad (II.8)$$

A et B : sont des constantes et E est le champ appliqué

Alors l'équation (II.8) peut être écrite comme suit :

$$[E - A]^2 \cdot d = B^2 \quad (II.9)$$

Ce qui donne :

$$\frac{K}{B^2} [E - A]^2 \cdot g = K \quad (II.10)$$

La comparaison des équations (II.10) et (II.6) donne:

$$\bar{\alpha} = \frac{K}{B^2} [E - A]^2 \quad (II.11)$$

La substitution de (II.11) dans (II.4) donne :

$$\int_0^{z_0} [E(z) - A]^2 dz = B^2 \quad (\text{II.12})$$

L'équation (II.12) représente le critère de "Pedersen".

Le critère de "Pedersen" est en fait une reformulation du critère "Schumann" sous une forme différente. Ce critère ne prend pas en considération la constante "K" dans les calculs, mais il la remplace par deux constantes mesurées expérimentalement A et B. Également l'utilisation de ce critère est indépendante du coefficient d'ionisation efficace $\bar{\alpha}$ [Don-98, Don-99].

II.4.5. Critère de "Raether"

La constante "K" dans le critère de Schumann est remplacée par :

$$K = \ln(N(z_0)) \quad (\text{II.13})$$

$N(z_0)$: est la taille critique de l'avalanche électronique

Lorsqu'une avalanche atteint sa taille critique, ceci provoque une propagation rapide des streamers filamenteux à partir de sa tête, ce qui conduit à l'apparition d'une couronne, ou au claquage de l'intervalle inter-électrodes pour des géométries d'électrodes inhomogène. La taille critique d'une avalanche électronique est donnée par le nombre d'électrons à sa tête. Si " N_0 " est le nombre des électrons initiaux, le nombre des électrons à la tête de l'avalanche $N(z_0)$ est donné par [Don-98, Don-99, Kuf-00]:

$$N(z_0) = N_0 \exp \left[\int_0^{z_0} \bar{\alpha}(z) dz \right] \quad (\text{II.14})$$

D'après le critère de "Raether" et à pression atmosphérique, la formation d'un streamer n'a lieu que si le nombre d'électrons à la tête de l'avalanche primaire atteint 10^8 à 10^{10} électrons [Roy-84]. Selon ce critère, la condition d'initiation d'un streamer s'écrit alors [Fof-06, Kuff-00]:

$$N_0 e^{\int_0^{z_0} \bar{\alpha} dx} = 10^8 \text{ à } 10^{10} \quad (\text{II.15})$$

Alors (II.15) donne :

$$\int_0^{z_0} \bar{\alpha}(z) dz = 18 \text{ à } 20 \quad (\text{II.16})$$

Le critère de "Raether" est connu parfois par le critère du seuil d'apparition des streamers dans les géométries d'électrodes inhomogènes (champ non-uniforme) et par le critère de claquage pour les géométries homogènes (champ uniforme)[Ped-89].

Pour un champ uniforme (II.16) s'écrit :

$$\bar{\alpha} \cdot z_0 = 18 \text{ à } 20 \quad (\text{II.17})$$

Dans un champ uniforme, z_0 est la distance inter-électrodes [Don-97, Don-98].

La formation d'un "streamer" dans une configuration d'électrodes homogènes (champ uniforme) conduit au claquage de l'intervalle inter-électrodes, qui n'est pas nécessairement le même cas pour un champ non-uniforme [Roy-84, Rai-91].

II.4.6. Critère de "Meek"

Le critère "Meek" assure que la formation du streamer a lieu lorsque le champ en tête de l'avalanche E_r (champ dû aux charges d'espace positives) devient égal au champ appliqué "E" [Fof-92, Pet-99, Roy-84]. L'expression de E_r donnée pour un champ non uniforme est la suivante :

$$E_r = 5,3.10^{-7} \frac{\int_0^x \bar{\alpha} dx}{\sqrt{(x/p)}} \bar{\alpha}.e^0 \text{ (V/cm)} \quad (\text{II.18})$$

Une avalanche peut se transformer en un streamer si le champ " E_r " qu'elle crée devient supérieur ou égal au champ appliqué. D'une façon plus générale [Roy-84] :

$$E_r = k_2.E \quad (\text{II.19})$$

Où x : représente la distance parcourue par l'avalanche et " k_2 " est une constante voisine de "1".

L'équation (II.19) présente la condition d'initiation d'un streamer sous un champ non uniforme. Dans le cas d'un champ uniforme, l'équation (II.19) devient la condition du claquage de

l'intervalle($x=d$ et $\exp(\int_0^x \bar{\alpha}.dx) = \bar{\alpha}.d$).

II.4.7. Critère de Gallimberti

L'auteur préconise l'existence d'un nombre minimal d'ions positifs en tête de l'avalanche permettant la formation et la propagation du streamer. Ce nombre de charges N^+ dépend du champ électrique géométrique E_g , à la surface de l'électrode et est donné pour l'air atmosphérique par les relations [Roy-84, Fof-93]:

$$N^+ = 0,558.10^8 - 0,231.10^3.E_g \text{ pour } E_g \leq 20\text{k V/cm} \quad (\text{II.20})$$

$$N^+ = 3,34.10^8 \exp[-1,614.10^{-5}.E_g] \text{ pour } E_g > 20\text{k V/cm} \quad (\text{II.21})$$

II.5. Modèles d'initiation de décharge dans l'air: streamers – couronne

La description qualitative du claquage dans un intervalle d'air en champ non uniforme, a montré que le phénomène commence toujours avec un "effet couronne". Il se manifeste sous forme d'une chevelure de filaments lumineux s'échappant de la pointe HT. Ils sont plus connus

sous le nom de "streamers" ou "couronnes de streamers"[Roy-84, Fof-03]. Ce phénomène peut être modélisé sous différents aspects [Roy-84, Fof-03].

II.5.1. Modèles de seuil d'apparition

Ces modèles ont été établis d'abord pour connaître la tension de claquage en champ uniforme. En champ non uniforme, ils définissent la tension seuil d'initiation d'effet couronne [Gir-99, Fof-03].

II.5.1.1. Modèles basés sur la loi de Peek généralisée

La loi proposée par Gary et al. [Gar-72] est un exemple de modèle seuil basé sur l'approximation de Peek. Elle s'applique au cas d'électrode sphérique et est très simple d'utilisation [Fof-03]. Le champ seuil, E_{seuil} s'exprime par :

$$E_{\text{seuil}} = E_0 \cdot \left(1 + \frac{k}{\sqrt{R/2}} \right) \quad (\text{II.22})$$

Où :

E_{seuil} est le champ critique d'apparition en kV/cm, $E_0 = 31$ kV/cm dans l'air atmosphérique, $k = 0,308$ pour une électrode sphérique si le rayon est exprimé en "cm" et R est le rayon de courbure de l'électrode positive

II.5.1.2. Modèle du seuil d'apparition de la couronne

Il existe un champ électrique minimal d'apparition de la première couronne E_i pour un intervalle donnée [Roy-84, Fof-93]:

$$E_i = 6,77 \cdot \ln \left(\frac{1,75 \cdot 10^3}{r_c / 2} \right) (\text{kV/cm}) \quad (\text{II.23})$$

Avec $0,4 < r_c < 40$ cm

r_c étant le rayon de courbure équivalent de la surface au point de gradient électrique maximum.

II.5.2. Modèle de dispersion

Comme nous l'avons vu précédemment, une couronne, se produit à un instant donné si l'avalanche primaire se développe dans une région où le champ électrique est suffisant, mais aussi qu'à cet instant un électron germe soit disponible [Fof-93].

1^{ère} étape : Détermination du volume critique

Le volume critique (V_{cr}) est le volume voisin de l'électrode dans lequel la production d'un électron conduit à un effet couronne observable (steamer) [Gir-99, Fof-03]. Ce volume est délimité par deux surfaces (S_1) et (S_2) (voir figure II.6) qui sont définies comme suit :

S_1 est le lieu des points où l'attachement compense l'ionisation ($\alpha = \eta$). Seul un électron compris entre l'électrode et S_1 pourra participer à l'ionisation du milieu.

S_2 est la surface que lorsque un électron germe créé entre elle et l'électrode amène une avalanche qui ne pourra pas atteindre la taille critique avant de finir sur l'électrode (ne pourra pas donner un streamer).

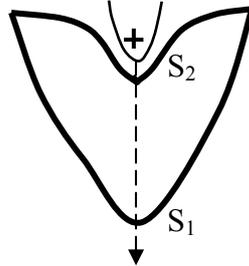


Figure II.6. Définition du volume critique

La formulation mathématique de ces conditions est la suivante [Fof-03];

$$S_1 : E = E_{\text{seuil}} \quad (\text{II.24})$$

$$S_2 : \int_{Z_2}^{Z_1} (\alpha - \eta) dz \geq 10^8 \quad (\text{II.25})$$

Z_1 et Z_2 étant respectivement les positions des surfaces S_1 et S_2 sur l'axe des électrodes.

-La surface S_1 est créée sur l'électrode puis s'éloigne de celle-ci lorsque la tension anodique croît.

- Au seuil d'initiation, cette surface est confondue avec S_2 , c'est-à-dire qu'une avalanche issue de S_1 atteindra la taille critique sur l'électrode. Cette constatation explique les bornes d'intégration des critères de seuil d'apparition de streamer [Gir-99].

- Lorsque la tension croît au dessus de cette valeur seuil, la surface S_1 continue à s'éloigner de l'électrode HT alors que la surface S_2 se déplace vers l'électrode puisque $\bar{\alpha}$ croît rapidement en fonction du champ électrique E .

2^{ème} étape : Rechercher la probabilité de présence d'un électron-germe dans le volume critique à un instant donné

La deuxième étape consiste à rechercher la probabilité de présence d'un électron germe dans V_{cr} à un instant donné. Entre les instants "t" et "t+dt", elle s'écrit [Fof-93] :

$$P_e(t).dt = \left\{ \int_{V_{\text{cr}}(t)} \frac{n_n}{\tau} dV \right\} dt \quad (\text{II.26})$$

Où n_n est la densité des particules qui produisent des électrons libres en fonction du champ E et τ leur durée de vie moyenne.

Le taux de production est égal à " $\frac{n_n}{\tau}$ ". Le nombre moyen des électrons générés entre les instants 0 et T s'écrira [Gir-99, Fof-03]:

$$\zeta = \int_0^T P_e(t) dt \quad (\text{II.27})$$

- La probabilité d'initiation d'une couronne dans ce même intervalle de temps :

$$P(T) = 1 - \exp(-\zeta) \quad (\text{II.28})$$

Et la densité de probabilité d'initiation d'une couronne entre 0 et T :

$$f(T) = P_e(T) \exp(-\zeta) \quad (\text{II.29})$$

$f(T)$ dépend, donc, surtout du taux de génération d'électrons dans le volume critique, $V_{cr}(t)$, et par conséquent, de la géométrie de l'électrode et de la tension appliquée.

Une fois la condition d'initiation (critères de seuil, de streamer et de dispersion) obtenue, l'étape suivante consiste à déterminer les lois de développement du streamer et la longueur qu'il peut atteindre dans un champ électrique de structure géométrique donnée.

II.5.3. Modèle de propagation

Il existe plusieurs modèles de développement des streamers mais les plus exportables dans la pratique sont sûrement les modèles analytiques [Roy-84].

II.5.3.1. Modèles de Dawson et Winn

La propagation du streamer positif est expliquée en considérant uniquement l'activité de sa tête. Les électrons sont supposés "neutralisés" derrière celle-ci et le filament reliant l'anode à la tête du streamer n'est pas pris en compte [Fof-93].

Ces auteurs partent de l'hypothèse qu'une charge d'espace de N_p ions est contenue en tête du streamer dans une sphère de rayon r_0 (figure II.7).

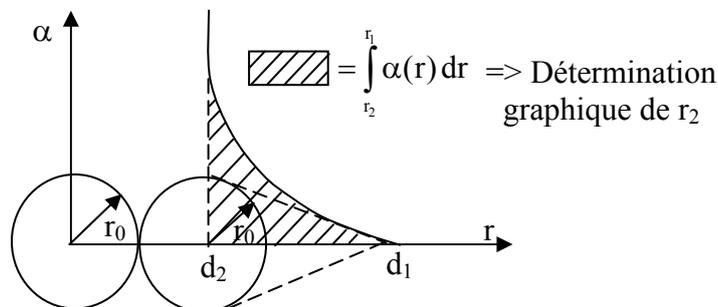


Figure II.7. Développement d'une avalanche en tête d'un streamer positif selon le modèle de Dawson et Winn.

Un électron distant de " d_1 " du centre de la tête existante va amener une avalanche caractérisé par une multiplication électronique [Gir-99, Roy-84] :

$$N_e = \exp \int_{d_2}^{d_1} \alpha(r) dr \quad (\text{II.30})$$

Et de rayon de diffusion :

$$r^2 = 6 \int_{r_2}^{r_1} (D_e / u_e) dr \quad (\text{II.31})$$

Où : $D_e(E/p)$ est le coefficient de diffusion et " u_e " la vitesse de dérive des électrons. Les " N_e " électrons produits par cette avalanche vont neutraliser la tête existante pour en créer une nouvelle de rayon " r ", contenant " N_e " ions positifs, à une distance " d_2 " devant le centre de l'ancienne. La propagation est représentée par la répétition de cette séquence élémentaire [Gir-99].

Pour une propagation en champ appliqué nul, deux conditions doivent être vérifiées simultanément (Figure (II.9)) [Gir-99] :

1. Pour que la propagation se poursuive, comme il ne peut pas y avoir d'amplification de la tête de streamer, il faut que la tête minimale caractérisant la taille critique d'une avalanche se reproduise à l'identique : $N_e = N_p$ et $r = r_0$
2. N_p doit être produit avant que la neutralisation de la tête précédente ne commence, c'est-à-dire avant que les deux régions sphériques ne se chevauchent. Il faut donc que " d_2 " soit supérieur ou égale à " $2r_0$ ", c'est-à-dire au minimum égal à " $2r_0$ ".

$d_1 - d_2$: longueur de l'avalanche.

En fin le point de départ de l'avalanche " d_1 " est défini par [Roy-84] :

$$E(d_1) = E(\alpha = \eta) = \frac{N_p}{4 \pi \epsilon_0 d_1^2} = 22,8 \text{ kV/cm} \quad (\text{II.32})$$

$E(d_1)$ désigne le champ pour lequel l'ionisation est compensée par l'attachement.

A partir de ces d'équations, les auteurs montrent que la propagation est assurée pour :

$$r_0 = 2,7 \cdot 10^{-3} \text{ cm et } N^+ = 10^8 \text{ ions}$$

Cette dernière valeur représente le nombre minimum d'ions en tête du streamer qui permettrait sa propagation dans une région de champ appliqué nul.

En effet, la propagation, en raison des pertes dues aux phénomènes nécessaires à la création de charge, ne pourra pas continuer indéfiniment.

Remarques :

- 1) Deux hypothèses non négligeables permettent l'utilisation de ce modèle : la première et que l'avalanche amenant l'avancée de la tête est issue d'un seul électron ; la deuxième est le choix de

d_1 qui conditionne le calcul de N_e et de " r " [Fof-03].

2) La vitesse de propagation du streamer w_s peut être calculée comme le rapport du pas d'avancement et du temps de croissance de l'avalanche, soit [Gir-99] :

$$w_s = d_2 / \int_{d_2}^{d_1} dr / u_e \quad (\text{II.33})$$

3) Une tête initiale de taille critique d'ions positifs va se propager sur une distance " l_s ", avant que le champ de charge n'est plus suffisant pour que cette avalanche se développe devant elle. Ce parcours " l_s " est formé de " g " pas élémentaire de longueur " $2r_0$ ".

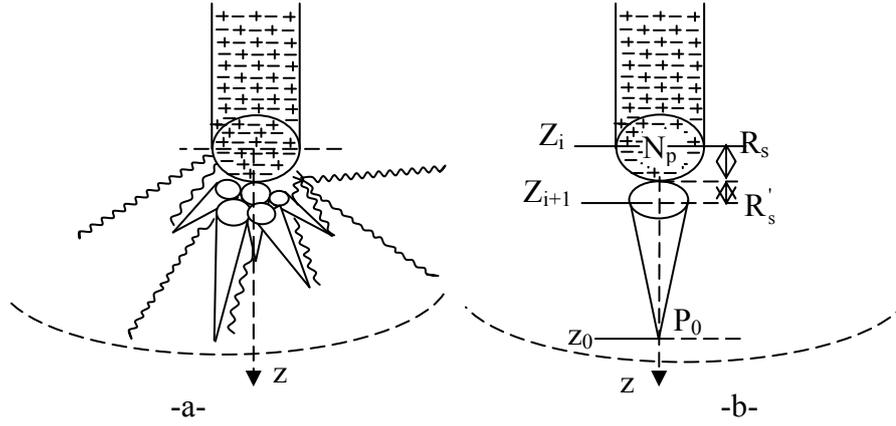
4) Une des limitations de ce modèle est qu'il ne permet pas une détermination correcte de la longueur finale du streamer.

5) Dans le cas où le streamer se développe dans un champ appliqué divergent, Dawson et Winn calculent son élongation maximale en considérant que la perte d'énergie due aux processus d'ionisation et d'excitation est compensée, pendant la dérive de la charge d'espace positive par l'apport d'énergie potentielle dû au champ appliqué. Les valeurs calculées sont assez différentes des résultats expérimentaux, et il semble que cet écart résulte d'une mauvaise évaluation des pertes d'énergie se produisant pendant le développement d'une avalanche [Roy-84, Gir-99].

II.5.3.2. Modèles de Gallimberti

Le modèle de "Gallimberti" est venu après plusieurs améliorations successives [Roy-84, Fof-03] du modèle précédent pour aboutir finalement à une formulation entièrement analytique.

La schématisation du streamer dans ce modèle est encore celle d'une charge positive concentrée dans un volume sphérique en tête du streamer. En avant du streamer existe une région dans laquelle ont lieu les phénomènes de photo-ionisation, dite "région active" par opposition au canal du streamer supposé faiblement ionisé et électriquement neutre ("région passive"). Le mécanisme de ce modèle est le suivant [Gir-99] : à un instant t_n de la propagation, une sphère de rayon R_s contenant N_i ions positifs et N molécules excitées provoque une série d'avalanches dans la zone active. A un instant t_{i+1} , cette série d'avalanches a produit N_{i+1} électrons qui neutralisent partiellement la tête N_i et abandonnent en avant de celle-ci une nouvelle tête sphérique de rayon R'_s contenant N_{i+1} électrons et N' molécules excitées (Figure II.8). En considérant le bilan d'énergie et le champ géométrique dans lequel le streamer se propage, aussi en faisant l'hypothèse d'une propagation à rayon constant, il est possible d'aboutir à la formulation suivante [Roy-84, Gir-99, Fof-03] :



a : Représentation schématique du mécanisme de streamer

b : Schéma simplifié d'une seule avalanche

Figure II.8. Représentation schématique du mécanisme de développement d'un streamer

$$N_{i+1} = N_i + \frac{R_s}{2.a} \left[e.E_g^2.R_s \left(1 + \frac{\mu}{2.e.R_s} \right) - \gamma \right] \quad (\text{II.34})$$

Où :

$$a = \frac{0,40.e^2}{4.\pi.\epsilon_0} \quad (\text{II.35})$$

e^- : représente la charge de l'électron, E_g est Champ géométrique dans lequel se développe le streamer, γ est l'énergie totale perdue pour la production d'un nouvel électron et μ est un coefficient de proportionnalité dont la valeur est d'environ $0,39.10^{-24}$ C.m pour l'air atmosphérique. Cette équation conduit à la formulation de l'évolution de la charge nette positive à la tête durant la propagation du streamer.

$$N(z) = N_0 + \frac{2.e.R_s + \mu}{4.a} \left[V_0 - \frac{\gamma}{2.e.R_s + \mu} .z - V(z) \right] \quad (\text{II.36})$$

$N_0=N(z=0)$ est peu différent du nombre d'ions produits par la première avalanche si R_s est faible

z : est une coordonnée repérant la position de la tête sur l'axe.

$V(z)$: est la distribution de potentiel appliquée et $V_0=V(z=0)$

Le champ $E(z)$ dans la région active est la somme du champ géométrique et du champ produit par la charge d'espace " $N_i.e$ " à $z = z_i$, soit [Roy-84]:

$$E(z) = E_g(z) + \frac{eN_p}{4\pi\epsilon_0(z-z_0)^2} \quad (\text{II.37})$$

E_g : le champ géométrique (appliqué).

Une interprétation de (II.37) permet d'obtenir le champ local pour une propagation stable du streamer.

$$E_{\text{stab}} = -\frac{dV}{dz} = \frac{\gamma}{2.e.R_s + \mu} \quad (\text{II.38})$$

Ce qui permet d'écrire :

$$\frac{dN(z)}{dx} = \frac{\gamma}{4.a} \frac{E(z) - E_{\text{stab}}}{E_{\text{stab}}} \quad (\text{II.39})$$

Le rayon de la tête de l'avalanche à l'instant "t" est lié au coefficient de diffusion par la formule [Roy-84]:

$$R_s' = [4D_e(t - t_i)]^{1/2} \quad (\text{II.40})$$

A la fin de l'étape le nouveau nombre de charges constituées est donné par [Roy-84]:

$$N_p' = \int_{z_0}^{z_{i+1}} (n_p - n_n) dz \quad (\text{II.41})$$

N_p , n_p sont les densités linéiques suivant l'axe "z" des ions positifs et des ions négatifs respectivement.

Il est possible donc de déduire la longueur du streamer, z_m , lors de son arrêt et donc la charge totale de conduction électronique [Fof-03].

$$Q_s = e \int_0^{z_m} \frac{N(z)}{2.R_s} \exp(-\eta.z) . dz \quad (\text{II.42})$$

$\frac{N(z)}{2.R_s}$ représente la densité des ions positifs par mètre.

La seule limitation de ce modèle est qu'il ne tient pas compte de l'effet de filament qui se crée si tous les ions positifs ne sont pas neutralisés. Aussi, le modèle ne permet qu'à l'accès à l'extension du streamer (z_m), et la charge injectée mais ne permet pas de tirer les caractéristiques temporelles du streamer $i(t)$ et $x(t)$ créés par les électrons à la tête. Toutefois ce modèle reste un modèle valable de propagation du streamer puisqu'il donne la longueur du streamer.

Remarques :

1) La propagation du streamer va se poursuivre, pas par pas, jusqu'à ce qu'une tête n'amène plus les conditions de champ suffisantes dans la zone active pour aboutir à la création d'une nouvelle tête. Cette situation est caractérisée par le fait que même un électron germe situé sur la limite de la zone active ne peut plus générer une avalanche vérifiant l'équilibre d'énergie [Roy-84].

2) Si $E_g > E_{\text{stab}}$, la tête de streamer gagne de l'énergie potentielle, traduit par une augmentation de la charge de tête ($N_{i+1} > N$). Dans le cas contraire, traduit par une diminution de la charge de tête ($N_{i+1} < N$), c'est-à-dire une propagation qui s'effectue avec dissipation d'énergie potentielle. Cette propagation continuera jusqu'à ce que l'énergie potentielle (et donc le champ

de charge d'espace) ne soit plus suffisante pour créer suffisamment de paires d'ions dans la région active [Roy-84].

3) La condition d'arrêt de la propagation sur la localisation de " P_0 " revient à dire que la propagation de la tête cessera lorsque " N " deviendra inférieur à un nombre minimal de charges " N_{stab} ".

La longueur " z_m " du streamer est la longueur atteinte par le streamer lors de son arrêt.

" N_{stab} " peut être calculé en utilisant les équations (II.20) et (II.21) [Gir-99] :

II.6. Etapes de la modélisation mathématique de la décharge électrique dans une configuration pointe-plan

La décharge positive aboutissant au claquage d'un intervalle d'air comprend plusieurs phases qu'il serait utile à étudier et modéliser. L'étude de telle décharge nécessite l'élaboration de différents modèles basés sur différents critères qui ont toujours accompagnés l'étude expérimentale. Ces modèles sont relativement complexes à cause des nombreux phénomènes mis en jeu dans l'initiation et le développement de la décharge électrique et de leur fort couplage [Kas-11]. Durant ce travail, nous nous intéressons à la modélisation d'une décharge pointe positive-plan dans l'air à la pression atmosphérique normale. Or, la description des calculs prend en considération les étapes de la décharge comme décrites précédemment. Le modèle proposé est basé sur le critère des streamers.

En champ non uniforme par exemple dans le système pointe (positive) – plan montré à la figure (II.9).

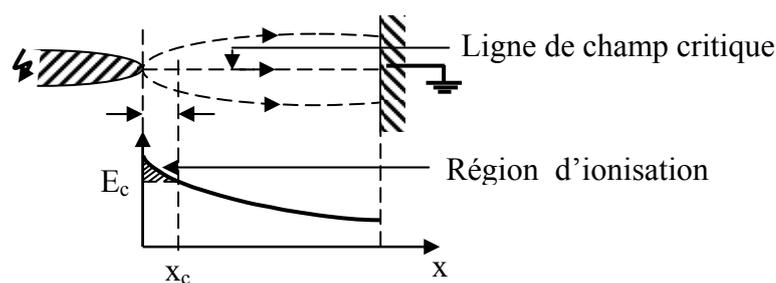


Figure II.9. Distribution du champ électrique non uniforme dans un intervalle d'air pointe-plan

L'intensité du champ varie et par conséquent le coefficient d'ionisation efficace $\bar{\alpha}$ varie aussi le long de l'intervalle inter-électrodes, sachant que la multiplication électronique sous un champ électrique est gouvernée par l'intégral ($\int \bar{\alpha} dx$). Pour les pressions élevées et en champs non-uniforme, le critère du Townsend (décharge autonome) prend la forme [Kuf-84]:

$$\gamma \left(\exp \left(\int_0^d \bar{\alpha} dx \right) - 1 \right) = 1 \quad (\text{II.43})$$

Où : γ est le deuxième coefficient d'ionisation de Townsend et d est la longueur de l'intervalle.

L'intégrale est en général calculée le long de la ligne de champ la plus intense (figure (II.9)). L'expression (II.43) est également valable pour des pressions très élevées et des champs légèrement non uniformes. Quand le champ atteint une valeur critique minimale E_c , l'intégrale $\int \bar{\alpha} dx$ cesse d'exister, et le mécanisme de Townsend perd sa validité. Par conséquent le phénomène d'ionisation n'apparaît que dans la région de l'espace inter-électrodes qui vérifie la condition $\bar{\alpha} > 0$ [Ame-88, Kuf-84].

La condition de claquage (ou création de la décharge) peut être donnée comme suit [Kuf-00] :

$$\int_0^{x_c < d} \bar{\alpha} dx \geq K \quad (\text{II.44})$$

Où : x_c est la longueur de l'avalanche à partir de la pointe HT.

Le côté gauche de cette équation stipule que l'ionisation efficace a lieu dans la région du champ où $0 \leq x \leq x_c$ avec la condition $\bar{\alpha} > 0$.

La distribution du champ change d'une configuration à une autre en fonction du rayon de courbure de la pointe (R) de la longueur de l'intervalle d'air pointe-plan (d). Dans [Pet-95], différentes situations apparaissent pour la valeur du champ critique en dessous de laquelle l'ionisation n'aura pas lieu.

Situation 1 (petites valeurs d/R) : Le champ le long de l'axe de symétrie est presque uniforme, donc l'équation (II.43) sera applicable pour x_c égale à toute la longueur de l'intervalle. Cela veut dire que l'avalanche critique ne se transforme en streamer que lorsqu'elle atteint le plan.

Situation 2 (grandes valeurs de d/R) : Les valeurs du champ sur l'axe de la pointe HT aux deux extrémités de l'intervalle, présentent un gradient important à cause de la dissymétrie du système, donc la zone d'ionisation est réduite, elle est limitée au près de la pointe, d'où l'avalanche se développe dans cette région où $\bar{\alpha} > 0$ c'est-à-dire $E > E_{cr}$.

E_{cr} : Champ critique

Situation 3 (moyenne valeurs de d/R) : L'équation (II.4) s'écrira :

$$\int_0^{x_c} \bar{\alpha}_1 dx + \int_{x'_c}^d \bar{\alpha}_2 dx \geq k \quad (\text{II.45})$$

Avec $\bar{\alpha}_1$ et $\bar{\alpha}_2$ sont les coefficients d'ionisation correspondant aux zones illustrées à la figure (II.10).

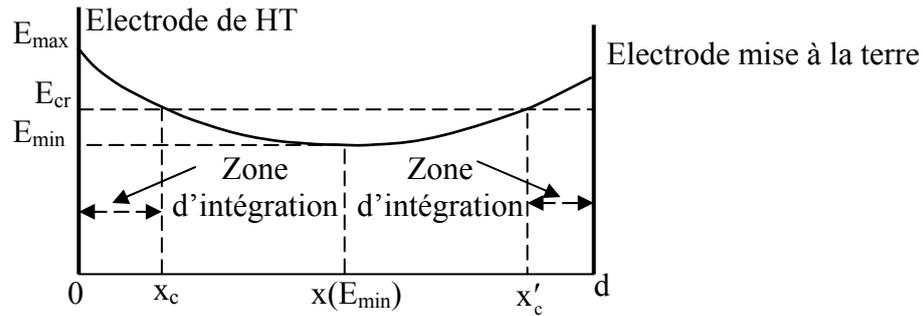


Figure II.10. Distribution du champ pour des moyennes valeurs de d/R

E_{\max} et E_{\min} sont respectivement le champ maximum et champ minimum

Dans ce cas, on a deux tensions disruptives différentes. Les premiers streamers commenceront dans la région où le champ est plus élevé [Pet-95].

II.6.1. Calcul du champ appliqué E_0

Comme le critère des streamers est basé sur la connaissance du premier facteur d'ionisation de Townsend. Alors, la connaissance de la grandeur du champ électrique appliqué (E_0) dans l'intervalle avant la formation de la charge d'espace est nécessaire. Le rapport du facteur d'ionisation efficace à la pression ($\bar{\alpha}/P$) dépend de la grandeur de (E_0/P) [Pet-95]. Dans une géométrie « pointe – plan », le champ électrique initial « E_0 » n'est pas uniforme le long de l'axe inter – électrodes x ; il est très important au niveau de la pointe où une zone d'ionisation se forme (voir figure II.11) et il diminue vers le plan [Li-08, Qot-05, Kuf-00].

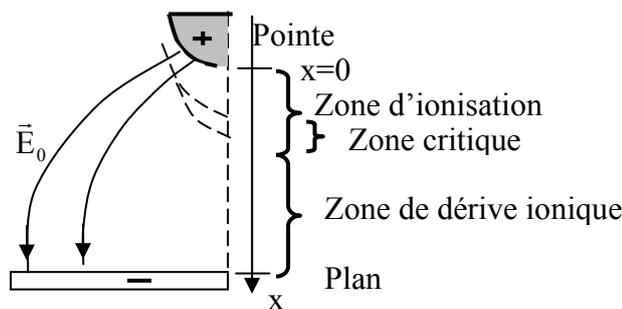


Figure II.11. Distribution du champ initial « E_0 » en configuration pointe plan.

Pour calculer ce champ E_0 , on peut utiliser les deux méthodes suivantes :

II.6.1.1. Formules

La distribution spatiale du champ électrique initial dans différentes configurations non homogène, en particulier dans un système pointe-plan, peut être donnée par différentes formulations, nous citons à titre d'exemple les deux formulations suivantes :

a. Pointe parabolique –plan : Pour une configuration pointe-plan du type pointe parabolique-plan, le calcul du champ peut être donné par la relation suivante [Rai-91, Vin-02, Dub-06] :

$$E(x) = \frac{2.U}{(2.x+r) \ln\left(\frac{2d+r}{r}\right)} \quad (\text{II.46})$$

Avec : E(x) est la champ électrique (V.m^{-1}), U : Tension appliquée à la pointe, x : position variable sur l'axe pointe-plan (m), r : Rayon de la courbure de la pointe à son extrémité (m) et d est la distance interélectrodes (m).

Le maximum du champ électrique qui est au niveau de la pointe est donné par [Mee-53, Jav-05] :

$$E_{\max} = \frac{2.U}{r \cdot \ln\left(\frac{4.d}{r}\right)} \quad (\text{II.47})$$

b. Pointe hyperbolique-plan : Le champ au voisinage de la pointe est calculé dans ce cas par la formule [Rai-91, Lor-90]:

$$E(x) = \frac{2U}{r \cdot \ln\left(\frac{4d}{r}\right)} \frac{r}{r+x} \quad (\text{II.48})$$

Où : U : tension appliquée à la pointe, r : est le rayon de la courbure de la pointe, d : et la distance entre la pointe et le plan et x : est la position variable le long de l'axe de la pointe vers le plan.

II.6.1.2. Calcul par la méthode des éléments finis

La méthode des éléments finis (MEF) est l'approche la plus pratique pour le calcul des champs inhomogène et pour les champs contenant des charges d'espace. La méthode des éléments finis (MEF) est utilisée pour résoudre l'équation de Laplace [Jav-05, Ada-94]:

$$\nabla^2 V = 0 \quad (\text{II.49})$$

Où V est le potentiel électrique scalaire.

Le modèle géométrique de la configuration pointe-plan peut être présenté par les deux cas de la figure (II.12). Le modèle géométrique est maillé par des éléments triangulaires et la condition aux limites considérée est celle de Neumann (figure II.12). Les tensions nodales du modèle sont calculées par la MEF et le champ électrique E obtenu au centre des éléments triangulaires est également calculé par l'équation [Liu-94] :

$$E = -\text{grad}(V) \quad (\text{II.50})$$

Sur la surface de la pointe, le potentiel est maintenu à une valeur constante ($V = V_0$) et sur le plan, le potentiel est nul ($V=0$).

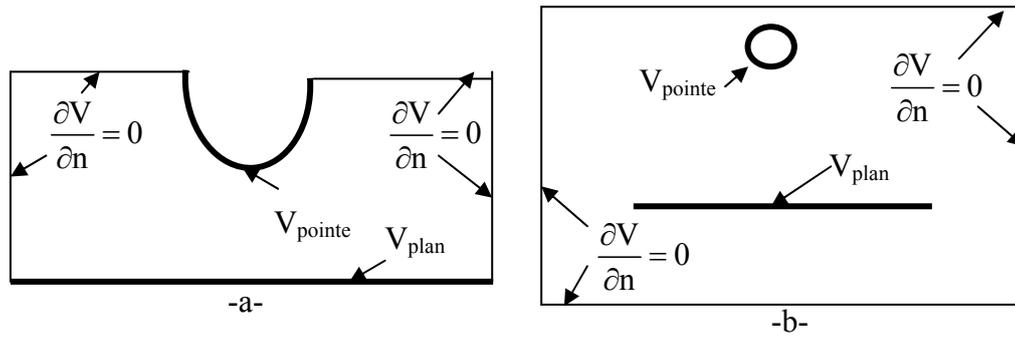


Figure II.12. Géométrie pointe plan à étudier par modèle élément fini (deux cas proposés parmi les cas géométriques possibles)

V_{pointe} : Tension appliquée à la pointe

V_{plan} : Tension appliquée au plan ($V_{\text{plan}}=0$)

Afin de profiter des conditions de symétrie, il est également possible de formuler les conditions de Neumann homogènes le long de tous les axes de symétrie [Ada-94].

II.6.2. Calcul du champ résultant E_r

Lorsque la pointe est portée à une tension de polarité positive, les électrons, partent de l'électrode négative et convergent vers la pointe de polarité positive. Quand un électron libre est accéléré vers l'anode, il produit des ions positifs qui se déplacent vers la cathode, les électrons et ions positifs créent une charge d'espace qui modifie l'intensité du champ électrique initial dans l'espace inter-électrodes [Rai-91, Lor-90]. Le champ résultant est généralement calculé en considérant les hypothèses simplificatrices suivantes [Ada-94]:

- Toutes les entités (ions positifs et électrons) sont stables dans le temps.
- Le problème est analysé dans les coordonnées cartésiennes (en deux dimensions).
- Tous les ions ou particules sont négligés sauf ceux créés par la décharge elle-même.
- La diffusion des ions est négligée et la mobilité des ions est supposée constante.

II.6.2.1. Champ de charge d'espace

En considérant les simplifications précédentes, le problème peut être analysé par les équations de Maxwell suivantes [Kli-72, Sat-10]:

$$\nabla \cdot E_{\text{charge d'espace}} = \frac{\rho}{\epsilon_0} \quad (\text{II.51})$$

$$\nabla \cdot \vec{D} = \rho \quad (\text{II.52})$$

$$\nabla \cdot \vec{j} = -\frac{\partial \rho}{\partial t} \quad (\text{II.53})$$

$$\vec{D} = \epsilon_0 \vec{E} \quad (\text{II.54})$$

$$\vec{E} = -\nabla V \quad (\text{II.55})$$

$$\vec{j} = b\rho\vec{E} - D\nabla\rho \quad (\text{II.56})$$

Où : \vec{D} est le déplacement électrostatique, ρ est la densité de charge d'espace, \vec{j} est la densité du courant électrique, \vec{E} est le champ électrique, V est le potentiel électrique, b est la mobilité des charges créées et ϵ_0 est la permittivité de l'air.

$$\epsilon_0 = 8,85.10^{-12}[\text{F/m} \text{ ou } \text{C}^2/\text{m.J}] = \epsilon_0 = 8,85.10^{-14}[\text{F/cm} \text{ ou } \text{C}^2/\text{cm.J}]$$

La combinaison des équations (II.51) et (II.55) donne l'équation de Poisson, qui décrit le potentiel électrique dans l'espace inter-électrodes:

$$-\nabla \cdot (\epsilon_0 \nabla V) = \rho \quad (\text{II.57})$$

Ou :

$$\nabla^2 V = \frac{\partial^2 V}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 V}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 V}{\partial z^2} = -\frac{\rho}{\epsilon_0} \quad (\text{II.58})$$

Ou sous la forme suivante [Sat-10]:

$$\nabla^2 V = -\frac{\rho}{\epsilon_0} = -\frac{e}{\epsilon_0} (N_p - N_e - N_n) \quad (\text{II.59})$$

N_e, N_p, N_n : sont respectivement; les densités des électrons, ions positifs et ions négatifs.

L'équation (II.59) exprime le couplage entre la densité de charge d'espace et le potentiel électrique. La résolution de l'équation précédente pour une charge d'espace donnée aide de trouver la distribution du potentiel électrique et du champ électrique dans l'espace d'étude [Jav-05, Ada-94] :

$$E_{\text{charge d'espace}} = -\text{grad}(V) \quad (\text{II.60})$$

N.B

- Le calcul du champ initial E_0 (Laplacien) peut être calculé en considérant ($\rho = 0$) ce qui donne :

$$\nabla^2 V = 0 \quad (\text{II.61})$$

a. Calcul de la charge d'espace

Dans une géométrie pointe-plan, plus le rayon de courbure de la pointe "R" est faible, plus le champ local à la pointe ($z = 0$) est élevé et sa distribution est inhomogène. Cette inhomogénéité est caractérisée par le facteur de non uniformité β ou son inverse appelé « facteur d'utilisation du champ » et noté η . Ce dernier est défini comme étant le rapport entre le champ moyen dans l'espace inter électrodes et le champ maximal (c'est-à-dire le champ au niveau de l'électrode de

plus faible rayon de courbure). Si E_{\max} est la valeur maximale du champ dans l'intervalle, le facteur d'utilisation du champ (noté η) est égal à [Cou-09, Kuf-00]:

$$\eta = \frac{E_{\text{moy}}}{E_{\text{max}}} = \frac{U/d}{E_{\text{max}}} = \frac{U}{E_{\text{max}} \cdot d} \quad (\text{II.62})$$

$$\eta = \frac{1}{\beta} \quad (\text{II.63})$$

U : représente la tension appliquée aux électrodes, d : est la distance inter électrodes et η : est compris entre 0 et 1. Plus " η " est proche de 1, plus le champ sera uniforme.

Notons que " η " est aussi appelé facteur de forme de Schweiger.

La charge d'espace due aux ions positifs est donnée par l'équation suivante [Mok-00, Ame-88, Bou-11]:

$$Q_p = e.N_p = e n_0 \left[\exp \left(\int_0^{x_c} \bar{\alpha} dx \right) - 1 \right] \quad (\text{II.64})$$

De même pour la charge d'espace due aux électrons, on aura :

$$Q_e = e.N_e = e n_0 \left[\exp \left(\int_0^{x_c} \bar{\alpha} dx \right) \right] \quad (\text{II.65})$$

Sachant que pour les faibles valeurs du champ appliqué ($\bar{\alpha} < 0$) ou il n'y a pas d'ionisation, la charge d'espace est nulle.

Le calcul du nombre d'électrons initial n_0 est fait à partir de la valeur de courant de saturation de l'air (i_s) pour des électrodes planes [Agu-87].

Connaissant le facteur géométrique de l'intervalle d'air $\beta = \frac{E_{\max}}{E_{\text{moy}}}$, on aura :

$$i_0 = i_s \beta \quad (\text{II.66})$$

i_0 : est le courant dissipé dans l'air, à l'application de la HT, et à partir duquel on détermine la charge initiale dans un système d'électrodes non – homogènes.

II.6.2.2. Champ résultant total

Le champ électrique résultant total $E(\vec{r}, t)$ est alors déterminé par la formule suivante [Li-08]:

$$E(\vec{r}, t) = E_{\text{Laplacian}}(\vec{r}, t) + E_{\text{Charge d'espace}}(\vec{r}, t) \quad (\text{II.67})$$

II.7 Calcul du champ électrique par la méthode des éléments finis en utilisant le code FEMM

Dans notre étude, les distributions du champ électrique ont été déterminées dans une configuration pointe-plan. Les calculs du champ ont été effectués sur la ligne de la haute intensité du champ électrique (sur l'axe vertical pointe-plan) en utilisant un logiciel basé sur la méthode des éléments finis FEMM (Finite Element Method Magnetics) couplé avec MATLAB. La figure (II.13) représente la géométrie pointe plan à étudier. Le calcul du champ a été effectué pour deux cas: le premier cas est en l'absence de la charge d'espace (champ initial) et le deuxième cas en présence de charge d'espace (champ résultant total).

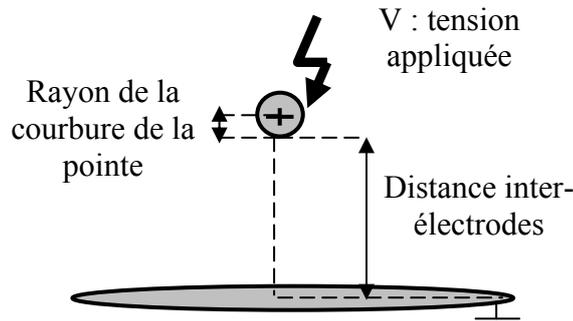


Figure II.13 Dimensions de l'arrangement pointe-plan à étudier

II.7.1. Calcul du champ initial E_0 en l'absence de charge d'espace

Afin de mettre en évidence l'influence de la géométrie sur la tension de claquage d'un intervalle d'air, nous avons procédé d'abord au calcul du champ électrique initial E_0 sur la ligne de champ critique. La figure (II.14) montre le mode de schématisation de FEMM d'une configuration pointe-plan dans le but d'analyser la distribution du champ électrique initial dans la zone d'étude.

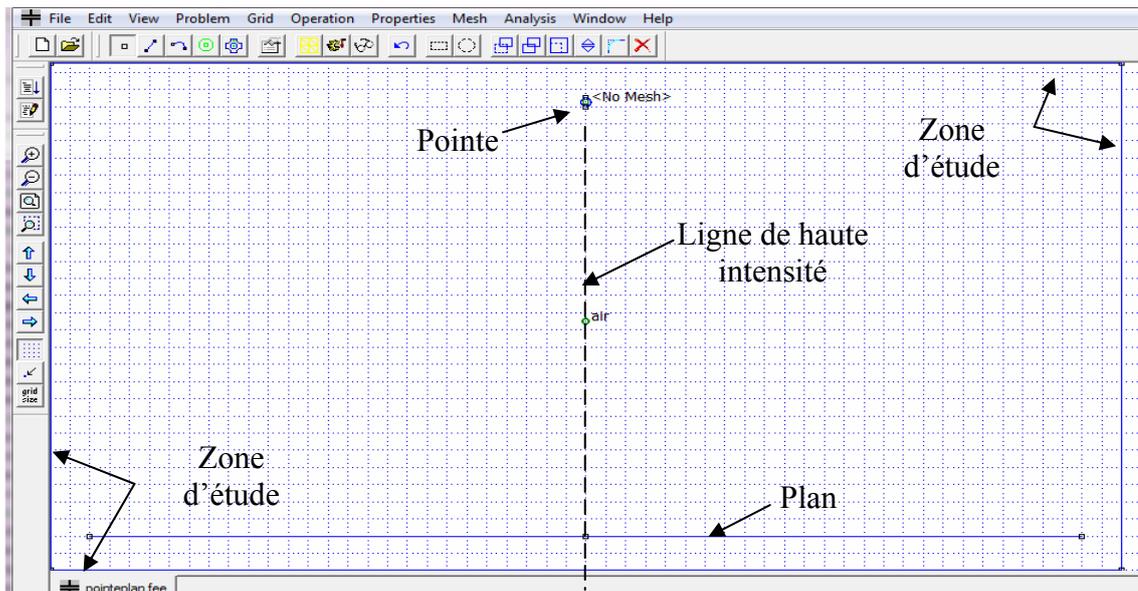


Figure II.14. Mode de schématisation de la géométrie pointe-plan à étudier sous FEMM et affichage de ces accessoires (une case=1 cm×1 cm) ($R=0,25$ cm et $d=50$ cm).

La géométrie d'électrodes pointe-plan présentée sur la figure (II.14) représente un exemple d'application de notre choix avec les paramètres suivants: Rayon de la courbure de la pointe "R" de 0,25 cm, l'espace inter-électrode (dans la direction perpendiculaire de la pointe vers le plan) "d" de 25 cm, le rayon du plan (on a considéré que le plan a une forme d'un disque) de 50 cm et la tension appliquée est $V=80\text{kV}$ (comme exemple).

Il est à noter que le grand nombre des possibilités de choisir des configurations pointes-plans en variant les paramètres géométriques (R et d) rend la représentation des simulations de toutes ces différentes configurations délicate. La répartition du champ électrique dans l'espace inter-électrodes est le facteur le plus important qui influe sur l'apparition des décharges électriques et sur ces caractéristiques dans une configuration d'électrodes pointe-plan. La décharge électrique commence à se développer lorsque l'intensité du champ électrique est supérieure à la rigidité diélectrique utilisé dans l'espace inter-électrodes (qui est l'air dans notre étude)[Kuf-00, Kar-06]. La distribution du champ électrique initial E_0 en utilisant FEMM est présentée par la figure (II.15). Cette figure montre que la distribution du champ dans l'intervalle est non uniforme. La valeur maximale du champ électrique dans la zone d'étude est de $4,637.10^6 \text{ V / m}$, pour une application d'une tension de 80kV. Le champ électrique est intense près de l'électrode active. Il diminue au fur et à mesure qu'on se dirige vers le plan

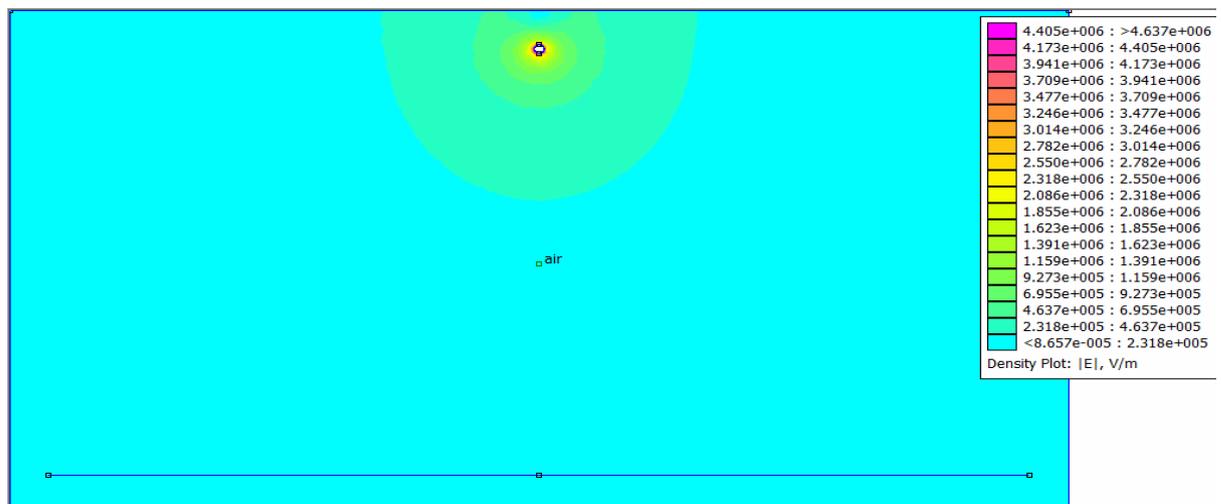


Figure II.15. Champ électrique initial dans la géométrie pointe-plan étudiée et simulée en utilisant FEMM pour $V=80 \text{ kV}$, $R=0,25 \text{ cm}$ et $d=50 \text{ cm}$

La figure (II.16) présente la distribution du potentiel électrique dans l'espace inter-électrodes à étudier ainsi que les lignes d'équipotentielle qui sont condensées autour de la pointe. Rappelons que tout rapprochement des lignes équipotentielles est associé à une augmentation de l'intensité du champ électrique. Les régions équipotentielles très proches les unes des autres sont susceptibles de déclencher la décharge électrique dans l'intervalle inter-électrodes à étudier. Donc il est important de les localiser et les montrer [Kar-06].

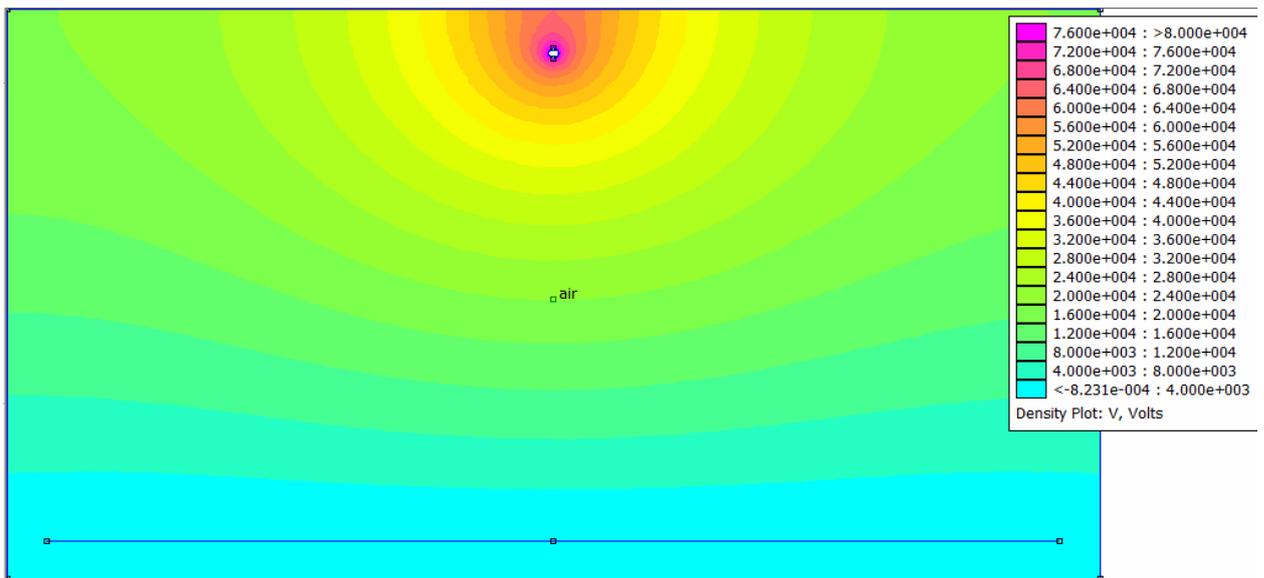


Figure II.16. Potentiel électrique dans la géométrie pointe-plan étudiée et simulée en utilisant FEMM pour $V=80$ kV, $R=0,25$ cm et $d=50$ cm

La figure (II.16), montre que sur la ligne de haute intensité (l'axe vertical pointe-plan), les lignes équipotentielles sont plus serrées en se rapprochant de la pointe, ce qui augmente l'intensité du champ électrique en se rapprochant de la pointe. Ce qui rend cette région susceptible à déclencher une décharge électrique.

Les trois courbes de la figure (II.17) donnent l'allure de la variation du champ électrique initial E_0 en fonction de la distance inter-électrodes sur la ligne de haute intensité. Le champ est calculé par trois méthodes qui sont: la méthode des éléments finis (MEF) et par les équations analytiques (II.47) et (II.49) données précédemment.

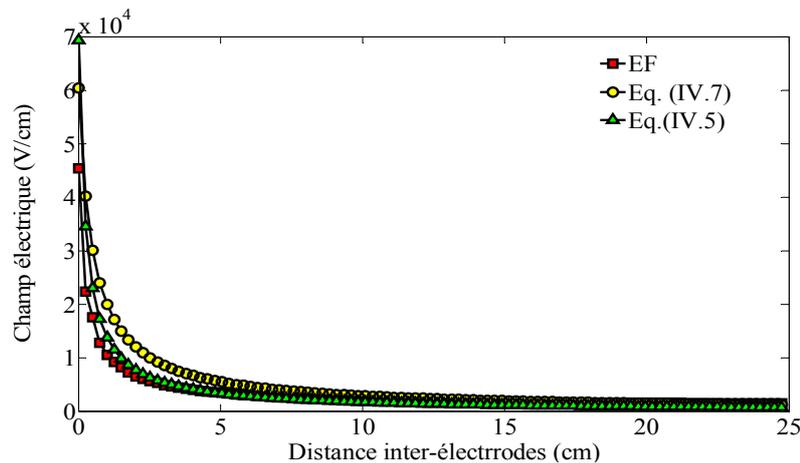


Figure II.17. Champ électrique initial calculé sur la ligne de haute intensité par la méthode des éléments finis (MEF), et par les équations (II.46) et (II.48) en fonction de la distance inter-électrodes

Les trois courbes de la figure (II.17) sont tracées par le logiciel FEMM et en utilisant les équations (II.46) et (II.48) programmées sous MATLAB pour un rayon de courbure de la pointe, distance inter-électrodes et tension appliquée égales respectivement à $0,25$ cm, 25 cm et 8.10^4

volts. Les courbes obtenues ne sont pas confondues surtout au voisinage de la pointe à cause de la différence des formes des pointes (mais avec même rayon de courbure) et bien sûr des hypothèses considérées dans chaque approche.

Les méthodes de résolution des équations différentielles basées sur la méthode des éléments finis ont montré durant ces dernières années une robustesse et précision de calcul dans différents domaines d'applications [Jav-05, Kuf-00]. Pour cette raison, et durant notre étude on utilisera l'approche basée sur la MEF pour calculer le champ électrique initial E_0 sur la ligne de la haute intensité pour l'utiliser dans le calcul du champ électrique résultant total comme sera détaillé.

II.7.2. Calcul du champ électrique avec la présence de charge d'espace

Dans cette session du travail, nous calculons le champ résultant total E_t sur la ligne de haute intensité. Ce champ est calculé en une dimension, de la pointe en direction vers le plan et en suivant les étapes suivantes:

1. La ligne de haute intensité choisie sera discrétisée (choix d'un pas de calcul constant).
2. Le champ initial E_0 sera calculé pour chaque point de discrétisation sur la ligne de haute intensité de champ.

3. Pour chaque pas de calcul :

- L'équation (II.64) sera utilisée pour le calcul de la charge d'espace résultante des électrons ($\bar{\alpha}$ utilisé dans cette équation est obtenu à partir de la base de donnée collectée de la littérature

qui donne $\frac{E}{p} = f\left(\frac{\bar{\alpha}}{p}\right)$, $p = 760$ torrs.

- L'équation (II.65) sera utilisée pour le calcul de la charge d'espace résultante d'ions positifs.

- L'équation (II.59) sera utilisée pour le calcul de la tension V .

- L'équation (II.60) sera utilisée pour le calcul du champ électrique dû à la charge d'espace (E charges d'espace)

- L'équation (II.67) sera utilisée pour le calcul du champ électrique résultant total E_t .

4. Les résultats obtenus seront présentés pour une seule géométrie, qui sera celle utilisée dans la session précédente (rayon de courbure de la pointe $R=0,25$ cm et distance inter-électrodes $d=25$ cm) en appliquant une tension positive $V=8.10^4$ V.

La programmation des équations citées précédemment sous MATLAB, nous a permis d'obtenir les résultats suivants:

La figure (II.18) représente le champ appliqué (E_0), le champ total (E_t) et le champ de charge d'espace en fonction de la distance inter-électrodes (d)

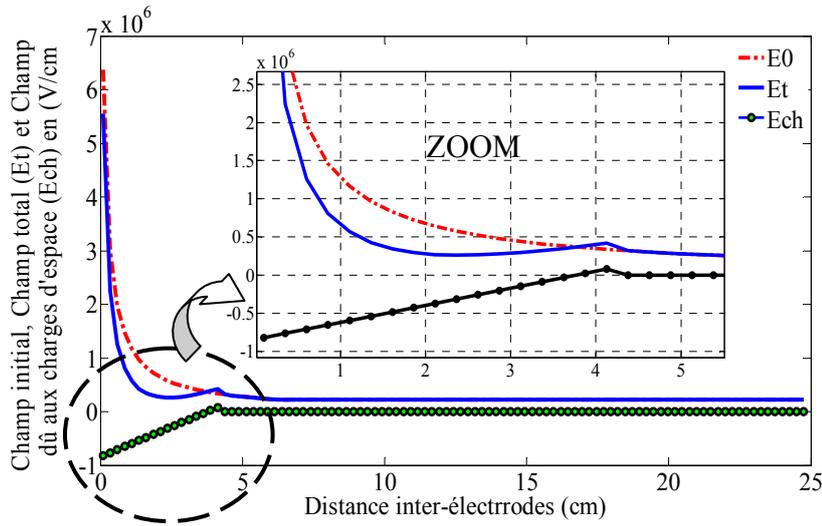


Figure II.18. Champ électrique initial, champ total et champ de la charge d'espace en fonction de la distance inter-électrodes

D'après la figure ci-dessus, nous remarquons que pour $0 \leq d \leq 3,7$ cm le champ total résultant est plus faible que le champ initial, donc le champ dû aux charges d'espaces est négatif ce qui implique qu'il est dans le sens inverse du champ appliqué. Cela confirme la présence des électrons dans le côté de la pointe positive et les ions juste après les électrons (formation d'une avalanche ou d'un streamer). Pour $3,7 \leq d \leq 4,3$ cm, le champ total est supérieur au champ initial, ce qui annonce que le champ dû aux charges d'espace est positif. Ceci confirme la présence des charges positives qui représentent la tête du streamer. Pour $d > 4,3$ cm, le champ total est égale au champ initial, ceci est expliqué par l'absence de la charge d'espace dans toute cette zone ainsi que son influence. La figure (II.19) représente la densité des particules chargées (électrons (N_e) et ions positifs (N_p)) par cm^3 . Cette densité est très élevée au voisinage de la pointe puis elle diminue jusqu'à ce qu'elle s'annule sur l'intervalle où le processus d'ionisation n'a pas eu lieu ($\bar{\alpha} \leq 0$). Nous remarquons aussi que la densité des électrons est plus élevée que celle des ions sur l'intervalle ionisé ($\bar{\alpha} > 0$). C'est le résultat de l'ionisation par collision.

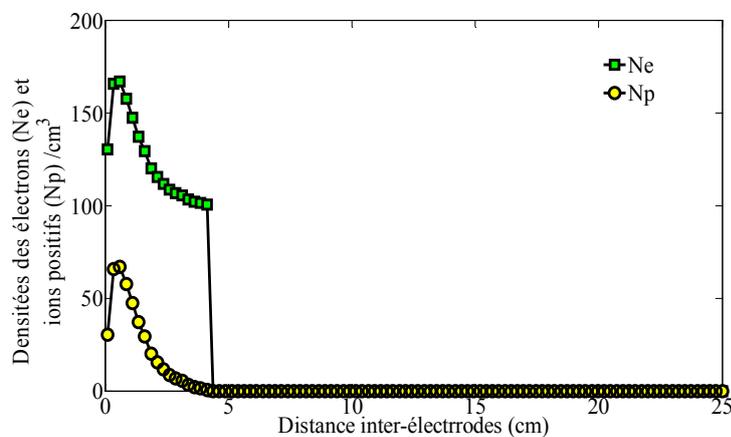


Figure II.19. Densités des électrons libres et des ions positifs en fonction de la distance inter-électrodes par cm^3

II.7.3. Prédiction des étapes de la décharge électrique dans une configuration pointe positive -plan

Cette partie du travail est basée sur l'analyse des valeurs de l'intégrale "I" (équation (II.4)) qui décrit le critère des streamers. Ces valeurs sont calculées dans les points de discrétisation sur la ligne de haute intensité. L'intégrale "I" est liée directement au coefficient $\bar{\alpha} > 0$ qui est lié à son tour au champ résultant total. Ce champ total dépend du champ de la charge d'espace. La quantité de charge d'espace dans l'intervalle peut définir la rigidité du système d'électrodes à étudier (Selon Townsend et Schumann). Donc nous pouvons déduire que la valeur de l'intégrale "I" peut nous donner une information sur l'étape atteinte de la décharge électrique dans l'intervalle à étudier.

II.7.3.1. Détermination des valeurs de l'intégrale I qui correspondent aux étapes de la décharge électrique

L'objectif de cette partie essentielle de notre travail est de faire correspondre à chaque étape de la décharge électrique développée dans l'espace inter-électrodes, un intervalle des valeurs de l'intégrale "I" comme indiqué dans le tableau (II.1). Ce tableau donne la nomination de chaque étape de décharge électrique et l'intervalle de valeurs numériques de l'intégrale "I" qui lui correspond. Ces valeurs seront considérées durant le reste de notre travail comme un codage numérique des étapes de la décharge électrique dans une configuration pointe positive-plan. Ces intervalles de "I" sont largement confirmés par l'expérimentale selon les travaux publiés pour différentes valeurs de R, d et V comme montré dans [Abd-88, Osm-93, Pet-99].

Étape de la décharge	Intervalle des valeurs de l'intégrale "I"
Avalanche de Townsend	$10 \leq I < 18$
Streamer	$18 \leq I \leq 20$
Couronne	$20 < I \leq 24$
Arc (claquage)	$I > 24$

Tableau II.1. Etapes de la décharge codées par les valeurs de l'intégrale 'I' selon [Abd-88, Osm-93, Pet-99]

Notre proposition de ce codage numérique des étapes de l'avancement de la décharge électrique dans un système d'électrode est basée sur les analyses suivantes :

- Sachant que les valeurs comprises entre 18 et 20 indiquent le déclenchement des "streamers" [Kuf-00, Mok-00], alors si nous considérons que l'étape qui précède le déclenchement des "streamers" est l'*avalanche électronique de Townsend* et les étapes qui apparaissent après le déclenchement des "streamer" sont la "couronne" suivie par l'"arc" (claquage) alors on déduit

que selon les références [Abd-88, Osm-93], les valeurs de l'intégrale "I" qui indiquent l'avalanche électronique commencent à partir de 10 jusqu'à 18 (où commencent les valeurs qui indiquent le streamer). Selon les références précédentes, les valeurs maximales qui indiquent l'étape de la couronne ne dépassent pas 24, alors on peut déduire que l'intervalle de valeurs indiquant la couronne est compris entre 20 et 24. Alors, les valeurs qui indiquent l'étape du claquage (arc) qui se déclenche après la couronne (selon nos considérations citées au début de ce chapitre) sont les valeurs supérieures à 24.

II.7.3.2. Application du critère des streamers dans le système d'électrodes pointe-plan

Dans cette partie du travail, nous prédirons l'étape de la décharge électrique déclenchée dans différentes géométries pointes-plans et pour des différentes valeurs de tensions positives continues appliquées à la pointe.

Les résultats de la simulation sont obtenus par l'exécution d'un programme réalisé sous MATLAB en suivant les étapes données par la figure suivante.

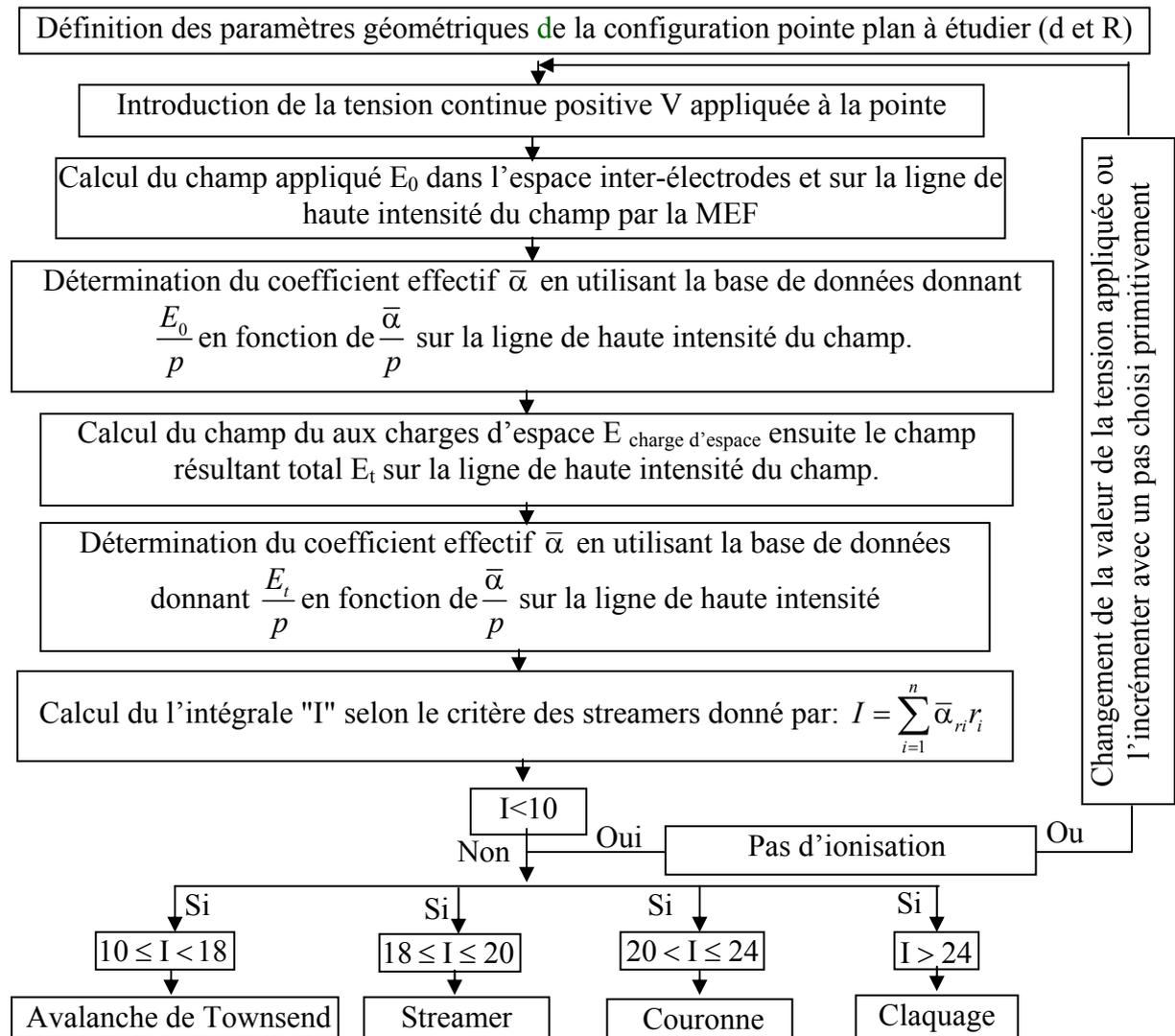


Figure II.20. Etapes de prédiction des étapes de la décharge électrique en utilisant le critère des streamers

Durant le calcul de l'intégrale "I", la connaissance de coefficient efficace en fonction du champ est nécessaire. Nous faisons recours aux différentes bases de données qui donne $\bar{\alpha}/p$ en fonction de E/p assemblées des différentes références.

Pour valider les résultats de prédiction et pour confirmer le codage numérique des étapes de la décharge que nous proposons, nous avons comparé les résultats de simulation numériques avec les résultats pratiques collectés de la littérature comme sera détaillé ci-après.

a. Conditions expérimentales

Dans notre travail nous comparons les résultats obtenus par simulation avec des résultats expérimentaux collectés de la littérature. Les essais expérimentaux que nous avons pu collecter des travaux publiés, sont réalisés dans les conditions suivantes [Dub-06, Kuf-00]:

1. L'air est le gaz isolant utilisé dans l'espace inter-électrodes.
2. La configuration utilisée est telle que la pointe est l'anode et le plan est la cathode. La distance inter-électrodes "d" entre la pointe et le plan est variable.
3. La pointe est fabriquée avec un matériau résistant à l'érosion et à l'oxydation. Plusieurs rayons de courbure sont utilisés, ces derniers ne doivent être ni trop faible pour résister à l'usure, ni trop grand pour que le champ électrique dans l'espace inter-électrodes soit suffisamment élevé.
4. Le plan doit être conducteur et doit être résistant à l'oxydation provoquée par la décharge. Le plan est un disque de 2 cm d'épaisseur dont le rayon doit être au moins deux fois supérieur à la distance inter-électrodes pour limiter les effets de bord.
5. Les électrodes sont changées systématiquement entre chaque série d'expérience. L'état de la surface des pointes doit être vérifié.
6. La source d'alimentation utilisée est celle de tension continue.

b. Test et validation

Les simulations effectuées durant cette partie du travail ont été réalisées pour calculer l'intégrale "I" par l'exécution de l'organigramme donné par la figure (II.20) sous MATLAB. Selon l'appartenance de la valeur calculée à l'un des intervalles de la valeur de "I" (Tableau (II.1)), nous pouvons déduire l'étape de la décharge déclenchée pour l'application d'une telle tension continue positive sur une géométrie d'électrodes pointe-plan donnée.

Pour valider la méthodologie de prédiction des étapes de la décharge électrique proposée durant ce chapitre; une comparaison des résultats obtenus par simulation numérique doit être faite avec des résultats expérimentaux collectés de la littérature (donc de se référer aux quelques travaux publiés). Cette comparaison sera réalisée dans le dernier chapitre avec des résultats pratiques collectés de la littérature et aussi avec ceux obtenus par les deux techniques de l'intelligence

artificielle proposées dans ce même chapitre pour mieux juger la performance de la méthode de prédiction proposée durant ce chapitre.

La table suivante donne quelques prédictions effectuées pour différentes géométries pointe-plan en calculant "I" selon les étapes de simulation données par la figure (II.20).

Géométrie		Tension appliquée V(kV)	Résultat pratique	Prédiction par modèle proposé	
d(cm)	R(cm)			Valeur de l'intégrale I	Phase de la décharge correspondante
70	10	390	Claquage	27,4	Claquage
40	19	320	Couronne	21,9	Couronne
40	5	180	Streamer	19,1	Streamer
60	2	380	Streamer	19	Streamer
80	40	350	Claquage	30	Claquage
70	20	390	Claquage	29,4	Claquage
20	40	280	Couronne	22,3	Couronne
20	0,12	140	Streamer	19,2	Streamer
20	2	180	Streamer	19,6	Streamer

Tableau II.2. Résultats de prédiction des étapes de la décharge électrique par le critère des streamers proposé via le calcul de "I"

Nous avons présenté dans la table ci-dessus des tests de prédiction par simulation du modèle proposé comparés avec ceux pratiques collectés de la littérature pour juger le modèle adopté, ce dernier présente une grande cohésion avec l'expérience pour chaque étape de l'avancement de la décharge prédite (même étape obtenue pratiquement sous les mêmes conditions) ce qui valide la possibilité d'utiliser la méthodologie proposée pour prédire les étapes de la décharge électrique. L'ensemble des résultats de prédiction obtenu sera présenté et discuté dans le dernier chapitre. L'ensemble des résultats des tests présentés dans ce chapitre contient des prédictions justes et aussi des prédictions erronées par rapport à ceux collectés de la littérature, mais l'analyse de la totalité des résultats de prédiction effectués permet d'extraire une information sur la capacité de la méthodologie proposée à prédire les étapes de l'avancement de la décharge électrique dans une configuration pointe-plan.

II.6. Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons présenté une méthodologie de calcul pour la prédiction des étapes de l'avancement de la décharge électrique dans une configuration pointe (positive)-plan basée

sur le critère dit des "streamers". Le calcul de l'intégrale donnée par l'équation (II.3) qui définit ce critère, peut donner une information sur l'état de l'isolement ou sur l'avancement de la décharge d'une géométrie pointe positive –plan sous des conditions normales de pression et température. Les valeurs de cette intégrale calculées varient pour chaque variation des paramètres (V , d et R). Chaque valeur de cette intégrale peut indiquer une étape de la décharge.

Les résultats obtenus par la méthodologie proposée durant ce chapitre sont assez proches de l'expérimentale comme le montre clairement le tableau de résultats élargis donné dans le dernier chapitre. L'idée de prédiction des étapes de la décharge électrique proposée durant ce chapitre peut être réalisée par les techniques d'intelligence artificielle en calculant les différentes valeurs de l'intégrale (II.4) pour différentes géométries et conditions et en faisant correspondre à chaque valeur calculée l'étape de la décharge électrique correspondante.

L'implémentation des techniques d'intelligence artificielle pour la prédiction des étapes de la décharge reste un objectif essentiel de notre travail. Le chapitre suivant donne une brève présentation théorique sur les techniques de l'intelligence artificielle appliquées à la fin de ce travail.

CHAPITRE III : INTELLIGENCE ARTIFICIELLE

III.1. Introduction

Le claquage de l'air a été le sujet de nombreuses études expérimentales, théoriques et de simulation. Le phénomène physique est, de nos jours assez maîtrisé [Rez-07, Loe-41]. Des modèles mathématiques ont été proposés pour calculer la tension critique de claquage et même de déterminer les étapes de la décharge. Comme ces études dépendent de plusieurs paramètres, il est difficile de trouver un modèle mathématique qui tient compte de tous les facteurs [Mee-53, Mee-78, Mar-06, Mok-01]. Les techniques d'intelligence artificielle, telles que les techniques basées sur les réseaux de neurones, logique floue et algorithmes génétiques, sont de nouvelles méthodes de modélisation appliquées dans plusieurs secteurs de technologie, particulièrement pour des problèmes où les entrées et sorties ne peuvent pas être directement reliées par des équations linéaires [Kan-07, Man-12, Mar-06, Cir-02].

L'étude de la décharge électrique nécessite la connaissance de sa progression étape par étape jusqu'au claquage. La prédiction des étapes de la décharge dans un intervalle d'air ayant des facteurs influants sur son avancement, peut donner une information importante sur la rigidité de l'intervalle [Mok-01]. La difficulté de modéliser et de prédire les étapes des décharges électriques avec des formules simples ou complexes fait intervenir l'utilisation des techniques de prédiction basées sur les techniques d'intelligence artificielles [Rez-07, Loe-41, Mee-53, Mee-78, Mar-06]. L'objectif final de ce travail est de prédire les étapes de la décharge électrique dans une configuration d'électrodes « Pointe-plan ». Un modèle mathématique de prédiction a été proposé et l'utilisation de l'intelligence artificielle en particulier les techniques basées sur la logique floue et sur les réseaux de neurones ont été appliquées.

Dans ce chapitre nous présenterons la théorie des deux techniques d'intelligences artificielles proposées pour réaliser cette étude. La méthodologie de l'exploitation de chaque méthode et les résultats obtenus durant notre travail seront présentés et interprétés dans le chapitre qui suit.

III.2. Logique floue

C'est en 1965, à l'université de Berkeley, que Lofti Askar Zadeh a développé la logique floue (LF) en s'appuyant sur sa théorie mathématique des ensembles flous pour modéliser les connaissances imprécises et incertaines comme l'est le raisonnement humaine. Un ordinateur lui, est basé sur la logique classique traitant des données exactes. L'idée de la logique floue est de transmettre cette faculté du raisonnement humain et de faire accepter des données imprécises à un ordinateur [Ayo- 12, Cir-02, God-99]. La notion de sous-ensemble flou a pour but de permettre des niveaux dans l'appartenance d'un élément à une classe [God-97], c'est-à-dire de faire correspondre un degré de vérité (d'appartenance) à une variable qui peut être linguistique.

Ce niveau d'appartenance d'un élément à une classe permet la modélisation de l'observation humaine exprimée sous forme linguistique [God-99, Bag-99].

III.2.1. Notions de base des ensembles flous et de la logique floue

La logique floue (LF) est une technique pour le traitement des connaissances imprécises basées sur des termes linguistiques. Elle s'approche donc de la démarche humaine en ce sens que les variables traitées ne sont pas des variables logiques binaires, mais plutôt des variables linguistiques se rapprochant du langage humain de tous les jours. De plus ces variables linguistiques sont traitées à l'aide de règles dite « règles de références ». Ainsi, la théorie de la logique floue, fondée sur des aspects de la théorie des probabilité fait intervenir des ensembles d'appartenances appelés « ensembles flous »[Buh-98, Bor-98].

III.2.1.1. Théorie des ensembles flous

La théorie des ensembles flous est une théorie mathématique dont l'objectif principal est la modélisation des notions vagues et incertaines du langage naturel. Ainsi, elle évite les inadéquations de la théorie des ensembles classiques quant au traitement de ce genre de connaissances [Idr-03, God-99].

La fonction d'appartenance d'un ensemble classique A est définie par:

$$\mu_A(x) = \begin{cases} 1 & \text{si } x \in A \\ 0 & \text{si } x \notin A \end{cases} \quad (\text{III.1})$$

Cela signifie qu'un élément x est soit dans A ($\mu_A(x) = 1$) ou non ($\mu_A(x) = 0$). Or dans plusieurs situations, il est parfois ambigu que x appartienne ou non à A. Pour imiter l'esprit humain, la structure de la logique classique est limitée.

III.2.1.1.1. Univers de discours

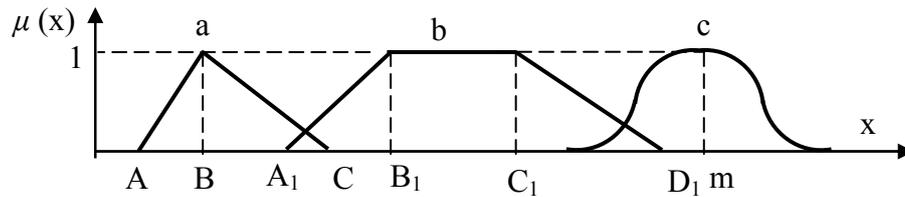
L'univers de discours d'une variable couvre l'ensemble des valeurs prises par cette variable. Il est partitionné en plusieurs sous-ensembles flous représentés par leurs fonctions d'appartenance. À chaque fonction d'appartenance, une variable linguistique est associée [God-99, Bor-98].

a. Fonction d'appartenance

Soit U un ensemble de référence (univers de discours) et soit x un élément quelconque de U. Ainsi, un sous-ensemble flou A de U est caractérisé par une fonction d'appartenance qui associe, à chaque point x de U un réel $\mu_A(x)$ dans l'intervalle [0, 1]; représente le degré d'appartenance de x à A. On observe les trois cas possibles suivants [God-99, Cir-02]:

$$\mu : x \in A \rightarrow \mu_A(x) \in [0,1] = \begin{cases} \mu_A(x) = 1 & \text{Si } x \text{ est complètement dans } A \\ 0 < \mu_A(x) < 1 & \text{Si } x \text{ est partiellement dans } A \\ \mu_A(x) = 0 & \text{Si } x \text{ est à l'extérieur de } A \end{cases} \quad (\text{III.2})$$

Il n'y a pas de règle précise pour la définition de fonction d'appartenance. Alors chaque sous ensemble flou peut être représenté par sa fonction d'appartenance définie dans un intervalle dite « intervalle flou ». Les fonctions d'appartenance peuvent être symétriques, régulièrement distribuées ou avoir une distribution non uniforme [God-99, Bor-98] et elle peuvent avoir différentes formes [Ibr-04]. La figure (III.1) montre quelques fonctions d'appartenance.



a) Fonction triangulaire b) Fonction trapézoïdale c) Fonction gaussienne.

Figure III.1. Exemple de fonctions d'appartenance

Le degré d'appartenance à chacune des formes précédentes, est défini comme suit [Cir-02, Ayo-12] :

- **Forme triangulaire**

Une fonction d'appartenance triangulaire, telle que illustrée par la figure (III.1), elle est définie par l'expression suivante:

$$\mu(x) = \begin{cases} \frac{x-A}{B-A} & \text{si } x \in [A, B] \\ \frac{C-x}{C-B} & \text{si } x \in [B, C] \\ 0 & \text{si } x \text{ est ailleurs} \end{cases} \quad (\text{III.3})$$

- **Forme trapézoïdale**

Une fonction d'appartenance trapézoïdale, telle que illustrée par la figure (III.1), elle est définie par l'expression suivante :

$$\mu(x) = \begin{cases} \frac{x-A_1}{B_1-A_1} & \text{si } x \in [A_1, B_1] \\ 1 & \text{si } x \in [B_1, C_1] \\ \frac{D_1-x}{D_1-C_1} & \text{si } x \in [C_1, D_1] \\ 0 & \text{si } x \text{ est ailleurs} \end{cases} \quad (\text{III.4})$$

- **Forme gaussienne**

Une fonction d'appartenance gaussienne, telle que illustrée par la figure (III.1), est caractérisée par sa valeur centrale m et son écart type σ . La fonction d'appartenance gaussienne est définie par :

$$\mu(x) = e^{-\frac{1}{2}\left(\frac{x-m}{\sigma}\right)^2} \quad (\text{III.5})$$

b. Opérateurs de la logique floue

Supposons que A et B sont deux sous-ensembles flous définis dans un univers du discours U par les fonctions d'appartenance $\mu_A(x)$ et $\mu_B(x)$. On peut définir des opérations ensemblistes telles l'union, l'intersection et de complémentarité peuvent être appliquées aux ensembles flous. Leur définition n'est pas unique. Dans la littérature, il existe de nombreuses variantes pour ces opérateurs [Lee-93]. Le tableau suivant donne deux ensembles d'opérateurs pour le complément (NON), l'intersection (ET) et l'union (OU).

Dénomination	Intersection ET :	Réunion OU :	Complément NON :
	$\mu_{A \cap B}(x)$	$\mu_{A \cup B}(x)$	$\mu_{\bar{A}}(x)$
Opérateurs de Zadeh	$\min(\mu_A(x), \mu_B(x))$	$\max(\mu_A(x), \mu_B(x))$	$1 - \mu_A(x)$
Probabiliste	$\mu_A(x) \times \mu_B(x)$	$\mu_A(x) + \mu_B(x) - \mu_A(x) \times \mu_B(x)$	$1 - \mu_A(x)$

Tableau III.1. Exemple d'opérateurs flous.

III.2.1.1.2. Raisonnement floue

En logique floue, le raisonnement flou, également appelée raisonnement approximatif, se base sur des règles floues qui sont exprimées en langage naturel en utilisant les variables linguistiques [Cir-02, God-99, Bor-98].

a. Règles floues

Une règle floue (linguistique) est une affirmation exprimée par « Si *Prémisse* Alors *Conclusion* (*Conséquence*) » dont la prémisse et la conséquence sont des propositions floues ou des combinaisons de propositions floues par des connecteurs logiques tels que le ET et le OU. La forme générale est [God-99]:

Si (*un ensemble de conditions est satisfait*) Alors (*un ensemble de conséquences*)

Les types de règles les plus connues sont [Lee-93]:

-Les règles de type *Mamdani* où les conclusions, comme les prémisses, sont des propositions floues :

$$\text{Si } x \text{ est } A_1 \text{ et } y \text{ est } B_1 \text{ Alors } Z \text{ est } C_1$$

-Les règles de type *Takagi-Sugeno-Kang* où dans les conclusions, une sortie est fonction des entrées:

$$\text{Si } x \text{ est } A_1 \text{ et } y \text{ est } B_1 \text{ Alors } z = f(x, y)$$

Les règles floues peuvent être aussi présentées par une matrice d'inférence qui rassemble toutes les règles linguistiques reliant les entrées et sorties sous forme d'un tableau [Buh-98, God-99]. Par exemple le tableau (III.2) représente une matrice d'inférence d'un système flou formé de deux entrées E_1 et E_2 et une sortie S_1 [Bag-99].

valeurs linguistiques des entrées E_1 et E_2

$E_2 \backslash E_1$	NG	NM	NP
NG	NG	NG	NG
NM	NG	NG	NG
NP	NG	NG	NM

valeurs linguistiques de la sortie (S_1)

Tableau III.2. Exemple d'une matrice d'inférence

Le nombre maximal de règles est donné par l'équation :

$$r_{\max} = \prod_{i=1}^m m_i \quad (\text{III.6})$$

r_{\max} : nombre maximal de règles

m_i : nombre de fonctions d'appartenance dans un univers du discours.

a.1. Degré de vérité (poids)

Le degré de vérité, ou encore degré d'activation d'une règle prend une valeur comprise entre 0 et 1 déduite des degrés d'appartenance des prédicats (prémisses ou conditions) de la règle. Il existe plusieurs méthodes pour calculer la valeur de vérité de telles propositions. Le tableau (III.3) donne des méthodes plus communément utilisées [Cir-02, Gar-95].

Soit les valeurs du degré de vérité des propositions élémentaires « V est A », « V_1 est A_1 » et « V_2 est A_2 » égales à $\mu_A(v)$, $\mu_{A_1}(v_1)$ et $\mu_{A_2}(v_2)$ où v , v_1 et v_2 correspondents aux valeurs numériques exacte de V, et V_1 et V_2 .

Dénomination	Conjonction (V_1 est A_1) et (V_2 est A_2)	Disjonction (V_1 est A_1) ou (V_2 est A_2)	Complémentation Non (V est A)
Logique de Zadeh	$\text{Min}(\mu_{A_1}(v_1), \mu_{A_2}(v_2))$	$\text{Max}(\mu_{A_1}(v_1), \mu_{A_2}(v_2))$	$1 - \mu_A(v)$
Logique probabiliste	$\mu_{A_1}(v_1) \times \mu_{A_2}(v_2)$	$\mu_{A_1}(v_1) + \mu_{A_2}(v_2) -$ $\mu_{A_1}(v_1) \times \mu_{A_2}(v_2)$	$1 - \mu_A(v)$

Tableau III.3. Exemple de calcul de degré de Vérité.

a.2. Implication floue

Le mécanisme généralisant l'implication est appelé " implication floue". Il existe divers opérateurs d'implication floue. La table suivante montre les plus utilisés [Lee-93, God-99].

Dénomination	Implication (V_1 est A_1) \Rightarrow (V_2 est A_2)
Mamdani	$\text{Min}(\mu_{A_1}(v_1), \mu_{A_2}(v_2))$
Larsen	$\mu_{A_1}(v_1) \times \mu_{A_2}(v_2)$
Reichenbach	$1 - \mu_{A_1}(v_1) + \mu_{A_1}(v_1) \times \mu_{A_2}(v_2)$
Willmott	$\text{Max}(1 - \mu_{A_1}(v_1), \text{Min}(\mu_{A_1}(v_1), \mu_{A_2}(v_2)))$
Kleene-Dienes	$\text{Max}(1 - \mu_{A_1}(v_1), \mu_{A_2}(v_2))$
Lukasiewicz	$\text{Min}(1 - \mu_{A_1}(v_1) + \mu_{A_2}(v_2), 1)$

Tableau III.4. Exemple des opérateurs d'implication floue.

Où v_1 et v_2 correspondent à des instanciations numériques réelles des variable V_1 et V_2 .

Parmi les implications définies dans le tableau précédent, les implications de Mamdani et de Larsen sont les plus connues en raison de leurs nombreuses applications.

III.2.1.2. Système flou

Un système flou est formé de trois étapes principales comme indiqué sur la figure (III.2): La première étape, appelée la fuzzification, permet de découper une entrée en zones - fonctions d'appartenances que l'on désignera par des variables linguistiques. La seconde étape concerne le module d'inférence, qui est constitué de deux blocs, le moteur d'inférence et la base des règles. La troisième étape, soit la défuzzification, consiste à convertir le résultat flou de l'inférence des règles en une valeur de sortie finale précise.

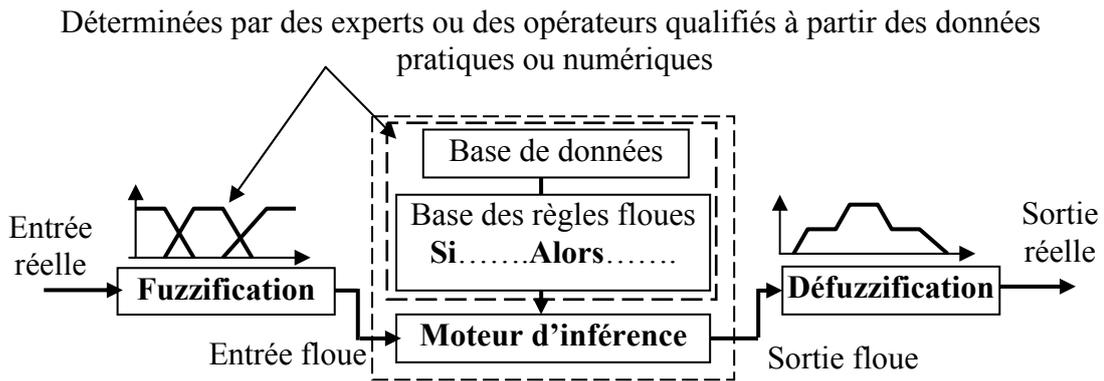


Figure III.2. Système flou

III.2.1.2.1. Fuzzification

Les caractéristiques de cette étape sont habituellement déterminées par des experts ou des opérateurs qualifiés travaillant sur le processus et recourant le plus souvent à leurs connaissances [Bag-99]. Les étapes de fuzzification consistent alors à établir les fonctions d'appartenance dont voici les étapes:

1. Etablir les variables linguistiques;
2. Établir les quantificateurs flous (nombre de valeurs linguistiques);
3. Attribuer une signification numérique à chaque quantificateur flou: fonction d'appartenance.

Il faudra prendre certaines précautions dans l'élaboration et la disposition des fonctions d'appartenance. Une bonne partition de l'univers du discours sera formée de fonctions d'appartenance en évitant un chevauchement trop important ou trop faible de deux fonctions d'appartenance voisines. En effet, une zone morte dans l'univers du discours, c'est-à-dire une partie n'appartenant à aucune fonction d'appartenance, conduira à une instabilité du système flou. À l'inverse, un chevauchement trop important conduira à un affaiblissement des performances du système flou [God-99].

III.2.1.2.2. Inférence flou

L'inférence floue est le processus d'élaboration des relations qui existent entre les variables d'entrées (exprimées comme variables linguistiques) et la variable de sortie (également exprimée comme variable linguistique). L'inférence floue se compose de deux étapes: l'implication des antécédents et l'agrégation des règles. Pour déterminer l'implication, il faut utiliser un opérateur de conjonction traduisant le ET. Pour déterminer la variable de sortie finale floue par l'agrégation, il faut utiliser un opérateur de disjonction traduisant le OU [Gar-95].

Nous allons considérer un système flou avec "n" règles linguistiques suivant :

$$\left\{ \begin{array}{l} \text{Si } x \text{ est } A_1 \text{ ET } y \text{ est } B_1 \text{ alors } z \text{ est } C_1 \\ \text{OU} \\ \text{Si } x \text{ est } A_2 \text{ ET } y \text{ est } B_2 \text{ alors } z \text{ est } C_2 \\ \text{OU} \\ \dots \\ \text{Si } x \text{ est } A_n \text{ ET } y \text{ est } B_n \text{ alors } z \text{ est } C_n \end{array} \right. \quad (\text{III.7})$$

Le système (III.7) a deux entrées x et y et une sortie z . Les règles de ce système sont liées par l'opérateur OU.

a. Types d'inférence

Il existe plusieurs types de systèmes d'inférence floue qui peuvent être mis en œuvre dans les systèmes flous.

Dans ce qui suit nous intéresserons qu'à la méthode de Mamdani qui utilise les opérateurs min et max pour l'implication et l'agrégation, ou encore à la méthode de Larsen qui utilise un produit et l'opérateur max [God-99].

a.1. Méthode d'inférence Min-Max (Implication de Mamdani)

Cette méthode réalise l'opérateur "ET" par la fonction "Min", la conclusion "ALORS" de chaque règle par la fonction "Min" et la liaison entre toutes les règles (opérateur "OU") par la fonction Max. La dénomination de cette méthode, dite Min-Max est due à la façon de réaliser les opérateurs ALORS et OU de l'inférence [Buh-98].

La figure (III.3) représente graphiquement le principe de la méthode d'inférence Min-max. D'après cette figure, les deux règles activées sont les règles suivantes :

R_1 : Si x est A_1 ET y est B_1 Alors z est C_1

R_2 : Si x est A_2 ET y est B_2 Alors z est C_2

La condition (x est A_1 ET y est B_1) de la première règle implique pour $x=x^*$ et $y=y^*$ les facteurs d'appartenance $\mu_{A_1}(x^*)$ et $\mu_{B_1}(y^*)$ ce qui implique que la condition prend le facteur d'appartenance $\mu_{B_1}(y^*)$ (minimum des deux valeurs à cause de l'opérateur ET) (voir la figure (III.3)), la fonction d'appartenance $\mu_{C_1}(z)$ est donc écrêtée à $\mu_{B_1}(y^*)$ (à cause de la formation du minimum lié à Alors). De même pour la deuxième règle on trouve que la fonction d'appartenance $\mu_{C_2}(z)$ est écrêtée à $\mu_{A_2}(x^*)$ (voir la figure (III.3)).

Il faut encore déterminer la fonction d'appartenance résultante. Elle s'obtient par la formation du maximum des deux fonctions d'appartenance partielles, étant donné que les deux règles sont liées par l'opérateur OU [Buh-98].

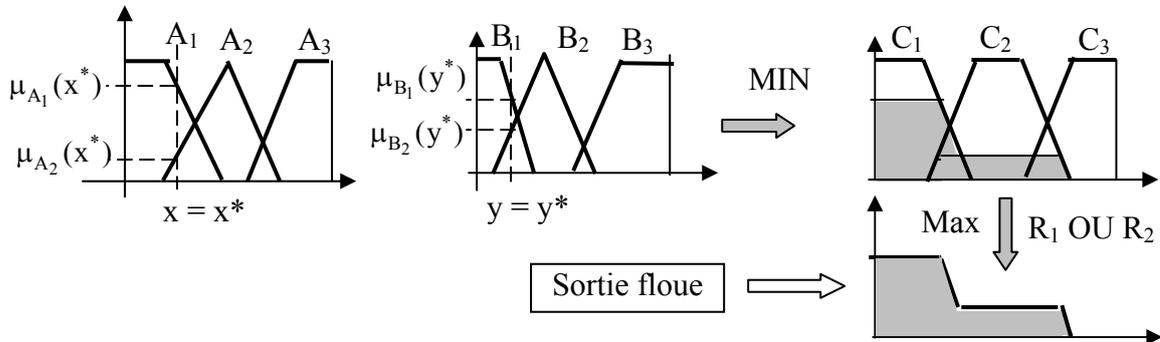


Figure III.3. Exemple d'inférence Min-max

a.2. Méthode d'inférence Max-Produit (Implication de Larsen)

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. La différence par rapport à la méthode précédente réside dans la manière de réaliser la conclusion "ALORS". Dans ce cas, on utilise le produit. On remarque que les fonctions d'appartenances partielles ici ont la même forme que la fonction d'appartenance dont elles sont issues multipliées par un facteur d'échelle vertical qui correspond au degré d'appartenance obtenu à travers l'opérateur "ET" (formation du minimum). 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 [Buh-98, Bag-99]. La représentation graphique du principe de la méthode d'inférence max-prod se trouve à la figure (III.4). D'après cette figure, les deux règles activées sont aussi les règles suivantes : R_1 : Si x est A_1 ET y est B_1 Alors z est C_1

$$R_2 : \text{Si } x \text{ est } A_2 \text{ ET } y \text{ est } B_2 \text{ Alors } z \text{ est } C_2$$

Comme dans le cas du paragraphe précédent, la première condition prend le facteur d'appartenance $\mu_{B_1}(y^*)$. La fonction d'appartenance $\mu_{C_1}(z)$ pour la variable de sortie est cette fois-ci multipliée par ce facteur ($\mu_{B_1}(y^*)$), (à cause de la formation du produit lié à ALORS). De même manière pour la deuxième règle, la fonction $\mu_{C_2}(z)$ sera multiplié par $\mu_{A_2}(x^*)$ (formation du produit). L'opérateur OU qui lient les différentes règles est réalisé de nouveau par la formation du maximum. Donc la fonction d'appartenance résultante s'obtient également par la formation du maximum des deux fonctions d'appartenances partielles, réalisant ainsi l'opérateur OU entre les règles.

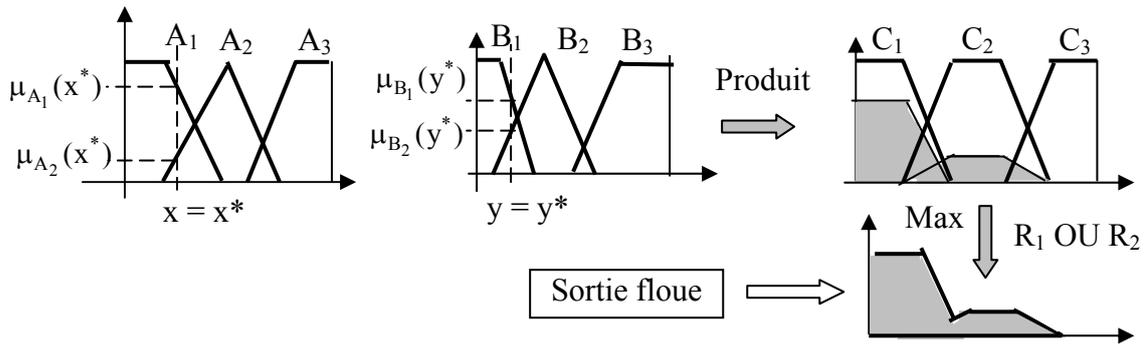


Figure III.4. Exemple d'inférence Max- produit

III.2.1.2.3. Défuzzification

Le système d'inférence fournit une sortie floue par l'évaluation des règles à la suite d'une ou plusieurs entrées réelles. Par l'étape de défuzzification se fait le retour aux grandeurs de sortie réelles. Il s'agit de calculer, à partir de la variable de sortie, l'abscisse qui correspond à la valeur de cette sortie. Il existe plusieurs méthodes de défuzzification dont les plus communément utilisées sont la méthode du centre de gravité, la méthode du maximum et la méthode de la moyenne des maxima [Bag-99, Kan-07].

a. Défuzzification par la méthode du centre de gravité

En général, la méthode du centre de gravité est basée sur le calcul de l'abscisse correspondant au centre de gravité de la surface du sous-ensemble flou de la solution déterminée par l'agrégation de l'action des règles floues. La Figure (III.5) illustre une solution floue dont la solution précise, z_C , est donnée par la méthode du centre de gravité [God-99].

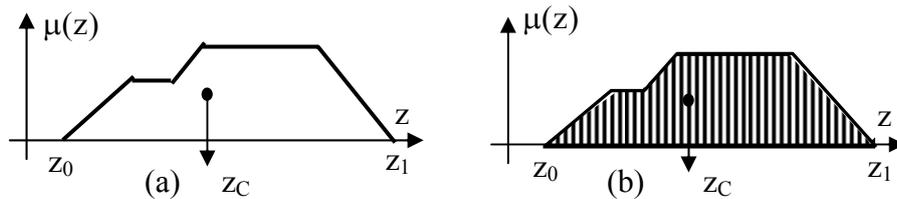


Figure III.5. Défuzzification par la méthode du centre de gravité

L'abscisse du centre de gravité peut être déterminée en utilisant la formule générale (figure (III.5-a)) :

$$z_C = \frac{\int_{z_0}^{z_1} z\mu(z)dz}{\int_{z_0}^{z_1} \mu(z)dz} \tag{III.8}$$

Lorsque la fonction $\mu(z)$ est discrétisée (figure (III.5-b)), le centre de gravité est donné par :

$$z_C = \frac{\sum_{i=1}^n \mu_i z_i}{\sum_{i=1}^n \mu_i} \quad (\text{III.9})$$

Où n est le niveau de quantification, z_i la valeur de sortie pour le niveau i et μ_i sa valeur d'appartenance [God-99].

b. Méthode de moyenne des maxima

Pour une variable de sortie donnée, la valeur numérique délivrée est calculée comme la moyenne des valeurs appartenants à la caractérisation floue de sortie et ayant comme degré d'appartenance le maximum de la fonction caractéristique de cette caractérisation floue (Figure (III.6)) [Gar-92].

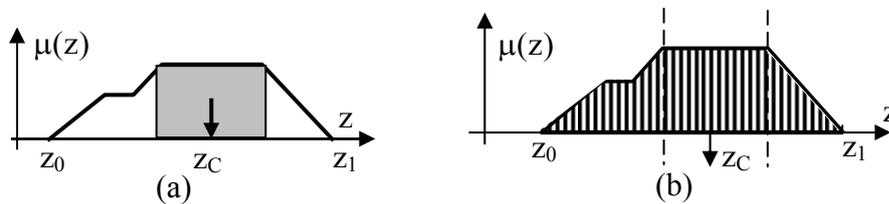


Figure III.6. Défuzzification par la méthode de la moyenne des maxima

Si la fonction est discrétisée, comme montré à la figure (III.6-a), la valeur déffuzifiée est donnée par :

$$z_C = \sum_{i=1}^{\ell} \frac{r_i}{\ell} \quad (\text{III.10})$$

Où ℓ est le nombre de valeurs quantifiées, r_i pour lesquelles l'appartenance est maximale [God-99]

c. Méthode du maximum

Pour une variable de sortie donnée, si la fonction d'appartenance associée à la caractérisation floue de sortie ne possède qu'un maximum, la valeur numérique renvoyée est égale à ce maximum (Figure (III.7))[Gar-92].

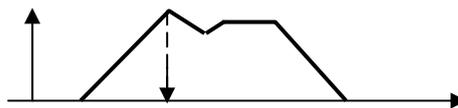


Figure III.7. Défuzzification par la méthode du maximum

III.3. Réseaux de neurones artificiels

Habituellement on désigne par « réseau de neurones », un réseau de neurones artificiels basé sur un modèle mathématique simplifiée de neurone biologique [Hen-02]. Alors, le concept de

réseaux de neurones artificielles (RNA) est un concept neuromimétique basé sur des modèles mathématiques et informatiques, des assemblages d'unités de calculs appelés neurones formels ou artificiels, et dont l'inspiration originelle était un modèle de la cellule nerveuse humaine [Kan-11, Bag-99].

III.3.1. Modèle mathématique d'un neurone formel

Le modèle mathématique d'un neurone formel ou artificiel le plus utilisé est basé sur les travaux de McCulloch et Pitts illustré sur la figure (III.8). Chaque neurone est constitué de deux parties: la fonction « Net » qui représente l'activité d'un neurone (les plus utilisées sont données dans la table (III.5)) et la fonction d'activation (les plus courantes sont présentées sur la figure (III.9)). La fonction « Net » détermine comment les entrées du réseau ($x_i: 1 \leq i \leq n$) sont combinés à l'intérieur du neurone. Dans la figure (III.8), une combinaison linéaire pondérée a été choisie. Les entrées du neurone sont désignées par x_i ($1 \leq i \leq n$). Les paramètres w_i reliant les entrées au neurone sont appelés poids synaptiques ou tout simplement poids [Ibr-04, Kro-96]. La sortie du neurone est donnée par:

$$S = f(h) \quad (III.11)$$

Avec :

$$h = \sum_{i=1}^n W_i x_i + b \quad (III.12)$$

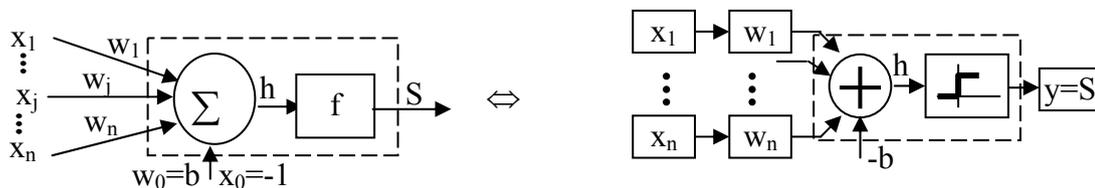


Figure III.8. Schéma d'un neurone formel

La sortie « h » correspond à une somme pondérée des poids et des entrées moins ce qu'on nomme le biais « b » du neurone. Le résultat « h » de la somme pondérée s'appelle le niveau d'activation du neurone (également appelé état ou activité). Le biais « b » s'appelle aussi le seuil d'activation du neurone [Bag-99, Hen-02, Amm-07]. Le biais peut être considéré comme entrée avec un poids=1 comme montré sur la figure précédente [Ibr-04].

f: est la fonction d'activation du neurone. Conformément au modèle biologique, les fonctions d'activation sont généralement croissantes et bornées. La table suivante donne des exemples de ces fonctions :

Fonction Net	Formule	commentaires
Linéaire	$h = \sum_{j=1}^n W_j x_j + b_j$	La plus utilisée
Delta ($\sum -\Pi$)	$h = \sum_{j=1}^n w_j x_j$	Rarement utilisée
Ordre supérieur (formule de deuxième ordre)	$h = \sum_{j=1}^N \sum_{k=1}^N w_{jk} x_j x_k + b_j$	h_i est une combinaison linéaire pondérée des termes polynomiaux d'ordre élevé de la variable d'entrée. Le nombre de termes d'entrée est égal à N_d , où d est à l'ordre du polynôme.

Tableau III.5. Résumé des fonctions Net

La sortie du neurone, notée $S=f(h)$, est liée aux entrées du réseau par une transformation linéaire ou non linéaire appelée fonction d'activation [Cir-02, Hen-02] :

Fonction d'activation	Formule $f(h)$	Dérivée $\frac{df(h)}{dh}$	Commentaires
Sigmoïde	$f(h) = \frac{1}{1 + e^{-k \cdot h}}$	$k \cdot f(h)(1 - f(h))$	Communément utilisée; Sa dérivée est directement calculée de $f(h)$. $k > 0$ (en général $k=1$) qui produit la valeur de sortie de 0 à 1
Tangente hyperbolique	$\tanh(k \cdot h)$	$k \cdot (1 - [f(h)]^2)$	Sa dérivée est directement calculée de $f(h)$
Tangente inverse	$\frac{2}{\pi} \tan^{-1}(k \cdot h)$	$k \frac{2}{\pi} \cdot \left(\frac{1}{1 + (k \cdot h)^2} \right)$	Rarement utilisée
Seuil	$\begin{cases} \beta & \text{si } h \geq \theta \\ -\delta & \text{si } h < \theta \end{cases}$		β et δ sont des scalaires positifs. Pour $\beta=1$, $\delta=0$ et $\theta=0$; la fonction de seuil devient fonction d'échelon (Fonction Heaviside). Pour $\beta=\delta=1$ et $\theta=0$; la fonction de seuil devient fonction signe .
Gaussienne à base radiale	$\exp\left[-\ h - m\ ^2 / \sigma^2\right]$	$-2(h - m) \cdot f(h) / \sigma^2$	Utilisé pour les réseaux de neurones à base radiale, m et σ^2 sont des paramètres à spécifier
Linéaire	$a \cdot h + b$	a	

Tableau III.6. Fonctions d'activations et leurs dérivées.

III.3.2. Architecture des réseaux de neurones

On classe généralement les réseaux de neurones en deux catégories: les réseaux faiblement connectés à couches que l'on appelle des réseaux "feedforward" ou réseaux directs et les réseaux

fortement connectés que l'on appelle des réseaux "récurrents". Dans ces deux configurations, on retrouve des connexions totales ou partielles entre les couches. La figure suivante présente les différentes topologies d'un Réseau de Neurons Artificiels [Ibr-04, Hen-02].

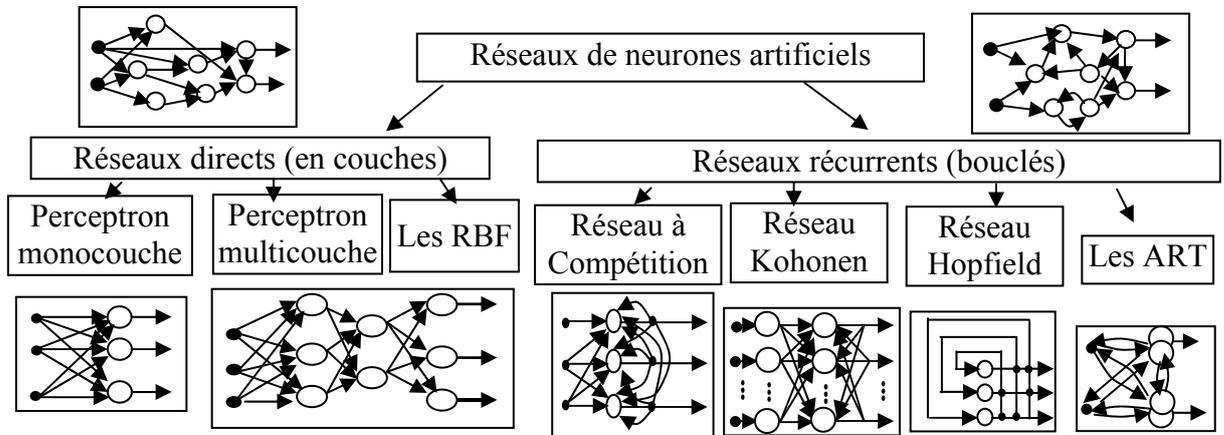


Figure III.9. Topologies des réseaux de neurones artificiels

Dans ce qui suit nous expliquerons que les architectures utilisées dans notre travail

III.3.2.1. Réseaux propagation vers l'avant« FEED-FORWARD »

Un réseau de neurone "Feed-forward" appelé aussi réseau non bouclé ou unidirectionnels ou statique est présenté par un ensemble de neurones connectés entre eux telle que l'information circulant des entrées vers les sorties sans retour en arrière (dans un sens unique). Le calcul de la sortie se fait en propageant les calculs de la gauche vers la droite. Ces architectures sont les plus couramment utilisées [Ibr-04, Kro-96].

a. Perceptron monocouche SLP

Le perceptron est un réseau très simple grâce à sa composition d'une couche d'entrée et d'une couche de sortie sans avoir de couche cachée. Sa structure est montrée dans la figure (III.10). Différents neurones sont arrangés dans une couche d'entrées et ils sont connectés avec chaque neurone de la couche de sortie par l'intermédiaire des poids [Ibr-04, Bag-99].

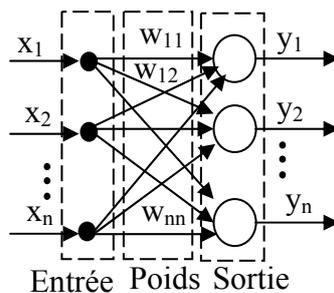


Figure III.10. Perceptron

b. Perceptron multicouches PMC

Le PMC est une extension du perceptron monocouche qui dispose d'un nombre de couches quelconque et un nombre de neurones (ou d'entrées) par couche également quelconque. Les neurones y sont arrangés en couches successives: la première couche qui forme le vecteur des données d'entrée est appelée couche d'entrée tandis que la dernière couche qui produit les résultats est appelée couche de sortie. Toutes les autres couches qui se trouvent au milieu sont appelées couches cachées [Ibr-04]. La figure (III.11) donne un exemple d'un réseau contenant une couche d'entrée, deux couches cachées et une couche de sortie. Les neurones sont reliés entre eux par des connexions pondérées. Les neurones de la couche d'entrée sont connectés uniquement à la couche suivante tandis que les neurones des couches cachées ont la particularité d'être connecté à tous les neurones de la couche précédente et de la couche suivante, par contre il n'y a pas de connexions entre les neurones elle-même dans n'importe quelle couche [Kro-96].

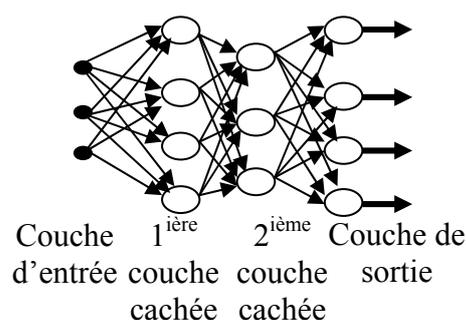


Figure III.11. Exemple d'un réseau de type perceptron multicouches

Le choix du nombre de couches cachées dépend généralement de la complexité du problème à résoudre, en théorie une seule couche cachée peut être suffisante pour résoudre un problème donné mais il se peut que le fait de disposer de plusieurs couches cachées permette de résoudre plus facilement un problème complexe [Bra11].

III.3.3. Apprentissage

L'apprentissage est une étape très importante du développement d'un réseau de neurones durant laquelle le comportement du réseau est modifié itérativement jusqu'à l'obtention du comportement désiré, et ceci par l'ajustement des poids et les biais des neurones à une source d'information bien définie. [Oul-05]. Il existe plusieurs types de règles d'apprentissage qui peuvent être rassemblées en deux catégories qui sont l'apprentissage supervisé et l'apprentissage non supervisé.

a. Apprentissage supervisé

Dans ce type d'apprentissage, on cherche à imposer au réseau un fonctionnement donné en forçant les sorties des réseaux à prendre des valeurs bien données. Après l'apprentissage, le réseau est testé en lui donnant seulement les valeurs d'entrée mais pas les sorties désirées, et en regardant si le résultat obtenu est proche du résultat désiré [Ibr-04].

b. Apprentissage non supervisé

Contrairement à l'apprentissage supervisé, seules les valeurs d'entrée sont disponibles dans ce type d'apprentissage non supervisé qui est appelé aussi "apprentissage par compétition". Dans ce cas, les exemples présentés à l'entrée provoquent une autoadaptation du réseau afin d'engendrer des valeurs de sortie qui soient proches en réponse à des valeurs d'entrée similaires.

III.3.3.1. Algorithme d'apprentissage

Pour chaque type de réseaux de neurones artificiels, il existe des méthodes ou des algorithmes d'apprentissage permettant une modification des poids et de biais. On retrouve plusieurs algorithmes d'apprentissage tels que l'algorithme du perceptron, la règle d'apprentissage de Hebb, la règle d'apprentissage de Widrow-Hoff (règle Delta) ainsi que des algorithmes généralisés de Widrow-Hoff pour les réseaux multicouches (rétropropagation du gradient de l'erreur...).

a. Algorithme de rétro-propagation du gradient de l'erreur

L'algorithme de rétropropagation procède à l'adaptation des poids neurone par neurone en commençant par la couche de sortie en calculant l'erreur à la sortie du réseau est de la transmise au sens inverse vers l'entrée. Plusieurs algorithmes sont utilisés pour l'adaptation des poids du réseau tels que la méthode de la descente du gradient (Delta), méthode de Newton et la méthode du gradient conjugué. Principalement, ces algorithmes adoptent une formulation itérative similaire [Hen-02]:

$$w(n+1) = w(n) + \Delta w(n) \quad (\text{III.13})$$

Où :

$\Delta w(n)$: est la correction effectuée sur le poids actuel $w(n)$.

Dans ce qui suit, nous intéresserons que à l'application de l'algorithme de la descente du gradient ($\Delta w = -\eta(dE/dw)$). L'application de cette règle sur un réseau MLP passe par deux phases: Pendant la première phase, l'entrée x sera propagée vers l'avant à travers le réseau pour calculer à la fin les valeurs de sortie y_s de chaque neurone de la sortie. Cette sortie calculée est comparée avec une valeur désirée d_o pour calculer l'erreur e_s . La deuxième phase comprend la rétro-

propagation de l'erreur en arrière à travers le réseau en passant par chaque neurone des couches cachées pour calculer les changements des poids de connexions [Kro-96].

a.1 Ajustement des poids

a.1.1 Cas de la couche de sortie

Soit l'erreur $e_j(n)$ calculée pour le neurone de sortie j et la donnée d'entraînement \mathbf{n} :

Où $d_j(n)$ correspond à la sortie désirée du neurone j et $y_j(n)$ à sa sortie calculée.

$$e_j(n) = d_j(n) - y_j(n) \quad (\text{III.14})$$

- La variable \mathbf{n} représente la donnée d'entraînement c'est-à-dire le couple contenant un vecteur d'entrées et un vecteur de sorties désirées.

- L'objectif de l'algorithme est d'adapter les poids des connexions du réseau de manière à minimiser la somme des erreurs sur tous les neurones de sortie.

- L'indice j représente le neurone pour lequel on veut adapter les poids.

Soit $E(n)$ la somme des erreurs quadratiques observées sur l'ensemble \mathbf{C} des neurones de sortie :

$$E(n) = \frac{1}{2} \sum_{j \in \mathbf{C}} e_j^2(n) \quad (\text{III.15})$$

La sortie $y_j(n)$ du neurone j est définie par :

$$y_j(n) = F(h_j) = F\left(\sum_{i=0}^r w_{ji}(n) y_i(n)\right) \quad (\text{III.16})$$

Où F est la fonction d'activation du neurone, $h_j(n)$ est la somme pondérée des entrées du neurone j , $w_{ji}(n)$ est le poids de la connexion entre le neurone i de la couche précédente et le neurone j de la couche courante, et $y_i(n)$ est la sortie du neurone i . On suppose ici que la couche précédente contient r neurones numérotés de 1 à r , et que $w_{j0}(n)$ est le poids correspondant au biais $b_j(n)$ du neurone j . La figure (III.8) peut illustrer l'équation (III.16)

1. La correction des poids s'effectue par :

$$\Delta_p w_{ji}(n) = -\eta \frac{\partial E(n)}{\partial w_{ji}(n)} = \eta \delta_j(n) y_i(n) \quad (\text{III.17})$$

$$\delta_j(n) = F'(y_j(n)) \cdot [d_j(n) - y_j(n)] \quad (\text{III.18})$$

Avec $0 < \eta < 1$ représente le taux d'apprentissage.

-Si le neurone est à la sortie du réseau, alors δ_j^p est donnée par :

a.1.2. Cas de la couche de sortie

Considérons maintenant le cas des neurones sur la dernière couche cachée (le cas des autres couches est semblable).

-L'indice k servira à désigner un neurone sur la couche suivante

$$\Delta_p w_{ji}(n) = -\eta \frac{\partial E(n)}{\partial w_{ji}(n)} = \eta \delta_j(n) y_i(n) \quad (\text{III.19})$$

Et :

$$\delta_j(n) = F'(y_j(n)) \cdot \sum_{k \in C} \delta_k(n) \cdot w_{kj}(n) \quad (\text{III.20})$$

a.2. Accélération de l'algorithme avec le momentum (Delta généralisée)

Pour accélérer la convergence de l'algorithme de rétropropagation; la règle de mise à jours des poids doit être écrite sous la forme suivante [Hen-02] :

$$w_{ji}(n+1) = w_{ji}(n) + \eta \delta_j(n) \cdot y_i(n) + \alpha \cdot \Delta w_{ji}(n) \quad (\text{III.21})$$

Où $0 \leq \alpha \leq 1$ est un paramètre nommé momentum.

a.3. Résumé de l'algorithme de rétro-propagation

L'algorithme de rétro-propagation standard se résume donc à la série des étapes suivante [Hen-02, Kro-96]:

1. Présenter un vecteur d'entrée $x_p = (x_{p,0,1}, x_{p,0,2}, \dots, x_{p,0,n})^t$ aux nœuds d'entrées puis initialiser les poids du réseau [Cir-02, Hen-02]:

2. Pour chaque donnée d'entraînement n :

(a) calculer les sorties en propageant les entrées vers l'avant ;

(b) Ajuster les poids en rétropropageant l'erreur calculée :

$$w_{ji}(n+1) = w_{ji}(n) + \Delta w_{ji}(n) = w_{ji}(n) + \eta \delta_j(n) y_i(n)$$

Et δ_j de la couche de sortie et les couches cachées en utilisant (III.18) et (III.20) respectivement.

$y_i(n)$ Représente soit la sortie du neurone i sur la couche précédente, si celui-ci existe, soit l'entrée i autrement.

3. Répéter la deuxième étape jusqu'à un nombre maximum d'itérations ou jusqu'à ce que la racine de l'erreur quadratique moyenne (EQM) soit inférieure à un certain seuil.

III.4. Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons présenté les bases nécessaires à la compréhension des méthodes d'intelligence artificielle à base de logique floue, de réseaux de neurones. Le vocabulaire utilisé par les communautés qui étudient et développent ces méthodes est assez vaste et non encore

uniformisé. Il nous a donc semblé nécessaire de préciser celui utilisé dans ce chapitre afin de permettre une lecture claire et sans ambiguïté du chapitre suivant.

Dans ce chapitre, nous avons présenté les concepts de la LF, une description générale des constituants d'un système flou. La LF sert à représenter des connaissances incertaines et imprécises. Nous avons présenté dans ce chapitre les concepts de base de SIF, le concept de variable linguistique et le système d'inférence floues. Nous avons constaté que les SIF peuvent en effet raisonner avec l'information imprécise, et expliquer leurs décisions mais ne peuvent pas automatiquement acquérir les règles d'inférences qu'ils utilisent pour prendre ces décisions. Ce qui nous a permis de dire que la LF nécessite l'aide d'un expert qui devient très précieuse lors de la conception d'un système flou. Avec un bon choix des différents paramètres de conception d'un SIF, ce dernier peut aider dans différents types d'étude, comme dans notre cas d'étude.

Dans ce chapitre, nous avons aussi introduit les définitions essentielles relatives aux réseaux de neurones artificiels. Nous avons notamment distingué entre les architectures des réseaux de neurones artificiels. Parmi les architectures existées, nous nous sommes limités dans ce chapitre à bien décrire les réseaux de neurones de type PMC des réseaux directs en expliquant leur fonctionnement et l'une des techniques d'apprentissage utilisées pour leur entraînement. Ce type de réseaux s'adapte alors de manière dynamique et peut être utilisé aussi dans différentes applications et études, également pour les études de prédiction comme dans le cas de notre étude.

Dans le prochain chapitre, les deux techniques de l'intelligence artificielle à base de la logique floue et réseaux de neurones seront utilisées comme techniques de prédiction des étapes de la décharge électrique dans un système pointe-plan.

**CHAPITRE IV : PREDICTION DES ETAPES DE LA DECHARGE
ELECTRIQUE DANS L'AIR EN UTILISANT
L'INTELLIGENCE ARTIFICIELLE**

IV.1. Introduction

L'utilisation d'un modèle mathématique peut fournir une assistance dans la compréhension physique des mécanismes de décharge dans l'air [Fof-03, Roy-84, Kuf-84]. La plupart des modèles mathématiques proposés décrivant les processus physiques du développement de la décharge électrique dans les intervalles d'air; sont limités, et ne peuvent pas prédire le comportement d'un intervalle pour n'apporte qu'elle condition électro- géométrique [Mok-01]. La modélisation de la décharge électrique exige une approche globale des corrélations entre l'ensemble des facteurs et paramètres, qui influent sur le développement de la décharge électrique. Ce qui rend aussi, la prédiction des étapes de l'avancement d'une décharge électrique difficile à aborder par des méthodes traditionnelles de modélisation [Bou-11, Rez-07, Kan-07].

La difficulté d'obtenir un modèle mathématique complet pour étudier l'évolution des décharges électriques dans le domaine de la haute tension a poussé plusieurs chercheurs à introduire différentes analyses et méthodes pour étudier tel sujet. Dans ce qui suit nous ferons appel aux deux techniques de l'intelligence artificielle (LF et RNA) pour prédire les étapes de la décharge électrique dans un système pointe-positive-plan. Durant ce chapitre nous présenterons la méthodologie suivie pour utiliser ces deux techniques d'intelligence artificielle pour la prédiction des étapes (phases) d'une décharge positive dans un intervalle d'air pointe-plan dans les conditions normales de pression et température et avec différentes configurations électro-géométriques.

IV.2. Prédiction des étapes de la décharge électrique en utilisant des techniques de l'intelligence artificielle

La modélisation de la progression de la décharge a de tout temps fasciné les chercheurs [Bou-07, Fof-03, fof-92]. L'amélioration des résultats de ces modèles est un objectif fondamental. Cette amélioration nécessite l'examen des différentes hypothèses simplificatrices émises et d'introduire les différents paramètres physiques et géométriques qui influent sur le développement de la décharge électrique. Par ailleurs, la prise en compte de tous les phénomènes ne nous est pas toujours utile et rend les temps de simulation très importants [Rez-07, Bou-07]. Notre travail présenté durant ce chapitre rentre dans le cadre de l'amélioration des méthodes de l'étude des décharges électriques dans un intervalle d'air pointe-plan, en particulier celles de prédiction des étapes d'avancement de ces dernières en utilisant l'intelligence artificielle (IA). L'introduction de l'IA dans l'étude des décharges électriques peut fournir une simplicité dans la prédiction de leurs étapes d'avancement durant leur développement de la pointe vers le plan (cas d'une décharge pointe positive-plan) en minimisant le temps de calcul et en améliorant les

résultats obtenus. Parmi les techniques d'intelligences artificielles, nous s'intéresserons aux techniques basées sur la logique floue (LF) et sur les réseaux de neurones artificiels (RNA). Dans cette optique, nous appliquerons des approches de prédiction élaborées dans l'environnement MATLAB permettant d'obtenir des résultats de simulation, proches de ceux de l'expérimentation collectées de la littérature pour différentes géométries pointe-plan étudiés.

Dans le chapitre (II), nous avons proposé une méthode de prédiction basée sur le calcul de l'intégrale "I" qui définit le critère d'apparition des streamers. Les valeurs de cette intégrale peuvent donner une information sur l'état de l'intervalle pointe positive-plan comme expliqué durant ce même chapitre. Alors, l'utilisation des deux techniques de l'intelligence artificielle proposées pour calculer la valeur de l'intégrale "I" pour différentes géométries d'intervalles d'air peut aider à déduire le comportement électrique de l'intervalle. Chaque valeur de cette intégrale peut indiquer une étape de la décharge, ceci peut être codé par un système basé sur les deux techniques d'intelligence artificielle proposées pour la prédiction de l'avancement de la décharge électrique. Pour atteindre cet objectif, notre étude s'effectuera suivant les étapes suivantes :

1. La première sert à introduire un système d'inférence floue (SIF) pour prédire les étapes de la décharge électrique dans l'intervalle d'air à étudier par le calcul de l'intégrale "I" pour différentes géométries et de faire correspondre à chaque valeur de cette intégrale calculée l'étape de la décharge électrique déclenchée pour l'application d'une tension "V" pour une géométrie d'électrodes définie par la distance inter-électrodes (d) et du rayon de la courbure de la pointe (R). Les étapes de l'implémentation de cette technique seront détaillées durant ce chapitre.
2. La deuxième sert à utiliser les réseaux de neurones artificiels pour arriver à calculer l'intégrale "I". La méthodologie utilisée pour déterminer les paramètres du RNA utilisé et son utilisation pour le calcul de l'intégrale "I" seront aussi expliqués durant ce chapitre.
3. Dans une dernière étape, les résultats de simulation obtenus par les deux techniques d'intelligence artificielle et avec le modèle mathématique proposé dans le chapitre (II) seront tous comparés avec des données expérimentales collectées de la littérature afin de bien juger l'efficacité de chaque méthode.

IV.2.1. Prédiction des étapes de la décharge par la logique floue

Dans cette partie, nous utiliserons la logique floue pour déterminer la valeur de l'intégrale 'I' pour les trois paramètres (V , d , R). Sachant que : "V" est la tension positive appliquée à la pointe (paramètre électrique), "d" est la distance inter-électrodes et "R" est le rayon de la courbure de la pointe. Les différentes valeurs de cette intégrale peuvent indiquer l'étape de la décharge électrique correspondante aux paramètres (V , d , R) comme expliqué précédemment. 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 des étapes de la décharge électrique durant son développement est d'insérer l'observation et l'analyse des différents paramètres de l'intervalle pointe-plan (V , d , R), sans que cette observation ne soit exprimée mathématiquement ou/et de manière déterministe. Le concept flou proposé, est formé par un système d'inférence flou (SIF) illustré sur la figure (IV.1). 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 [God-99, Cla-09, Bou-11].

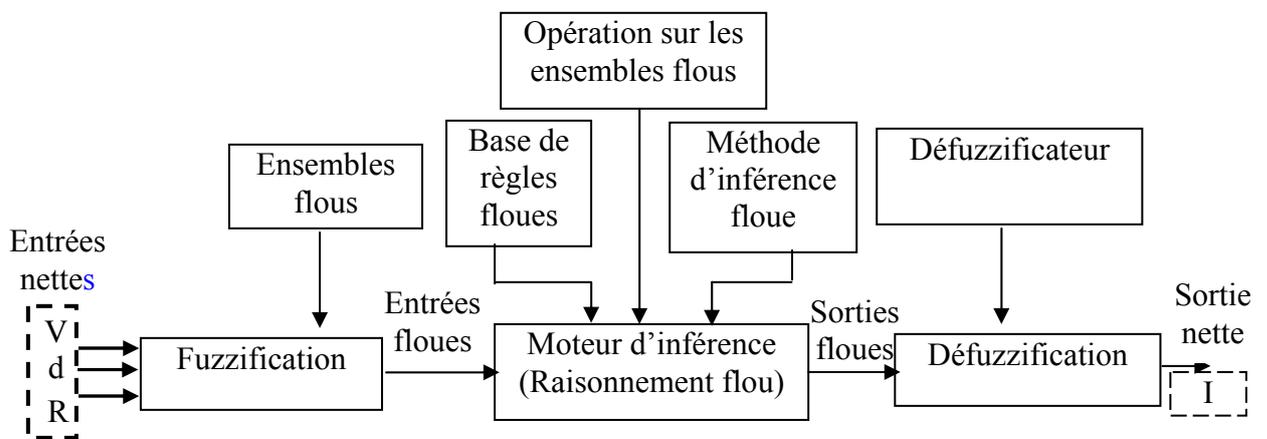


Figure IV.1. Architecture d'un système d'inférence floue(SIF)

Pour appliquer ce concept à l'étude du développement des décharges électriques; des entrées (paramètres électriques et géométriques du système pointe-plan) et une sortie (valeurs de l'intégrale I) seront d'abord définies sous forme de variables linguistiques comme indiqué sur le tableau (IV.2).

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

- 1. Les entrées et sorties du SIF:** Les entrées et sorties choisis pour notre étude sont données dans le tableau (IV.1).
- 2. Les caractéristiques floues (valeurs de vérité : ``petit, grand...''):** Ils sont mentionnés dans les tableaux (IV.2) et (IV.3).
- 3. Les univers de discours (intervalles de ces valeurs de vérité) des variables d'entrées et sortie:** Ils sont définis dans les deux tableaux (IV.2) et (IV.3).
- 4. Les fonctions d'appartenances des variables d'entrées et sortie:** Elles sont montrées dans les figures (IV.2-IV.5).

5. Les règles d'inférences floues: Elles sont organisées dans la table (IV.4).

Entrées		Sortie	
Symbole	Désignation	Symbole	Désignation
V	Tension appliquée	I	L'intégrale qui définit le critère d'apparition des streamers ($I = \int_0^{x_1} \bar{\alpha}.dx$)
d	Distance inter-électrodes		
R	Rayon de la courbure de la pointe		

Tableau IV.1. Variables d'entrées et sortie

IV.2.1.1. Fuzzification

Dans cette étape, nous attribuerons à chaque variable floue des degrés d'appartenance à différents états que l'on doit définir et cela a été effectué comme suit :

- L'analyse de quelques travaux expérimentaux et théoriques trouvés dans la littérature dans le domaine des décharges électriques dans des systèmes d'électrodes inhomogènes, nous a permis de construire une base de données expérimentale. L'examen de cette base de données en considérant les constatations citées dans [Nai-06] pour une décharge sphère-plan suivantes:

1. A petites distances, le champ est uniforme, et la tension de claquage dépend principalement de la distance.
2. A distances assez grandes, le champ n'est pas uniforme, et la tension de claquage dépend à la fois du diamètre de la sphère et de la distance.
3. A des grandes distances, le champ n'est pas uniforme, et le claquage est précédée par la couronne et n'est contrôlée que par la distance. La tension d'apparition de la couronne dépend essentiellement du diamètre de la sphère.

Nous a aidé à déduire la manière de l'évolution de la décharge électrique dans différentes géométries de l'intervalle inter-électrodes pour différentes tensions appliquées à la pointe. Ce qui nous a permis de proposer les univers de discours et intervalles flous pour chaque variable d'entrées et sortie. Le choix des univers de discours, des variables linguistiques et de la forme des fonctions d'appartenance reste le notre pour pouvoir répondre à l'ensemble des variations de la sortie en fonction de la variation des entrées. Ce choix peut changer pour améliorer les résultats.

- L'univers de discours de la sortie "I" a été choisi en considérant que chaque valeur de l'intégrale "I" peut représenter une étape de la décharge électrique comme déjà explique dans le

chapitre II, et que l'évolution de la décharge dans l'intervalle inter-électrodes peut être présenté par différentes valeurs de l'intégrale "I".

- Pour le choix de la fonction d'appartenance, nous avons choisi la fonction d'appartenance de forme trapézoïdale. Cette forme peut être convenable en premier lieu pour représenter les variables floues des entrées et de la sortie du SIF vu qu'elle présente une valeur stable de la variable sur un intervalle donné. Cette forme peut être changée pour améliorer les résultats obtenus.

a. Variables linguistiques et intervalles flous.

L'ensemble des variables floues des entrées et sorties et leurs univers de discours (intervalles flous) sont donnés dans les tableaux suivants :

Sortie	
Variable linguistique de la sortie et son univers de discours	
Intégrale I: [5 50]	
Terme linguistique	Signification et intervalle flou
AVA	Avalanche : [5 15]
STR	Streamer : [10 22]
CR	Couronne: [20 26]
ARC	Arc : [24 50]

Tableau IV.2. Décomposition de la variable de sortie en sous ensembles.

Les intervalles flous de chaque variable linguistique de la table précédente, sont choisis pour qu'ils englobent toutes les valeurs qui peuvent indiquer l'une des étapes de la décharge électrique comme expliqué dans le chapitre (II). Les valeurs de l'intégrale "I" inférieures à "5" signifient qu'aucune étape n'est atteinte.

Il est important de signaler que les termes linguistiques de la tension appliquée donnés dans la table précédente, ne désignent aucune norme notionnelle des types de haute tension. Nous les avons choisis pour présenter les distinctes valeurs des tensions appliquées au système d'électrodes étudiées.

Entrées					
Variables linguistiques des entrées et leurs univers de discours					
Tension appliquée V : [20 -850] kV		Distance inter-électrodes d: [10 -100] cm		Rayon de la courbure de la pointe R : [0,1- 50] cm	
Terme linguistique	Signification et intervalle flou	Terme linguistique	Signification et intervalle flou	Terme linguistique	Signification et intervalle flou
TPT	Très petites tensions [5- 70]	TPMD	Très petites distances [1- 20]	TPR	Très petits rayons [0,1- 4]
PT	Petites tensions [60- 200]	PMD	Petites distances [15- 40]	PR	Petits rayons [3 -10]
MT	moyennes tensions [180 -420]	MD	Moyennes distances [35- 60]	MR	Moyens rayons [8- 20]
HT	Hautes tensions [400- 600]	GMD	Grandes distances [55-80]	GR	Grands rayons [18- 30]
THT	très hautes tensions [580 -820]	TGD	Très grandes distances [75-100]	TGR	Très grands rayons [25-55]

Tableau IV.3. Décomposition des variables d'entrées

b. Fonctions d'appartenance

Les figures (IV.2-IV.5) montrent les formes des fonctions d'appartenance des entrées et sortie du SIF que nous utiliserons pour la prédiction des étapes de la décharge comme sera bien détaillé dans ce qui suit.

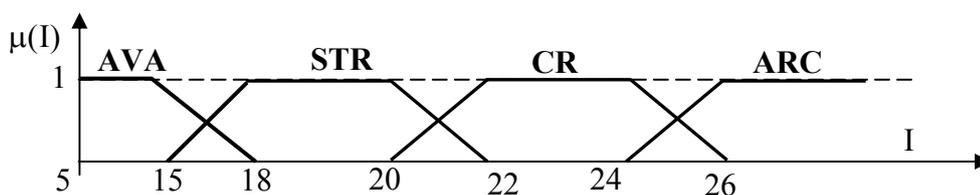


Figure IV.2. Fonction d'appartenance de la sortie (I)

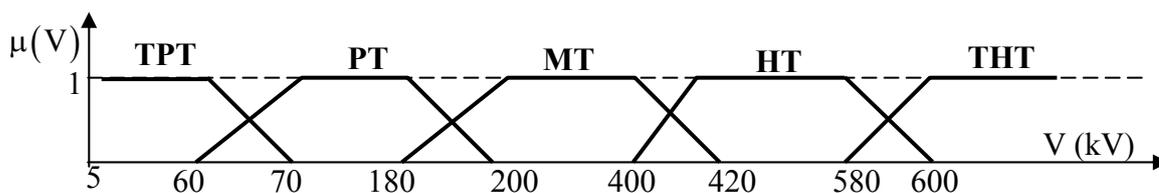


Figure IV.3. Fonction d'appartenance de la tension appliquée (V)

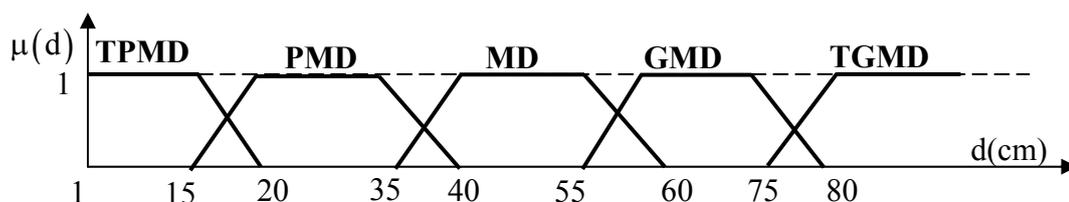


Figure IV.4. Fonction d'appartenance de la longueur de l'intervalle (d)

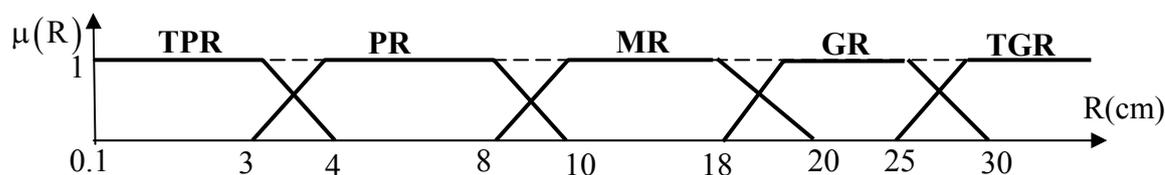


Figure IV.5. Fonction d'appartenance de la courbure de la pointe (R)

IV.2.1.2. 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 [Cir-02, God-99, Mec-13].

a. Méthodes d'extraction naturelle

Parmi les méthodes utilisées, nous citons :

a.1. Méthodes basées sur un savoir-faire d'un expert : Avec cette méthode, les règles sont établies par un expert ou un opérateur qualifié.

a.2 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.

b. 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. Parmi les méthodes utilisées, nous citons :

b.1. Méthodes basées sur l'approche neuronale : Cette approche est utilisée pour raffiner les règles du système flou en les traitant comme synapses. L'utilisateur fournit le premier jeu de règles, ensuite le RNA modifie chaque fois légèrement les fonctions d'appartenance pour minimiser l'erreur à la sortie.

IV.2.1.2.1. 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 [Cla-09, Bou-11]. 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 nous sommes basés sur différents travaux effectués par d'autres chercheurs 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 (IV.4)) sera utilisée. Cette matrice permet d'illustrer 125 ($5 \times 5 \times 5$) règles pour calculer la sortie "I" pour les différents triplets d'entrées (V, d, R).

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 (IV.4) contient les meilleures règles floues qui ont données meilleurs 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 V est HT et d est MD et R est TPR Alor I est CR
- Si V est THT et d est PD et R est PR alors I est ARC
- \vdots
- 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. Par contre si l'on choisi des valeurs numériques quelconques pour les entrées (V, d et R), le système d'inférence flou procède à l'agrégation des règles comme expliqué dans le chapitre (III) 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 "I" correspondant aux entrées V, d et R. Selon l'appartenance de la valeur de "I" calculée à l'un des intervalles flou de l'ensemble flou "I", nous pouvons désigner l'étape

de la décharge correspondante comme indiquée dans le tableau (IV.4) et donc de prédire l'étape de la décharge électrique déclenchée pour le triplet d'entées (V, d, R).

		V	TPT					PT					MT				HT				THT						
		d	TPD	PD	MD	GD	TGD	TPD	PD	MD	GD	TGD	TPD	PD	MD	GD	TGD	TPD	PD	MD	GD	TGD	TPD	PD	MD	GD	TGD
R	TPR	CR	CR	STR	STR	AVA	ARC																				
	PR	CR	STR	STR	AVA	AVA	ARC	ARC	ARC	CR	CR	ARC															
	MR	STR	STR	AVA	AVA	AVA	ARC	CR	CR	STR	STR	ARC															
	GR	AVA	AVA	AVA	AVA	AVA	CR	CR	STR	STR	AVA	ARC	ARC	CR	CR	STR	ARC	ARC	CR	STR	STR	ARC	ARC	ARC	ARC	CR	CR
	TGR	AVA	AVA	AVA	AVA	AVA	CR	STR	AVA	AVA	ARC	ARC	ARC	ARC	STR	STR	ARC	ARC	STR	STR	AVA	ARC	ARC	ARC	ARC	CR	STR

Tableau IV.4. Matrice d'inférence

IV.2.1.3. Mise en œuvre du système d'inférence floue

Dans notre étude, nous avons proposé de limiter le nombre d'entrées à trois seulement (V, d et R) et de les supposer comme seuls paramètres qui influent sur la progression de la décharge dans l'intervalle d'air, et de considérer que notre système fonctionne dans les conditions normales de pression et température et pour la même nature des matériaux conducteurs (ceux des électrodes) utilisés et même type de la tension appliquées (tension continu positive). Toute autre considération des paramètres qui influent sur le développement de la décharge auront une influence sur la conception du système flou en particulier sur la création de la matrice 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 des étapes de la décharge électrique dans une configuration pointe positive-plan. Une description détaillée de l'implémentation de notre système d'inférence flou (SIF) sera présentée dans ce qui suit.

IV.2.1.3.1. 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 [Jan-93]:

- 1) une base de règles pouvant contenir un certain nombre de règles floues (SI-ALORS);
- 2) une base de données qui définira les fonctions d'appartenance des entrées introduites;

- 3) une unité de prise de décision qui effectue l'opération d'inférence par les règles floues;
- 4) une interface de Fuzzification qui définit pour chaque entrée réelle son degré d'appartenance de sa fonction d'appartenance;
- 5) une interface de Défuzzification qui transforme les résultats flous en une sortie nette.

L'interface graphique d'inférence (Fuzzy Inférence System, ou FIS en abrégé) sous MATLAB permet d'implémenter notre "SIF" utilisé pour calculer l'intégrale "I" et donc de connaître l'étape de la décharge qui se déclenche en introduisant le triplet d'entrées (V, d, R). La figure (IV.6) 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 (Table IV.4) qui sont souvent regroupées pour former la base de connaissances.

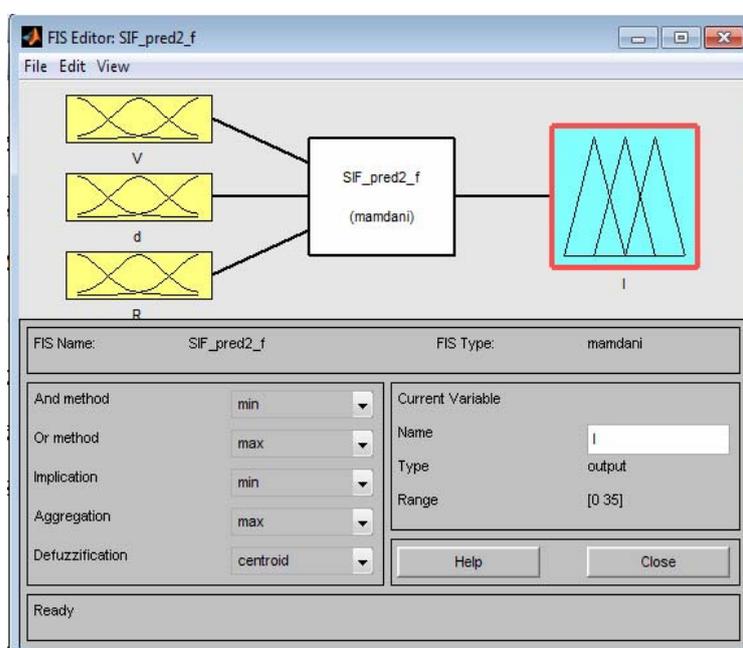


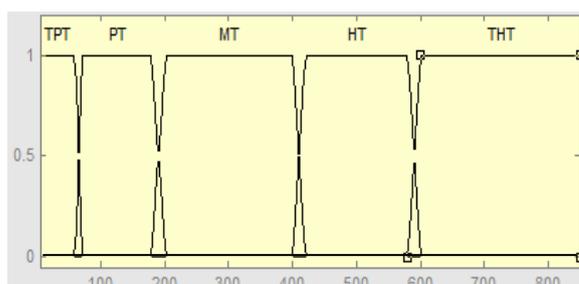
Figure IV.6. Fenêtre principale de l'éditeur du système d'inférence flou « Fis Editor » utilisé

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.

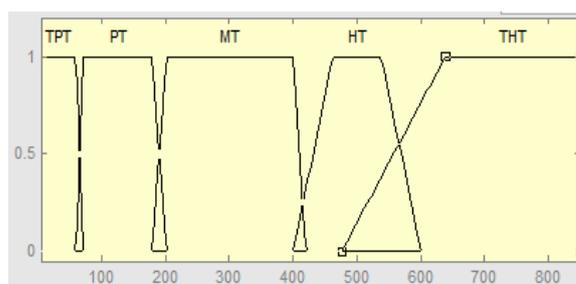
a. Fuzzification des variables d'entrées et de sortie

Les intervalles de variations de chaque variable floue sont donnés par les tableaux (IV.2) et (IV.3). Ces deux tableaux donnent 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 (V, d et R) et celle de la sortie (intégrale "I"). Il est à noter que les premiers résultats obtenus donnent un pourcentage de prédictions erronées supérieur à celui des prédictions correctes relativement aux résultats pratiques. Pour améliorer ces premiers résultats, nous avons effectué des ajustements des formes des fonctions d'appartenance comme suit : A chaque fois que nous avons changé la forme (allure) des fonctions d'appartenance 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 importants de ces fonctions et de garder leurs formes trapézoïdales déjà choisies. La figure (IV.7) 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.

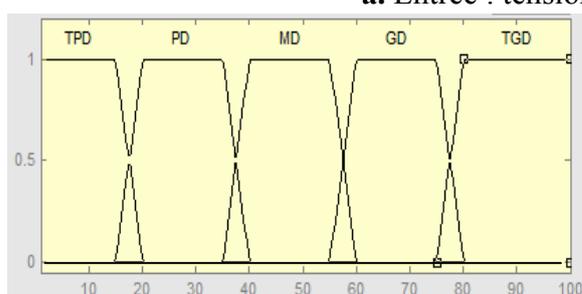


a.1. Avant ajustement

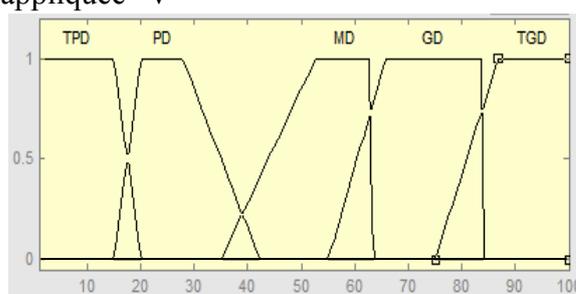


a.2. Après ajustement

a. Entrée : tension appliquée "V"

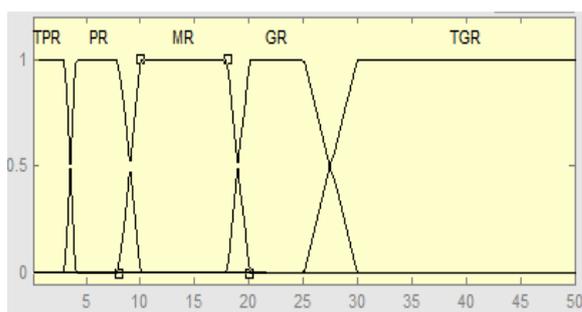


b.1. Avant ajustement

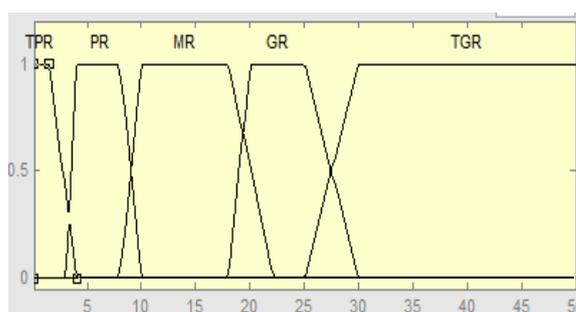


b.2. Après ajustement

b. Entrée : distance inter-électrodes "d"



c.1. Avant ajustement



c.2. Après ajustement

c. Entrée : rayon de la courbure de la pointe "R"

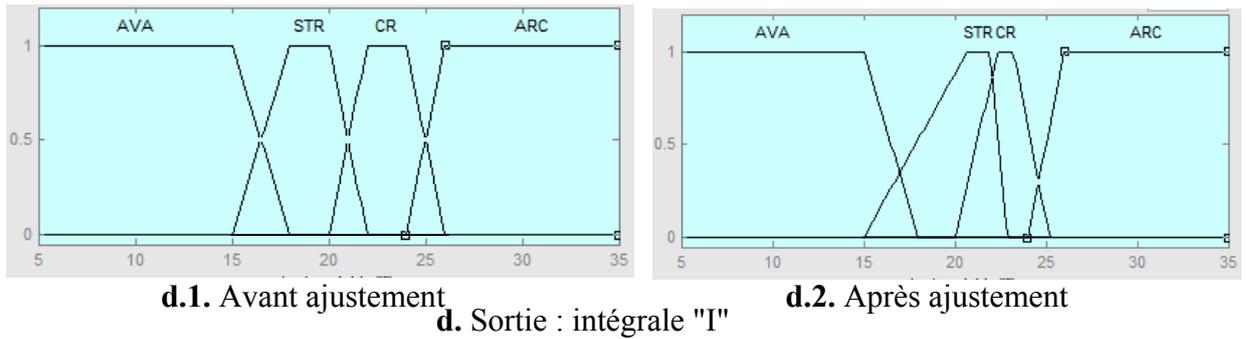


Figure IV.7. Ensembles flous des entrées et de la sortie du SIF utilisé introduits par l'éditeur de fonctions d'appartenances du l'interface graphique (FIS) avant et après ajustement

b. Règles d'inférence

. La figure (IV.8) montre la fenêtre utilisée pour introduire les règles floues utilisées dans notre SIF.

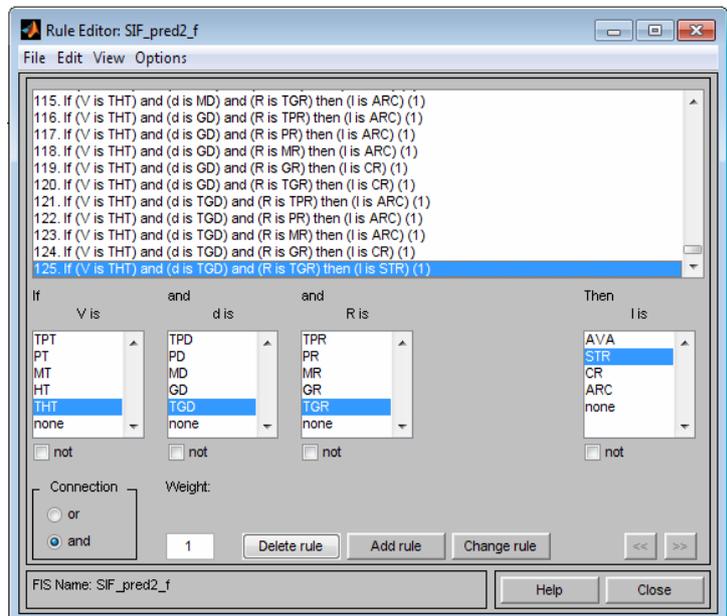


Figure IV.8. Fenêtre de l'éditeur de base de règles floues

La fuzzification des 3 variables d'entrée a donné 5 fonctions d'apparence pour chaque entrée, ce qui résulte au maximum 125 règles d'inférences ($5 \times 5 \times 5 = 125$) 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 125 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 la table (IV.4).

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.

IV.2.1.3.2. Tests et validation

La figure (IV.9) montre le résultat obtenu pour le triplet d'entrée (500, 60, 20), où : $V=500$ kV est la tension continue appliquée, $d = 60$ cm la distance inter- électrodes et $R = 20$ cm est le rayon de la courbure de la pointe.

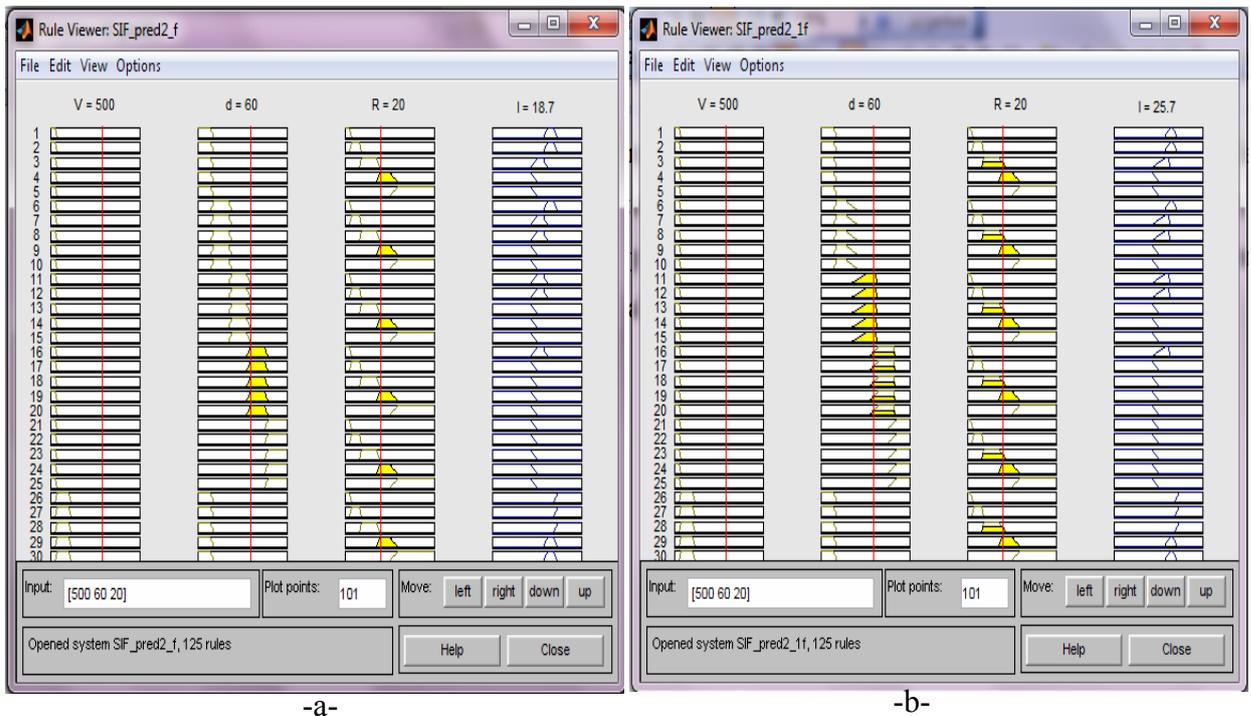


Figure IV.9. Fenêtre de visualisation des règles floues pour un exemple d'entrées ($V=500$ kV, $d=60$ cm et $R=20$ cm) avant et après l'adaptation des fonctions d'appartenance des variables

La fenêtre de visualisation des règles d'inférence donnée par la figure (IV.9) montre les étapes de l'évaluation des règles activées lors de l'application du vecteur d'entrée (500, 60, 20) selon la méthode max-min (*colorisation jaune*). Cette figure illustre aussi la variable de sortie floue obtenue pour le triplet d'entrées cité précédemment (*colorisation bleue*). La sortie réelle est calculée par la méthode de défuzzification de centre de gravité comme expliqué précédemment. Cette sortie donne la valeur de l'intégrale "I" en utilisant les formes des fonctions d'appartenances proposées avant et après ajustement.

Les deux valeurs de l'intégrale "I" données par les figures (IV.9-a-) et (IV.9-b-) montrent l'influence de l'ajustement des formes de fonctions d'appartenance sur la sortie.

Les résultats de prédiction obtenus par le SIF pour différentes valeurs (V, d et R) seront montrés vers la fin de ce chapitre (voir la table IV.9). Ces résultats seront comparés avec ceux pratiques collectés de la littérature et ceux obtenus par simulation, soit du modèle mathématique proposé dans le chapitre (II) ou soit par la technique de RNA qui sera expliqué dans ce qui suit.

IV.2.2. Prédiction des étapes de la décharge en utilisant les réseaux de neurones artificiels

Il n'y a pas de méthode systématique pour le choix de l'architecture du réseau, en particulier, le nombre de neurones, le nombre de couches ou le choix des paramètres internes de l'algorithme d'apprentissage. D'après les travaux publiés dans la littérature, nous avons remarqué que les réseaux de type perceptron multicouche (PMC) sont les plus utilisés dans les études de prédiction, d'où le choix de ce type de réseau. Nous utiliserons un apprentissage supervisé, par correction des erreurs où le signal d'erreur est rétro-propagé vers les entrées afin de mettre à jour les poids synaptiques.

IV.2.2.1. Conception du réseau de neurones

La mise en œuvre d'un RNA nécessite [Amm-07]:

- La détermination des entrées et des sorties pertinentes, c'est à dire les grandeurs qui ont une influence significative sur le phénomène que l'on cherche à modéliser.
- La collecte des données nécessaires à l'apprentissage et à l'évaluation des performances du réseau de neurones.
- La détermination du nombre de neurones cachés et couches cachées nécessaires pour obtenir une approximation satisfaisante.
- La réalisation de l'apprentissage
- L'évaluation des performances du réseau de neurones à l'issue de l'apprentissage.

a. Détermination des entrées/sorties du réseau de neurones

La tension appliquée (V), la distance inter-électrodes(d) et le rayon de la courbure de la pointe (R) seront considérés comme entrées du RNA.

- Les valeurs de l'intégrale "I" seront considérées comme seule sortie de notre RNA. La méthodologie suivie pour les déterminer est la suivante :

En se référant à la base de données pratique collectée de la littérature, nous avons fait correspondre à chaque étape atteinte de la décharge, pour chaque triplet (V, d, R), une valeur de l'intégrale "I" désirée de l'intervalle des valeurs données dans le tableau (II.1) (chapitre (II))

b. Elaboration de la structure du réseau

Après le choix du RNA à RP, il faudra aussi bien choisir le nombre de couches cachées que le nombre de neurones dans cette couche.

b.1. Nombre de couches cachées : Le choix du nombre de couches cachées dépend généralement de la complexité du problème à résoudre, en théorie une seule couche cachée peut être suffisante pour résoudre un problème donné mais il se peut que le fait de disposer de plusieurs couches cachées permet de résoudre plus facilement un problème complexe malgré qu'il a été démontré qu'un Perceptron Multicouches avec une seule couche cachée pourvue d'un nombre suffisant de neurones, peut approximer n'importe quelle fonction avec la précision souhaitée [Amm-07].

b.2. Nombre de neurones: Un nombre plus important permet donc de mieux "coller" aux données présentées mais diminue la capacité de généralisation du réseau. Il faut alors trouver le nombre adéquat de neurones cachés nécessaire pour obtenir une approximation satisfaisante. Il n'existe pas, à ce jour, de règle permettant de prévoir le nombre de neurones cachés nécessaires pour obtenir une performance spécifique du modèle, compte tenu des modèles disponibles [Amm-07].

Nous expliquerons dans ce qui suit notre méthodologie pour déterminer le nombre de couche cachées et nombre de neurones dans chaque couche cachée.

c. Apprentissage

Le type d'apprentissage est déterminé par la manière dont les paramètres du réseau sont adaptés, d'où l'existence de plusieurs algorithmes d'apprentissage.

L'algorithme d'apprentissage utilisé dans notre étude sera donné dans ce qui suit.

d. Validation et Tests

Il est nécessaire de disposer de deux bases de données, une pour effectuer l'entraînement de notre RNA pour vérifier les performances du RNA [Amm-07]. La base de données que nous avons utilisée est collectée de la littérature.

IV.2.2.2. Implémentation et simulation

La simulation du notre RNA est effectuée en utilisant l'interface graphique « Neural Network Tool (nntool) » disponible sur Matlab.

Afin de déterminer les meilleurs paramètres du réseau qui donnent une prédiction satisfaisante des étapes de la décharge électrique dans différents systèmes pointes positives -plans, nous ferons une série de tests qui seront présentés à la section IV.2.2.3. (a.1.1.1)

a. Choix de l'algorithme de l'apprentissage

Ces paramètres sont également importants et permettent d'affiner la configuration du réseau de neurones pour obtenir les meilleures prédictions [Gue-04]. L'algorithme le plus utilisé pour l'apprentissage des réseaux MLP porte le nom de rétropropagation du gradient de l'erreur. Cet algorithme se résume donc, par les étapes suivantes:

1. Diviser la base de données de l'entraînement du RNA en trois parties (données d'apprentissage, données de validation et données de test).
2. Initialiser tous les poids et biais.
3. Pour chaque donnée d'apprentissage n :
 - a) Calculer les sorties observées en propageant les entrées vers l'avant.
 - b) Calculer l'erreur entre les valeurs désirées et celles calculées par le réseau, ensuite l'erreur est propagé vers les neurones de la couche cachée pour calculer le gradient des poids et les biais.
 - c) Ajuster les poids et les biais en rétro propageant le gradient de l'erreur depuis la dernière couche vers la première couche (voir chapitre (III))
4. Présenter un autre vecteur des poids et des biais du réseau et d'aller à l'étape 3-a
5. Arrêt de l'apprentissage selon les critères suivants :
 - a. La tolérance sur l'erreur est atteinte.
 - b. L'erreur sur les données de validation commence à augmenter (sur-apprentissage ou oubli).
 - c. Nombre d'itération (époques) atteint.

a.1. Méthodes d'apprentissage

L'utilitaire `nnTool` sous MATLAB contient plusieurs variantes de l'algorithme de rétropropagation du gradient de l'erreur, la variante la plus intéressante étant l'algorithme de Levenberg-Marquardt communément appelé « *faster propagation* » [Bra-09]. Cet algorithme sera utilisé dans notre application RNA. Cet algorithme appartient aux algorithmes d'apprentissage par paquets (hors-ligne, off-line, batch mode) où les poids sont modifiés après le passage de tous les exemples. Il est dénommé dans MATLAB par `Trainlm` (apprentissage par l'algorithme Levenberg- Marquardt).

a.1.1. Algorithme de Levenberg-Marquardt

La règle de correction des poids est la suivante [Bra-09] :

$$\Delta W = -\left(J^T J + \mu I\right)^{-1} J^T e \quad (\text{IV.1})$$

ΔW : est le taux d'adaptation de la matrice des poids du réseau.

J : La matrice jacobienne des dérivées de l'erreur

μ : est un coefficient adaptatif.

e : le vecteur d'erreur.

Remarque : Lorsque ' μ ' est grand, l'algorithme se rapproche de la méthode de descente du gradient. Par contre, si ' μ ' est petit l'algorithme se rapproche de la méthode de Gauss-Newton.

L'algorithme de Levenberg-Marquardt se présente comme suit:

- 1- Présentation du vecteur d'entrée en propageant celui-ci jusqu'à la sortie et calcul de l'erreur quadratique,
- 2- Calcul de la matrice jacobienne,
- 3- Calcul de ΔW pour corriger les poids du réseau,
- 4- Calcul des nouveaux poids et ajustement du paramètre μ
- 5- Vérification de la convergence vers l'erreur demandée.

a.1.1.1. Fonction d'apprentissage optimale

L'interface graphique nous dispose deux fonctions d'apprentissage optimales basées sur l'algorithme de descente de gradient dénommées dans Matlab comme suit [Sin-13]:

Learngd (Gradient descent weight/bias learning function): l'algorithme d'apprentissage de descente de gradient avec pas d'apprentissage fixe.

Learngdm (Gradient descent with momentum weight/bias learning function): l'algorithme d'apprentissage de la descente de gradient avec pas d'apprentissage et momentum fixes (version de learngd avec moment).

Ces deux algorithmes appartiennent aux algorithmes d'apprentissage incrémental (les poids sont modifiés après chaque représentation d'une entrée).

Nous utiliserons la fonction Learngdm pour un apprentissage optimale de notre RNA.

b. Choix de la fonction de transfert

Il est important pour les réseaux multicouches d'avoir des fonctions d'activation non linéaires pour l'étape d'apprentissage car l'algorithme de rétropropagation du gradient de l'erreur nécessite des fonctions d'activation non linéarité dérivables, pour cela nous utiliserons l'une de ces fonctions disposée dans MATLAB.

L'interface graphique dispose de trois fonctions d'activation dénommées dans Matlab comme suit:

Tansig : Fonction de transfert tangent sigmoïd hyperbolique qui est une fonction non-linéaire et évolue entre moins un (-1) et plus un (1).

Logsig : Fonction de transfert sigmoïde qui est une fonction non-linéaire et évolue entre 0 et 1.

Purelin : fonction de transfert linéaire. Le résultat en sortie de cette fonction est le même que celui présenté à l'entrée de la fonction.

Puisque la fonction purelin est une fonction linéaire qui génère des sorties pouvant prendre n'importe quelle valeur, c'est pour cette raison nous avons l'a choisie comme fonction d'activation des neurones de la couche de sortie de notre RNA afin de calculer toutes les valeurs de la sortie 'I'. Nous utiliserons la fonction de transfert nonlinéaire sigmoïde pour les couches cachées puisque sa dérivée existe et elle est simple à mettre en œuvre.

c. Fonction de performance

Lors de l'étape d'entraînement du réseau, une fonction de performance doit être employée afin de pouvoir déterminer la meilleure combinaison possible des paramètres ajustables qui réduisent au minimum l'erreur entre les résultats produit (calculés) et les valeurs à atteindre (désirés) correspondantes dans l'ensemble de apprentissage. Nntool nous offre la possibilité d'utiliser les fonctions de performance suivantes:

1. Erreur quadratique moyenne MSE (Mean Squared Error),
2. Méthode hybride MSEREG (Version de MSE avec modérations des poids)
3. Somme des carrés des erreurs SSE (Sum of Squared Errors).

Dans notre travail, nous utiliserons la méthode MSE pour l'évaluation de l'erreur à la sortie du RNA.

c.1. Erreur quadratique moyenne MSE (Mean Squared Error)

Si on désigne par $e_k(n)$ l'erreur d'apprentissage associée à un neurone j , alors que la valeur instantanée de l'erreur quadratique est définie par $\frac{1}{2} e_k^2$. De même, la valeur de la somme quadratique instantanée de l'erreur, désignée par $\xi(n)$, est définie par[Tho-08]:

$$\xi(n) = \frac{1}{2} \sum_{j=1}^L e_k^2(n) \quad (IV.2)$$

Elle est obtenue en additionnant les termes $\frac{1}{2} e_k^2$ correspondant à tous les neurones de la couche de sortie.

L'expression de la moyenne de la somme de l'erreur quadratique est donnée par :

$$MSE(n) = \frac{1}{N} \sum_{n=1}^N \xi(n) \quad (IV.3)$$

Avec N le nombre d'exemples constituant la base d'apprentissage.

La valeur MSE est calculée après chaque itération (présentation des exemples d'apprentissage au réseau).

IV.2.2.3. Application du RNA dans la prédiction des étapes de la décharge électrique

L'utilisation de notre système de RNA consiste en plusieurs étapes qui peuvent être résumées comme suit :

a. Modèle de réseau de neurone

Un réseau de type propagation vers l'avant « FEED-FORWARD » est choisi. Les paramètres utilisés dans le modèle RNA sont montrés dans le tableau (IV.5).

Paramètres de la structure et de l'apprentissage	
Nombre d'entrées	3 (vecteur de 3×484) exemples
Nombre de sortie	1 (vecteur de 1×484) exemples
Algorithme d'apprentissage	Fonction d'apprentissage Levenberg-Marquardt (TRAINLM)
Fonction d'ajustement des poids et seuils	LEARNGDM pour l'ajustement des poids par la descente du gradient avec momentum avec un pas d'apprentissage et un momentum fixes.
Fonction de performance	Erreur quadratique moyenne (MSE)
Fonctions de transfert	Fonction de transfert sigmoïde (LOGSIG) pour les couches cachées. Fonction de transfert linéaire (PURELIN) pour la couche de sortie.

Tableau IV.5. Paramètres du réseau de neurones artificiel utilisé.

Il est à noter, que nous disposons de deux bases de données différentes collectées de la littérature, l'une est utilisée pour l'apprentissage du RNA, qui est constituée de (484) triplets d'entrées (V, d, R) et (484) sorties correspondantes (valeurs "I" choisies) et l'autre formée de 45 triplets de (V, d, R) utilisée pour tester le RNA pour la prédiction des étapes de la décharge (voir le tableau IV.9).

a.1. Création du RNA en utilisant l'interface graphique de l'utilitaire NNtool

La figure (IV.10) présente la structure du RNA (RP) dans le cas d'utilisation d'une seule couche cachée et 3 neurones par couche pour chercher le meilleur nombre de couches cachées et neurones par couche. L'organigramme présenté par la figure (IV.12) présente la démarche pour déterminer le nombre de couches cachées et le nombre de neurones par couche. La figure (IV.11) donne l'interface nntool utilisé pour introduire les paramètres du RNA donnés par le tableau (IV.5).

Il est à noter que le nombre des neurones par couche et le nombre de couches cachées utilisés dans notre travail est celui obtenu après des tests expliqués dans ce qui suit.

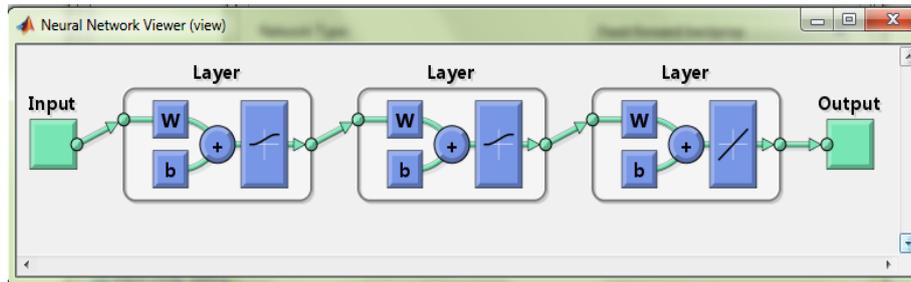


Figure IV.10. Structure de RNA dans le cas d'utilisation d'une seule couche cachée et 3 neurones par couche

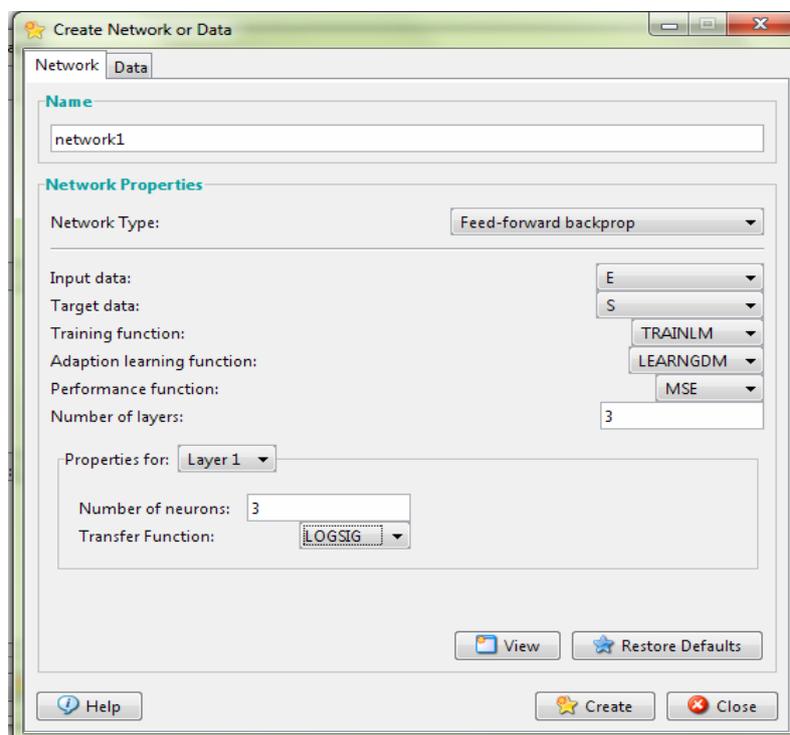


Figure IV.11. Paramètres du RNA (RP) dans le cas d'utilisation d'une seule couche cachée et 3 neurones par couche

a.1.1. Détermination du nombre de couche cachées et nombre de neurones par couche cachée et nombre d'itération

Afin de déterminer les meilleurs paramètres structurels du réseau qui donne la meilleure prédiction, nous avons fait une série de tests pour le nombre de neurones par couche variant entre 3 et 18 neurones et pour des couches cachées variant entre 1 à 5. Le choix du nombre de couches cachées et le nombre de neurones par couche sera effectué après l'analyse des performances du réseau. Nous conservons l'architecture, qui présente une erreur et un nombre de neurones minimums [Amm-07].

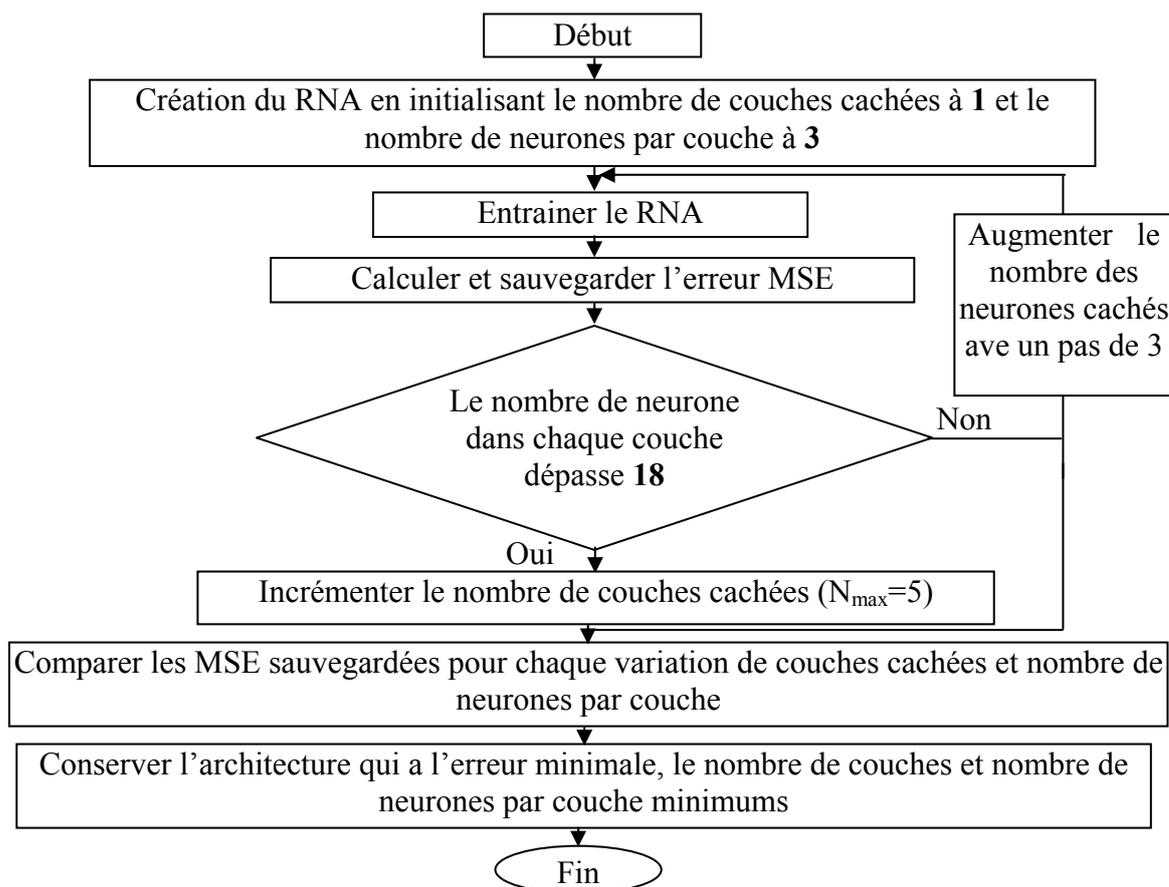


Figure IV.12. Procédure de la détermination du nombre de couches cachées et le nombre des neurones par couche

En effet, dans nos tests, nous avons fixé le nombre d'itération à 1000.

Les séries de tests réalisés pour mieux déterminer le nombre de neurones cachés et couches cachées sont indiquées dans le tableau IV.6.

Nombre de couches cachées	Nombre d'itérations utilisées	Intervalle du nombre de neurones cachés
1	1000	[3-18]
2	1000	[3-18]
3	1000	[3-18]
4	1000	[3-18]
5	1000	[3-18]

Tableau IV.6. Différents paramètres du RNA testés pour optimiser le nombre de couches cachées et neurones par couche.

a.1.1.1. Résultat du nombre des neurones cachés et des couches cachées

Nous avons choisi les paramètres de l'apprentissage de telle sorte que l'apprentissage s'arrête dans deux cas, soit le nombre d'itérations (epochs) est achevé, soit l'erreur (goal) est atteinte.

La figure (IV.13) donne la fenêtre d'apprentissage pour le premier test effectué (nombre d'itération =1000, nombre de couche cachée=1 et nombre de neurone par couche cachée =3). Après avoir procédé à l'apprentissage. L'ensemble de la base de données totale (entrées et sorties) sera déviée aléatoirement comme suit : (70%) pour l'apprentissage, (15%) pour tests et (15%) pour validation [Gok-14].

-La première, pour faire l'apprentissage.

-La deuxième, pour validation dans le but de vérifier la capacité de généralisation du réseau, et éviter par conséquent le sur-apprentissage du réseau.

-La dernière, de test et sert à évaluer les performances finales du réseau.

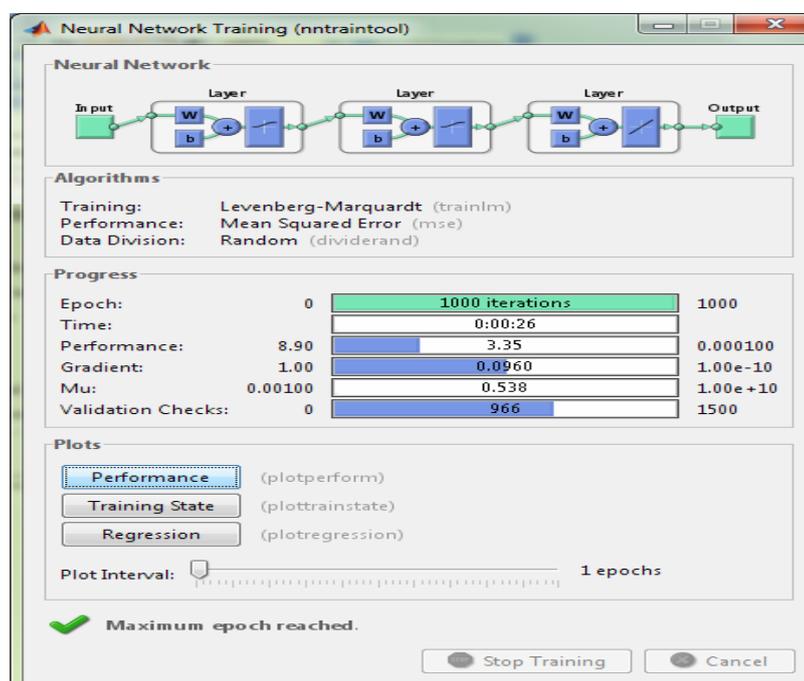


Figure IV.13. Fenêtre de l'apprentissage de l'outil **nntraintool** dans le cas d'utilisation d'une seule couche cachée et 3 neurones par couche

La figure précédente montre que, la condition d'arrêt de l'apprentissage est vérifiée et que le nombre maximum d'itération est atteint. La dernière valeur (MSE) obtenue après l'arrêt de l'apprentissage sera sauvegardée. Afin de bien choisir le nombre des couches cachées et nombre de neurones par couche cachée nous avons fait d'autres tests. Les résultats obtenus sont récapitulés dans le tableau suivant:

Nombre des itérations	Nombre de couche cachée	Nombre de neurones par couche	MSE
1000	1	3	3,352
		6	0.7
		9	0.0075
		12	0,0008
		15	0,0001
		18	0,0001
	2	3	2,1
		6	1,2
		9	0,005
		12	0,0001
		15	0,0001
		18	0,0001
	3	3	4,5
		6	0,005
		9	0,0001
		12	0,0001
		15	0,0001
		18	0,0001
	4	3	1,1
		6	0,5
		9	0,0001
		12	0,0001
		15	0,0001
		18	0,0001
5	3	6	
	6	0.05	
	9	0.0001	
	12	0.0001	
	15	0.0001	
	18	0.0001	

Tableau IV.7. Optimisation de la structure du RNA

La variation du nombre de neurones pour le cas d'une couche cachée montre que l'erreur diminue en augmentant le nombre de neurones cachés. L'erreur devient plus stable et constante à partir de 15 neurones cachés. Pour le cas de deux couches cachées nous remarquons une diminution significative de l'erreur et elle devienne plus constante à partir du 12^{ème} neurones. Pour le cas de trois couches, nous remarquons que l'erreur se stabilise à partir du 09^{ème} neurones. L'erreur dans les deux dernier cas, de quatre et cinq couches cachées est presque identique à celui de trois couches cachées où elle est constante à partir du 09^{ème} neurones.

En analysant ces résultats on peut dire qu'un nombre de 09 neurones cachés et un nombre de 3 couches cachées constituent pour notre étude des valeurs suffisantes pour l'entraînement du réseau de neurones.

a.2. Paramètres finaux du RNA utilisés

Après les tests pour la détermination du nombre des neurones cachés et du nombre des couches intermédiaires, les paramètres finaux du RNA utilisé sont donnés par le tableau suivant:

Paramètres	RNA
Type de réseau	Réseau à propagation vers l'avant
Nombre d'entrées	3 (vecteur de 3×484)
Nombre de sortie	1 (vecteur de 1×484)
Algorithme d'apprentissage	Levenberg-Marquardt
Fonction d'ajustement de poids et seuils	Descente du gradient avec momentum
Fonction de performance d'erreur	Erreur quadratique moyenne
Fonctions de transfert	Sigmoïde pour les couches cachées. Linéaire pour la couche de sortie.
Nombre de couches intermédiaires	3
Nombre de neurones par couches cachées	9

Tableau IV.8. Paramètres finaux de la structure et d'apprentissage du RNA

b. Performance du réseau

Il est usuel d'évaluer la performance sur des graphiques présentés dans la figure (IV.14) représentant la corrélation entre les valeurs prédites et les valeurs cibles désignées par les courbes de régression. Les ordonnées de chaque courbe de la figure (IV.14), représentent les sorties du réseau (valeurs de "I" calculées) pour les entrées réservées à l'apprentissage, aux entrées réservées à la validation et aux entrées réservées au test.

- Les droites tracées en continue de chaque courbe de la figure (IV.14) représentent la régression (fitting) de la relation qui relie les sorties calculées par RNA à celles désirées (valeurs de "I" choisies). Les droites tracées en pointillée représentent l'approximation (régression) de référence voulue (parfaite) (sorties désirées = sorties calculées) [Gok-14]. Lorsque ces deux droites se confondent presque, ou se confondent totalement, nous parlons alors, d'une meilleure performance.

- Les cercles en noir représentent les valeurs de l'intégrale "I" désirées (cibles). Évidemment, plus le nuage de point est resserré autour de la droite de l'approximation parfaite, plus la performance sera meilleure [Gok-14].

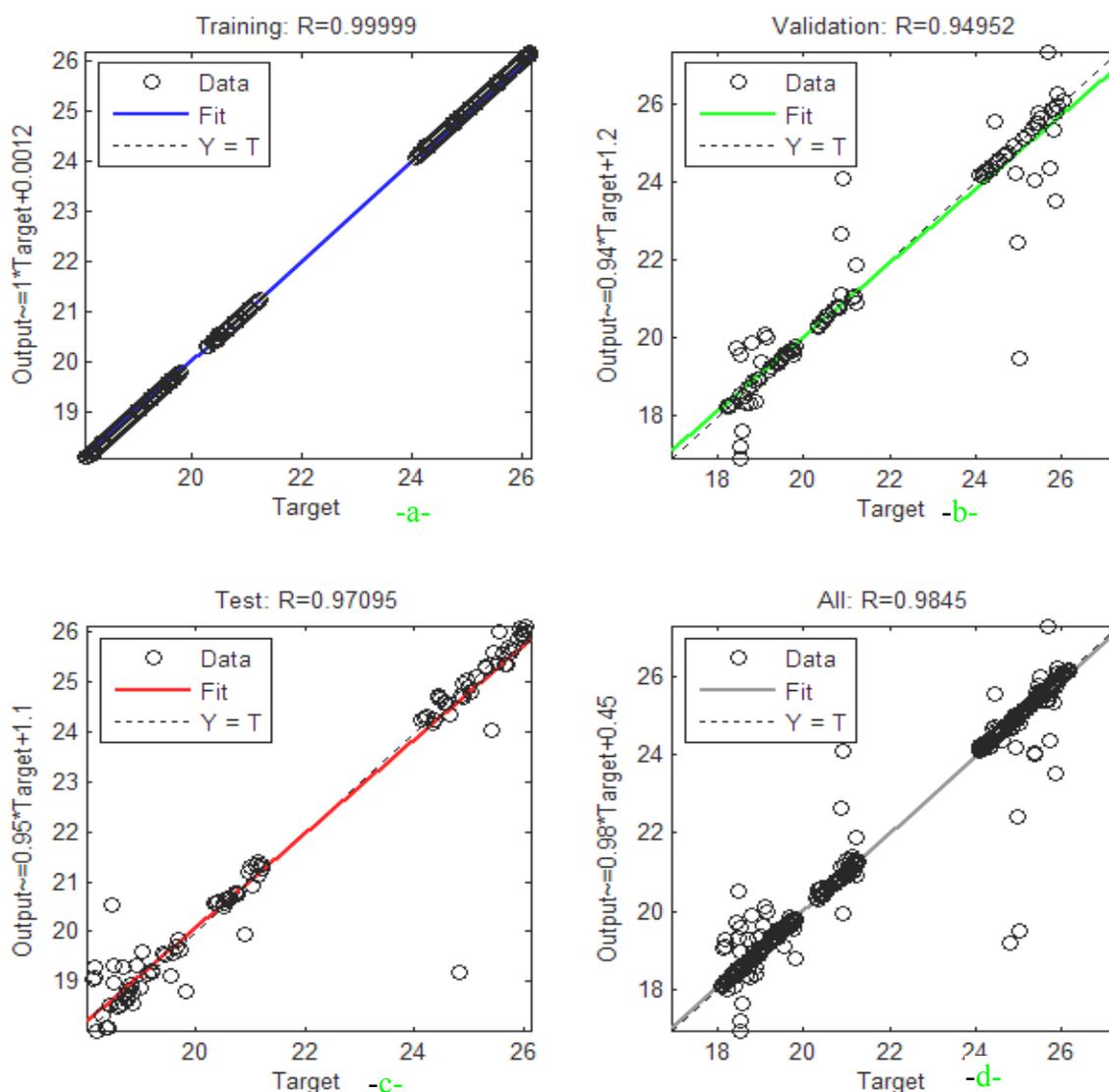


Figure IV.14. Courbes de régressions

La valeur de "R" représente le rapport entre les sorties du réseau calculées et les cibles. Si $R=1$, ceci implique que les sorties calculées (output) sont égales aux cibles (Target) [Gok-14]. Dans ce cas, les droites tracées en pointillé (régression parfaite) et en continue (régression calculée) se coïncident totalement et une performance parfaite est obtenue. Alors, nous pouvons dire, qu'un meilleur apprentissage donne des valeurs de R très proche de 1.

La figure (IV.14-a-) donne $R=0,99999$, cela veut dire que 99,999% des valeurs de "I" calculées à la sortie du RNA sont les mêmes que celles désirées des données réservées pour l'apprentissage.

La figure (IV.14-b-) donne $R=0,94952$, ce qui implique que 94,952% des valeurs de "I" calculées sont les mêmes que celles désirées des données réservées pour la validation.

La figure (IV.14-c-) donne $R=0,97095$, ce qui indique que 97,095% de valeurs de "I" calculées sont les mêmes que celles désirées des données réservées pour le test.

La figure (IV.14-d-) donne $R=0,9845$. Cela signifie que 98,45% des valeurs désirées de "I" sont les mêmes que celles calculées de la base de données totale.

La figure précédente montre que les valeurs de "R" obtenues sont très voisines de "1", ce qui veut dire que notre RNA est bien entraîné, et que la tâche de l'apprentissage a réussi.

Il est à noter que ces valeurs sont obtenues après un certain nombre de relancement de l'apprentissage jusqu'à l'obtention des meilleurs valeurs de R (très proche de 1).

c. Résultats

Une fois le réseau de neurones est créé, des tests seront effectués afin de vérifier la qualité des prévisions du modèle neuronal en lui présentant des nouveaux exemples d'entrées (45 triplet de (V, d, R)) qui ne font pas partie de l'ensemble d'apprentissage collectés de la littérature pour qu'il calcul les sorties correspondantes. Pour cela, nous utiliserons la fonction simulation définit comme suit : $I = \text{sim}(\text{network1}, [V \text{ d } R])$.

I : la sortie "I" calculée par le réseau nommé "network1".

L'ensemble des résultats de prédiction des étapes de la décharge par RNA est donné dans le tableau (IV.9). Ce tableau contient les résultats de prédiction des étapes de l'avancement de la décharge en utilisant RNA pour différentes configurations pointes-plan et pour différentes tensions appliquées. Ces résultats sont comparés avec ceux obtenus par LF et par le modèle mathématique proposé dans le chapitre (II). Les résultats collectés de la littérature seront aussi mentionnés dans ce même tableau pour les mettre comme références pour juger les performances des méthodes de simulation utilisées durant ce travail.

Il est à noter que l'étape de déclenchement des avalanches n'est pas mentionnée dans le tableau de résultats, à cause de manque des données expérimentales (d'après notre recherche bibliographique). Mais comme déjà détaillé dans le chapitre (II), toute valeurs calculée de l'intégrale "I" et qui appartient à l'intervalle $5 < I < 18$ peut indiquer la forte probabilité de déclenchement des avalanches électronique dans l'espace inter-électrodes.

Références	Paramètres de l'intervalle d'air			Résultats pratique collectés de la littérature	Prédictions par LF						Prédictions par RNA			Prédictions par modèle mathématique proposé		
	V (kV)	d (cm)	R (cm)		Avant ajustement des formes des fonctions d'appartenances			Après ajustement des formes des fonctions d'appartenances			Valeur de "I"	phénomène	Evaluation	Valeur de "I"	phénomène	Evaluation
					Valeur de I	phénomène	Evaluation	Valeur de I	phénomène	Evaluation						
[Nai-06]	810	50	50	CL	30,1	CL	✓	30	CL	✓	24,1	CL	✓	88,4	CL	✓
[Nai-06]	780	60	40	CL	23	C	x	28,9	CL	✓	24,27	CL	✓	60,4	CL	✓
[Nai-06]	710	70	30	CL	23	C	x	22,7	C	x	24,2	CL	✓	33,3	CL	✓
[Nai-06]	600	80	20	CL	23	C	x	27,6	CL	✓	24,69	CL	✓	17	---	x
[Nai-06]	450	90	10	CL	30,1	CL	✓	30	CL	✓	24,66	CL	✓	10	---	x
[Nai-06]	460	95	5	CL	30,1	CL	✓	30,1	CL	✓	24,59	CL	✓	11	---	x
[Nai-06]	500	30	50	CL	30,1	CL	✓	30	CL	✓	24,6	CL	✓	62	CL	✓
[Nai-06]	690	40	40	CL	30,1	CL	✓	29,7	CL	✓	24,56	CL	✓	61,2	CL	✓
[Nai-06]	610	50	30	CL	30,1	CL	✓	30	CL	✓	24,7	CL	✓	41,8	CL	✓
[Nai-06]	500	60	20	CL	18,7	STR	x	25,5	CL	✓	24,72	CL	✓	15	---	x
[Nai-06]	390	70	10	CL	30,1	CL	✓	30,1	CL	✓	25,03	CL	✓	9	---	x

[Nai-06]	340	75	5	CL	30,1	CL	✓	30,1	CL	✓	25,01	CL	✓	8	---	x
[Nai-06]	330	10	50	CL	30,1	CL	✓	30,1	CL	✓	25,11	CL	✓	63,4	CL	✓
[Nai-06]	400	20	40	CL	30,1	CL	✓	30,1	CL	✓	25,24	CL	✓	58,4	CL	✓
[Nai-06]	500	30	30	CL	30,1	CL	✓	30	CL	✓	25,15	CL	✓	56	CL	✓
[Nai-06]	410	40	20	CL	23	C	x	27,7	CL	✓	25,3	CL	✓	20,5	---	x
[Nai-06]	350	50	10	CL	30,1	CL	✓	30	CL	✓	25,11	CL	✓	9,5	---	x
[Nai-06]	310	55	5	CL	30,1	CL	✓	30,1	CL	✓	25,21	CL	✓	8	---	x
[Nai-06]	170	5	35	CL	23	C	x	29,8	CL	✓	25,27	CL	✓	33,5	CL	✓
[Nai-06]	320	10	30	CL	30,1	CL	✓	30,1	CL	✓	22,68	C	x	58,5	CL	✓
[Nai-06]	355	20	20	CL	30,1	CL	✓	30,1	CL	✓	25,77	CL	✓	41	CL	✓
[Nai-06]	280	30	10	CL	30,1	CL	✓	30	CL	✓	25,87	CL	✓	10,6	---	x
[Nai-06]	170	35	5	CL	30,1	CL	✓	29,8	CL	✓	25,92	CL	✓	4	---	x
[Nai-06]	100	6,5	2,5	CL	30,1	CL	✓	29,9	CL	✓	25,99	CL	✓	8	---	x
[Sab-13]	5	0,5	0,425	C	23	C	✓	22,7	CL	✓	20,54	C	✓	0,35	---	x
[Sab-13]	8	1,5	0,425	C	23	C	✓	22,7	CL	✓	20,57	C	✓	0,2	---	x
[Sab-13]	10	2,5	0,425	C	23	C	✓	22,7	CL	✓	20,73	C	✓	0,21	---	x
[Nai-06]	150	9	5	C	30,1	CL	x	30,1	CL	x	20,56	C	✓	21	C	✓
[Nai-06]	320	40	19	C	27,8	CL	x	24	C	✓	21,25	C	✓	14	---	x
[Nai-06]	450	60	30	C	18,7	STR	x	20,9	C	✓	20,87	C	✓	17,16	---	x
[Nai-06]	610	80	40	C	18,7	STR	x	20,9	C	✓	21,2	C	✓	24	C	✓
[Nai-06]	800	100	45	C	18,7	STR	x	21	C	✓	21,07	C	✓	34	CL	x
[Sab-13]	50	15	1 cm	STR	23	C	x	20	STR	✓	18,45	STR	✓	2	---	x

[Bou-11]	180	40	5	STR	30,1	CL	x	29,7	CL	x	18,51	STR	✓	7,5	---	x
[Bou-11]	310	40	10	STR	30,1	CL	x	29,7	CL	x	18,82	STR	✓	18,3	STR	✓
[Bou-11]	350	40	20	STR	23	CL	x	27,7	CL	x	18,70	STR	✓	26,7	CL	x
[Bou-11]	305	40	30	STR	18,7	STR	✓	20	CL	✓	18,92	STR	✓	19,33	STR	✓
[Bou-11]	410	60	20	STR	23	C	x	27	CL	x	19,45	STR	✓	20	STR	✓
[Bou-11]	510	60	30	STR	18,7	STR	✓	20	C	✓	19,13	STR	✓	36	CL	x
[Bou-11]	420	60	40	STR	18,7	STR	✓	20	STR	✓	19,22	STR	✓	20	STR	✓
[Bou-11]	390	80	10	STR	30,1	C	x	30,1	CL	x	19,32	STR	✓	18	STR	✓
[Bou-11]	510	80	20	STR	18,7	STR	✓	25,4	C	x	19,4	STR	✓	20	CL	✓
[Bou-11]	620	80	36	STR	18,7	STR	✓	20	STR	✓	19,62	STR	✓	35	CL	x
[Bou-11]	510	100	20	STR	18,7	STR	✓	25,4	C	x	19,60	STR	✓	20	STR	✓
[Bou-11]	810	100	50	STR	18,7	STR	✓	18,7	STR	✓	18,78	STR	✓	52	CL	x

CL: claquage par arc, **C** : couronne, **STR** : streamer

x : résultat faux,

✓ : résultat correct

Tableau IV.9. Données expérimentales collectées et résultats de prédiction par IA et par modèle

IV.3. Discussions des résultats obtenus

Afin de pouvoir juger sur un même pied d'égalité les différentes méthodes de prédiction des étapes de la décharge proposées durant ce travail, nous avons comparés les résultats obtenus par simulation avec des résultats pratiques collectés de la littérature. Une validation rigoureuse des techniques de prédictions développées sera traduite par le pourcentage de prédictions correctes sur l'ensemble de la base de données pratique.

Le tableau suivant donne le pourcentage des prédictions correctes effectuées en utilisant la logique floue, réseaux de neurones artificiels et modèle mathématique proposé dans le chapitre (II) par rapport aux résultats pratiques collectés de la littérature.

Technique de prédiction Nombre de tests pratique collectés	Logique floue		Réseaux de neurones artificiels	Modèle mathématique	
	Avant ajustement des fonctions d'appartenances	Après ajustement des fonctions d'appartenances			
Totalité des tests effectués (45 tests)	62%	80%	97,8%	49%	} Pourcentage des prédictions correctes vis-à-vis de ceux pratiques collectées de la littérature
Claquage (24 tests)	75%	96%	95,8%	50%	
Couronne (08 tests)	37,5 %	87,5%	100%	25%	
Streamers (13 tests)	54%	46%	100%	54%	

Tableau IV.10. Comparaisons des résultats de la prédiction par différentes techniques de simulation par rapport aux données pratiques collectées de la littérature

Les résultats de prédiction obtenus par le système (FIS) sous MATLAB pour différents triplets d'entrées (V, d, R), ont été obtenus pour une forme trapézoïdale des fonctions d'appartenance des entrées et de la sortie.

La table précédente montre l'amélioration des résultats de prédiction par logique floue dans le cas de l'ajustement des fonctions d'appartenances de 62% de résultats corrects à 80%.

Il est à noter qu'il est bien clair de la table précédente que le taux des prédictions correctes se diffère d'une étape de la décharge à une autre. L'ajustement des formes des fonctions d'appartenance nous a permis d'augmenter le taux de prédictions correctes pour le cas de l'étape de « claquage » de 75% avant ajustement jusqu'à 96% après ajustement et de l'étape dite « couronne » de 37,5% avant ajustement jusqu'à 87,5% après ajustement. Le nombre de

prédictions correctes de l'étape de « streamer » est presque le même dans les deux cas de prédiction par logique floue.

Il est clair d'après les résultats obtenus que la logique floue à une grande puissance dans l'étude de la décharge électrique. Le bon choix des paramètres du système d'inférence flou 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 n'avons modifié que les allures des différentes fonctions d'appartenances des entrées et celle de la sortie en gardant leurs formes trapézoïdales, ce qui nous a permis d'améliorer les résultats.

Pour l'utilisation des réseaux de neurones artificiels, le taux de prédictions correctes des tests effectués est le plus élevé des méthodes utilisées

Les résultats obtenus par RNA dépendent directement des paramètres du réseau. Les simulations réalisées montrent que l'erreur diminue de manière significative à chaque fois que nous augmentons le nombre de neurones cachées, ce qui permet au réseau de suivre la non linéarité des données, mais une fois le nombre de neurones cachées arrive à 9 neurones, nous constatons que l'erreur se stabilise même si l'on augmente d'avantage le nombre de neurones. Les simulations réalisées pour la détermination du nombre de couche cachées nécessaires pour une prédiction satisfaisante ont dévoilé que l'erreur MSE diminue en général de manière significative à partir de 3 couches cachées choisies, et elle reste stable en augmentant le nombre de couche cachée, cela montre clairement que la résolution de notre problème nécessite plus d'une couche cachée. Cependant le nombre d'itérations peut aussi influencer les résultats obtenus. Mais puisque nous avons obtenu une bonne prédiction avec le nombre d'itération choisi, nous nous sommes contentés de cette valeur.

Les résultats obtenus par le modèle mathématique proposé dans le chapitre (II), montrent un faible pourcentage des prédictions par rapport aux deux techniques de l'intelligence artificielles utilisées. D'après la table (IV.10), nous remarquons que le pourcentage des prédictions correctes est de 48,9% de la totalité des prédictions effectuées.

La modélisation mathématique de l'évolution de la décharge électrique reste toujours un domaine de recherche encore important. Proposer un modèle simple qui prend en compte tout les paramètres qui influent sur l'avancement de la décharge est un niveau de modélisation très complexe à réaliser, étant donné le nombre important de ces paramètres.

Nous avons proposé un modèle, qui tient en compte de trois paramètres qui influent directement sur l'avancement des décharges électriques, cela a donné des résultats acceptables en regardant le nombre important des paramètres et grandeurs qui peuvent intervenir dans la

physique et le comportement d'une décharge électrique. L'amélioration de ces résultats peut se faire par l'introduction de la non linéarité des paramètres tels que le 1^{er} coefficient de Townsend, le champ initiale E_0 , aussi l'introduction du deuxième facteur de Townsend et de la mobilité des charges d'espace,...etc. La complexité à résoudre ces problèmes s'accroît avec l'ajout de la complexité numérique de résolutions. C'est pour cela, nous avons fait recourt aux autres méthodes et techniques qui ne nécessitent pas une connaissance approfondie de la physique des décharges électriques et qui donnent des bons résultats.

IV.4. Conclusion

A travers, ce chapitre, nous avons présenté l'utilisation de la logique floue et des réseaux de neurones comme deux techniques d'intelligence artificielle pour la prédiction des étapes de l'avancement de la décharge électrique dans différentes configurations pointes positives-plans. Un algorithme basé sur la technique de la logique floue (LF) a été utilisé en premier lieu pour effectuer cette prédiction et dans le deuxième, un autre algorithme basé sur les réseaux de neurones artificiels (RNA) a été aussi utilisé pour ce même objectif.

Les deux techniques d'intelligence artificielle proposées sont prometteuses et offrent des alternatives très intéressantes par rapport aux méthodes classiques utilisées dans la prédiction des étapes de décharge électrique. Les résultats obtenus en utilisant les deux techniques d'intelligence artificielle (LF, RNA) ont démontré leur efficacité en termes de pourcentage élevé de bonnes prédictions (plus de 96% en utilisant les RNA et 80% en utilisant la LF) et du temps de calcul très court par rapport à la méthode de modélisation proposée qui a donné de faibles pourcentages des prédictions correctes (seulement 49%). Ce qui favorise les techniques de l'IA par rapport à la modélisation physique.

Dans notre étude, nous avons considéré que les trois paramètres qui influent sur l'avancement de la décharge électrique de la pointe vers le plan sont la tension appliquée, la distance inter-électrodes et le rayon de la courbure de la pointe.

Les données pratiques que nous avons utilisé pour mener notre travail surtout pour la validation des techniques de l'IA utilisées, sont collectées à partir de travaux publiés et réalisés dans les mêmes conditions de pression, température, humidité et densité en appliquant les mêmes contraintes électriques (tension continue positive à la pointe) et géométriques (rayon de la courbure de la pointe et la distance inter-électrodes) adoptées dans notre travail.

La difficulté que nous avons rencontrée dans l'utilisation des techniques de l'intelligence artificielle (RNA et LF) réside dans le choix de leurs paramètres; commençant par la logique floue, où 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 floues. L'implémentation du système d'inférence flou (SIF) sous l'environnement MATLAB à l'aide d'interface graphique « **FIS** » se caractérise par sa simplicité. Le 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.

Pour les réseaux de neurones artificiels (RNA), les difficultés que nous avons rencontrées durant leur implémentation résident dans, le choix du type de RNA à utiliser, son architecture (nombre de couches cachées, nombre de neurones par couches), méthode d'apprentissage et son optimisation, critère d'arrêt (fonction de performance) sans oublier le choix de la base de donnée utilisée pour l'apprentissage. Comme pour la LF, nous pouvons dire aussi, qu'il n'y a pas de règles aussi pour choisir les paramètres du RNA. L'implémentation des RNA sous environnement MATLAB à l'aide d'interface graphique se caractérise aussi par sa simplicité dans leur création surtout mais l'apprentissage peut diverger.

Finalement, nous pouvons dire que l'application des techniques d'intelligence artificielle proposées dans notre étude pour la prédiction des étapes de l'avancement de la décharge électrique pour les différentes géométries pointes-plans étudiées est efficace et simple. Il suffit juste de bien choisir les différents paramètres de chaque technique, même si nous ne maîtrisons pas le phénomène de décharge électrique. L'étape la plus importante dans telle étude par intelligence artificielle en particulier LF et RNA, est d'arriver à collecter les bases de données nécessaires. Contrairement aux méthodes classiques de modélisation, où il faut considérer beaucoup de paramètres qui influent sur l'avancement de la décharge électrique.

CONCLUSION GENERALE

CONCLUSION GENERALE

L'étude des décharges électriques dans les intervalles d'air présente un domaine de recherche très actif que ce soit du point de vue technique d'élaboration et utilisation ou du point de vue modélisation et simulation. Notre travail de recherche est une contribution à la modélisation des décharges électriques dans l'air. Ce travail a été consacré à la prédiction des étapes d'avancement de la décharge électrique dans une configuration pointe-positive-plan dans les conditions normales de pression et température pour les moyens intervalles d'air (inférieur à 1 mètre). Cette prédiction a été réalisée en deux étapes :

En première étape, nous avons proposé un modèle mathématique de la décharge électrique dans une configuration pointe-plan en 1-D pour mettre au point la démarche de prédiction en se basant sur le critère des streamers. La simulation numérique de ce modèle nous a permis de calculer l'intégrale "I" qui définit le seuil d'apparition des streamer sur la ligne de haute intensité du champ électrique.

L'idée originale dans cette première étape est de faire correspondre à chaque étape de la décharge électrique un intervalle de valeur de l'intégrale "I" pour différentes contraintes électro-géométriques. Chaque valeur de cette intégrale peut indiquer l'étape atteinte par la décharge électrique. Dans la même optique et en deuxième étape nous avons calculé cette même intégrale en utilisant deux techniques d'intelligence artificielle, qui sont : la logique floue et les réseaux de neurones artificiels, pour différentes contraintes électro-géométriques. L'utilisation des réseaux de neurones artificiels nécessite une base de données expérimentale significative pour l'apprentissage. Cette base de données a été collectée de la littérature. La table d'inférence que nous avons utilisée dans l'étude par logique floue a été proposée après une analyse des données pratiques issues de la littérature.

- Le modèle mathématique que nous avons proposé a été utilisé pour prédire les étapes de la décharge électrique pour différentes géométries d'électrodes pointe-plan et tensions positives appliquées à la pointe. Ce modèle nous a permis, dans un premier temps, de déterminer le champ électrostatique local E_0 et total (E_t) par la résolution de l'équation de Poisson, puis le calcul de l'intégrale "I" le long de la ligne de haute intensité du champ électrique dans l'espace inter-électrodes. Les valeurs de 'I' sont transformées en classes donnant les étapes de l'avancement de la décharge électrique extraites d'une base de données pratique issue de la littérature.

Après comparaison des résultats de simulation et de la littérature, les prédictions correctes réalisées par le modèle mathématique sont environ de 50% de la totalité de tests effectués. Les différentes hypothèses simplificatrices considérées durant la simulation ont influé considérablement les résultats obtenus. Ce qui a donné un avantage aux techniques d'intelligence artificielle.

L'intelligence artificielle à base de la logique floue et de réseaux de neurones artificiels nous a facilité le calcul des valeurs de l'intégrale "I" le long de la ligne de haute intensité. Les seules variables d'entrées considérées sont : La tension appliquée à la pointe, le rayon de la courbure de la pointe et la distance inter-électrodes. Les valeurs de l'intégrale "I" sont calculées à la sortie du système à base d'IA proposé. Les résultats obtenus par l'IA sont aussi comparés aux résultats de la littérature en termes d'étapes de la décharge électrique. De par l'application de ces deux techniques d'intelligence artificielle, il s'est avéré préférable d'utiliser le RNA par rapport à la LF pour la prédiction des étapes de l'avancement de la décharge électrique comme le montre le tableau de résultats donné dans le dernier chapitre (80% des prédictions correctes obtenues par LF et 97% sont obtenues par RNA). Les résultats présentés dans ce tableau, ont montré l'efficacité de la logique floue et les réseaux de neurones artificiels dans la prédiction des étapes de la décharge électrique par rapport au modèle mathématique proposé.

C.1. Perspectives

En perspective, nous recommandons :

- Une application des méthodes d'intelligence artificielle dans l'étude des décharges électriques en tenant en compte des différents paramètres intervenants dans leur initiation, développement et propagation dans différentes géométries d'électrodes.
- Une collection pratique des différentes données influant le développement de la décharge pour donner une originalité aux différentes études réalisées par des techniques d'intelligence artificielle.
- L'application des techniques hybrides de l'intelligence artificielle pour améliorer les résultats obtenus.
- Dans le domaine de la modélisation, nous pouvons envisager de développer le modèle mathématique/numérique en l'exécutant dans une durée de temps, c'est-à-dire laisser cumuler une grande quantité de charge d'espace et voir la convergence de la valeur de "I" si elle ira à un claquage total ou elle reste dans l'étape de streamer.

BIBLIOGRAPHIE

Bibliographie

- [Aba-09] A. Abahazem, "Etudes expérimentales des décharges couronne pour la dépollution des gaz", Thèse de doctorat, Université de Toulouse III – Paul Sabatier, France, 2009.
- [Abd-88] M. Abdel-salam, E. Keith Stanek, "On the calculation of breakdown Voltages for uniform electric fields in compressed air and SF6", IEEE Transactions on Industry Applications, Vol. 24, No. 6, pp.1025-1030, 1988.
- [Ada-04] K. Adamiak, P. Atten, "Simulation of corona discharge in point-plane configuration", Elsevier Journal of Electrostatics, Vol. 61, pp 85–98, 2004.
- [Ada-94] K. Adamiak , "Adaptive approach to finite element modelling of corona fields", IEEE transactions on industry applications, Vol. 30, N°. 2, pp.1632- 1639, 1994.
- [Agu-87] M. Aguet, M. Ianoz, "Haute tension-traité d'électricité d'électronique et d'électrotechnique-", Edition Dunod, 1987.
- [Aky-02] M. Akyuz, "Positive Streamer Discharge in Air and Along Insulating Surfaces: Experiment and Simulation", These of doctorate, Acta university Upsaliensis, Uppsala, 2002.
- [Ame-88] R. Y. Amer, "Effect of avalanche space charge fields on the calculating breakdown voltage ", Electrical Engineering Department, Faculty of Engineering, Cairo, Egypt, pp 423-425,1988.
- [Amm-07] M. Y. Ammar, "Mise en œuvre de réseaux de neurones pour la modélisation de cinétiques réactionnelles en vue de la transposition batch/continu", Thèse de doctorat en génie des procédés et de l'environnement, Institut national polytechnique de Toulouse, 2007.
- [Att-12] P. Atten, K. Adamiak, V. Atrazhev, "Electric corona discharge simulation the hyperbolic point-ground plane configuration", EEE Annual Report Conference on Electrical Insulation and Dielectric Phenomena, pp 109-112, 2012.
- [Ayo-12] S. Ayouni, "Etude et extraction de règles graduelles floues: Définition d'algorithmes efficaces", Thèse de doctorat, Université Montpellier II et Université Tunis El Manar, France-Tunisie, 2012.
- [Bad-68] E. Badareu, I. Popescu, " Gaz ionisés-décharges électriques dans les gaz", Editions :

Dunod- Paris, Meridiane- Bucarest, Roumanie, 1968.

- [Bag-99] L. Baghli, "Contribution à la commande de la machine asynchrone, utilisation de la logique floue, des réseaux de neurones et des algorithmes génétiques", Thèse de doctorat, Université Henri Poincaré, Nancy-I, France, 1999.
- [Ben-05] A. M. Benselama, "Modélisation numérique du comportement d'une particule sous champ électrique dans les microsystèmes : de la déformation au déplacement", Thèse de doctorat, Université Joseph Fourier, France, 2005.
- [Bor-98] P. Borne, J. Rozinoer, J.Y dieulot, L. Dubois, "Introduction à la commande floue", Edition Technip, Paris, 1998.
- [Bou-07] S. Bouazabia, L. Hadjout, L. Laskri et D. Mahiout, "Modélisation de la décharge électrique dans un système cercle-cercle : Effet de la chute de tension", 6^{ème} Conférence Nationale sur la Haute Tension- CNHT'2007 — Taghit / Béchar, Algérie, pp 8-11, 2007.
- [Bou-11] Y. Bourek, L. Mokhnache, N. Nait Said, R. Kattan, "Determination of ionization conditions characterizing the breakdown threshold of a point-plane air interval using fuzzy logic", Elsevier, Electric Power Systems Research, Vol. 81, pp 2038– 2047, 2011.
- [Buh-98] Hansruedi Buhler, "Réglage par logique floue", Edition Presse polytechnique et université, Romande, 1998.
- [Cas-01] K. Castor, "Caractérisation des Sources Acoustiques Associées aux Décharges Couronnes Négatives", thèse de doctorat, université de Maine, le Mans, France, 2001.
- [Cha-04] W. Fu Chang, Y.Chi Wu, K.Li Wen, "Prediction of gas breakdown via a fuzzy-grey approach", IEEE Melecon 2004, Dubrovnik, Croatia, pp.831-834, 2004.
- [Cir-02] M.N. Cirstea, A. Dinu, J.G. Khor, M. McCormick, "Neural and fuzzy logic control of drives and power systems", Newnes Edition, 2002.
- [Cou-09] M. L. Coulibaly, "Caractérisation des décharges électriques se propageant aux interfaces gaz/solide – Relation entre propriétés des matériaux et dimension fractale", Thèse de doctorat en génie électrique, Ecole doctorale électronique, électrotechnique, automatique de Lyon, France, 2009.
- [Dav-96] J. H. Davidson, P.J. McKinney et P. Linnebur, "Three-dimensional (3-D) model of electric field and space charge in the barbed plate-to-plate precipitator", IEEE Trans. Ind. Appl., Vol. IA32, pp. 858-866, 1996.
- [Don-97] J. P. Donohoe, "A Comparison of air breakdown criteria for slightly divergent fields ", IEEE Publication, pp 118-120, 1997.
- [Don-98] J. P. Donohoe, "Physical characteristics of criteria governing the computation of air gap breakdown voltages for slightly divergent field", IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, Vol.5, No.4, pp 485-492, 1998.
- [Dub-06] D. Dubois, "Réalisation et caractérisation d'un réacteur plasma de laboratoire pour des études sur la dépollution des gaz d'échappement", Thèse de doctorat en physique et Ingénierie des plasmas de décharge, Université Toulouse III, France, 2006.
- [Elm-90] A. A. Elmoursi et C.E. Speck, "Simulation of space charge in unbounded

geometries”, IEEE Trans. Ind. Appl., Vol. IA26 (1990), pp. 384–392.

- [Eym-03] S. Eymerie, "Etude expérimentale des décharges atmosphériques générées par impulsions nanosecondes", Thèse de doctorat, Physique -énergétique, Université de Rouen, France, 2003.
- [Fof-03] I. Fofana , I. Ndiaye, " Les Propriétés Diélectriques de l'air - 6DIG967", Revue des modèles mathématiques de décharge dans l'air, université du Québec à Chicoutimi, 2003.
- [Fof-92] I. Fofana, "Modélisation de la décharge positive dans les grands Intervalles d'air", Thèse de doctorat en génie électrique, Ecole doctorale électronique, Electrotechniques, Automatique de Lyon, 1992.
- [Gar-72] C. Gary, B. Hutzler, J. P. Schmitt, "'Peek's law generalisation: Application to various field configuration'", IEEE Conference Paper, Summer Meeting 1972.
- [Gar-92] P. Garnier, "Contrôle d'exécution réactif de mouvement de véhicules en environnement dynamique structuré ", Thèse de doctorat, Institut national polytechnique de Grenoble, 1992.
- [Gar-95] P. Garnier, "Contrôle d'exécution réactif de mouvement de véhicules en environnement dynamique structuré", Thèse de doctorat, institut national polytechnique de Grenoble, décembre 1995.
- [Gir-99] M. Giralt, "Adaptation d'un modèle de décharge en vue de son application à la conception de l'isolement aérienne H.T et T.H.T", Thèse de doctorat, École Centrale de Lyon, France, 1999.
- [God-97] J. Godjevac, "Neuro -Fuzzy controllers – Design and application", Presses polytechniques et universitaire romandes, Lausanne, 1997.
- [God-99] J. Godjevac, "Idées nettes sur la logique floue", Presses polytechniques et universitaires romandes, Lausanne, 1999.
- [Gok-14] N. Gökçe, M. Eminli, "Model-based test case prioritization using neural network classification", Computer science & engineering: an international journal (CSEIJ), Vol. 4, no. 1, 2014.
- [Gue-04] V. Guerin "Prédiction et compréhension de la densification des poudres commerciales d'alumine et de fer grâce à une approche par réseau de neurones artificiels", Thèse de doctorat en matériaux, Lausanne, EPFL, 2004.
- [Hen-02] Y. Hen Hu, J.-Neng Hwang, "Handbook of neural network signal processing", CRC Press LLC, United States of America, 2002.
- [Ibr-04] A.M. Ibrahim, "Fuzzy logic for embedded systems applications", Newnes Edition, United States of America, 2004.
- [Idr-03] A. Idri, "Un modèle intelligent d'estimation des coûts de développement de logiciels", Thèse de doctorat, Université du Québec à Montréal, 2003.
- [Jan-93] J .S.R. Jang. "AN FIS: Adaptive-Network-based Fuzzy Inference Systems", IEEE transactions on systems, Vol 23, pp 665- 684, 1993.
- [Jav-05] H. Javadi, M. Farzaneh, "Electric field calculations in rod-plane gap using hyperbolic approximation and finite element method: a Comparison", PSC2005, 20th international power system conference, 12-E-HVS-378, Iran, 2005.

- [Jos-11] S.N. Joshi a, S.S. Pandeb, "Intelligent process modelling and optimization of die-sinking electric discharge machining", *Applied soft computing* 11, Elsevier, pp. 2743–2755, 2011.
- [kac-11] S. Kacem, "Modélisation électro-hydrodynamique des décharges couronne dans l'air à la pression atmosphérique pour application aux actionneurs plasmas ", Thèse de doctorat, Université de Toulouse III – Paul Sabatier, spécialité: Ingénierie et physique des plasmas de décharge.
- [Kan-07] A. Kanta, "Développement d'un système expert basé sur l'intelligence artificielle pour la prédiction et le contrôle du procédé de projection plasma", Thèse de doctorat, université de Technologie de Belfort-Montbéliard, France, 2007.
- [Kar-06] A. Kara, Ö. Kalenderli, K. Mardikyan, "Effect of dielectric barriers to the electric field of rod-plane air gap", Excerpt from the Proceedings of the COMSOL Users Conference Prague, 2006.
- [Kas-11] S. Kacem, "Modélisation électro-hydrodynamique des décharges couronne dans l'air a la pression atmosphérique pour application aux actionneurs plasmas", Thèse de doctorat, l'Université de Toulouse III – Paul Sabatier, France, 2011.
- [Keb-06] L. Kebbabi, " Caractérisation des décharges glissantes se propageant aux interfaces liquide/solide sous différentes formes de tension – relation entre propriétés des matériaux et dimension fractale", Thèse de doctorat en génie électrique, Ecole doctorale électronique, électrotechnique, automatique de Lyon, 2006.
- [Kha-06] B. Khaddour, "Modélisation du champ électrique modifié par la charge d'espace injectée", Thèse de doctorat en génie électrique, Institut National Polytechnique De Grenoble, 2006.
- [Kli-72] L. E. Kline, J. G. Siambis, "Computer simulation of electrical breakdown in gases; avalanche and streamer formation", *Physical review*, Vol. 5, pp. 794-805, 1972.
- [Kro-96] B. Krose, P. V. Der Smagt, "Introduction to neural networks", Eighth edition, Amsterdam, 1996.
- [Kuf-00] E. Kuffel, W.S. Zaengl, J. Kuffel, "High Voltage Engineering -Fundamentals-", Second edition, published by Butterworth-Heinemann, British, 2000.
- [Kuf-84] E. Kuffel, "High voltage engineering ", Pergamon press, 1984.
- [Lar-95] A. Larsson, F. Gutfleisch, V. Scuka, "Calculation of the positive lightning impulse withstand of the voltage for long air gaps ", Ninth international symposium on high voltage engineering, 9ISH, Graz Convention centre Austria August, pp-1-2169, 1995.
- [Lee-93] J. Lee, "On methods for improving performance of PI-type fuzzy logic controllers ", *IEEE Transactions on Fuzzy Systems*, Vol. 1, pp 298-301, 1993.
- [Li-08] Z. LI, "Décharge couronne dans l'hélium liquide et gaz dense sous champ électrique intense : Pré-claquage, transport de charge, spectroscopie d'émission", Thèse de doctorat, Université Joseph Fourier – Grenoble 1-école doctorale physique, France, 2008.
- [Liu-94] J. Liu, G. R. Govinda Raju "Simulation of negative corona discharge in SF₆", *IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation* Vol. 1 N°. 3, pp. 520-529, 1994.

- [Loe-41] L. B. Loeb, "The mechanism of the electrical spark", Stanford University Press (1941).
- [Lor-90] P. Lorrain, D. R. Corson, "Electromagnetism: Principles and applications", New York: Freeman, 1990.
- [Low-94] J.J. Lowke, R. Morrow, "Theory of electric corona including the role of plasma chemistry", Pure and Appl. Chem, Vol. 66, No. 6, pp. 1287-1294, Great Britain, 1994.
- [Man-07] D. Mandal, S. K. Pal, P.Saha, "Modelling of electrical discharge machining process using back propagation neural network and multi-objective optimization using non-dominating sorting genetic algorithm-I", Elsevier Journal of Materials Processing Technology, Vol.186, pp. 154–162, 2007.
- [Man-12] P. Mandala, S. T. S. Madhira, A. U. Haquec, J.Mengc, L. Pinedaa, "Forecasting power output of solar photovoltaic system using wavelet transform and artificial intelligence techniques", Elsevier, Procedia Computer Science, Vol. 12, pp332 – 337, 2012.
- [Mar-05] L. Martin, "Dépollution d'effluents chargés en composés organiques volatils cycliques (toluène et bêta-pinène) par décharge couronne à barrière diélectrique. Marquage isotopique et simulation du procédé", Thèse de doctorat en Génie Des Procédés Et Haute Technologie, Université PARIS VI, Pierre et Marie CURIE, France, 2005.
- [Mar-06] A. Markopoulou, N.M. Vaxevanidis, G. Petropoulos, D.E. Manolakos, "Artificial neural networks modelling of surface finish in electro-discharge machining of tool steels", 8th Biennial ASME Conference on Engineering Systems Design and Analysis, Torino, Italy, 2006.
- [Mat-06] J- Ch. Matéo-VÉLEZ, "Modélisation et simulation numérique de la génération de plasma dans les décharges couronnes et de son interaction avec l'aérodynamique", Thèse de doctorat, Ecole nationale supérieure de l'aéronautique et de l'espace, spécialité : dynamique des fluides, France, 2006.
- [McD-78] McDonald, J.R., Smith, W. B. et Spencer. "A mathematical model for calculating electrical conditions in wire-duct electrostatic precipitation devices", Journal Applied Physics, Vol. 48(6), pp. 2231-2243, 1978.
- [Mec-13] R. Mechoug, "La Prédiction des séries temporelles utilisant les paradigmes de soft computing", Thèse de doctorat en sciences en génie électrique, Université Mohamed Khider – Biskra, Algérie, 2013.
- [Mee-53] J. M. Meek, J. D. Craggs, "Electrical breakdown of gases", Oxford at the Clarendon press, 1953.
- [Mee-78] J. M. Meek, J.D. Draggs, "Electrical breakdown of gases", John Wiley and sons, 1978.
- [Min-03] W.K Min, J.B Park, S.CH Choi, J. Kang, "Numerical analysis of gas discharge using FEM-FCT on unstructured grid", Journal of the Korean Physical Society, Vol. 42, pp. S908-S915, 2003.
- [Moh-95] H. Mohseni, A. Akbari Azirani, "The field of rod-plane electrodes and partial discharge inception voltage in air", Ninth international symposium on high voltage engineering, 9th ISH session 2148, Graz Convention centre Austria, Europe, pp. 1-4,

1995.

- [Mok-00] L. Mokhnache, A. Boubakeur, S. Boukhtache "Numerical model describing the effect(s) of a barrier and the space charge fields on the electrical strength of a point-plane air gap using the finite elements", IEEE Conference on Electrical Insulation and Dielectric Phenomena, pp 466-469, 2000.
- [Mok-01] L.Mokhnache, A.Boubakeur, "Prediction of the breakdown voltage in a point-barrier-plane air gap using neural networks", 2001 Annual Report Conference on Electrical Insulation and Dielectric Phenomena, pp. 369-372, 2001.
- [Nai-06] M.S. Naidu, V. Kamaraju, "High voltage engineering", Second edition, McGraw-Hill edition, tenth reprint 2006.
- [Nie-84] L. Niemeyer, L. Pietronero, H. J. Wiesmann, "Fractal dimension of dielectric breakdown", Phys. Rev. Lett, Vol. 33, pp. 1033-6, 1984.
- [Osm-93] P. Osmokrovic, "Mechanism of electrical breakdown of gases at very low pressure and interelectrode gap values", IEEE Transactions On Plasma Science. Vol. 21. No. 6, pp. 645-653, 1993.
- [Oul-05] D. Ould abdeslam, "Techniques neuromimétiques pour la commande dans les systèmes électriques: application au filtrage actif parallèle dans les réseaux électriques basse tension", Thèse de doctorat, Université de Haute-Alsace, France, 2005.
- [Par-02] J.M. Park, Y.-H. Kim, S.H. Hong, "Three-dimensional numerical simulations on the streamer propagation characteristics of pulsed corona discharge in a wire-cylinder reactor", HAKONE 8: International Symposium on High Pressure, Low Temperature Plasma Chemistry. Proceedings. Vol. 1 and 2, p. 104-108, 2002.
- [Ped-89] A.Pedersen, "On the electrical breakdown of gaseous dielectrics", IEEE Transactions on Electrical Insulation, Vol. 24, No.5, pp 721-793, October 1989.
- [Pet-95] K. Petcharaks, W.S.Zaengl, "Numerical calculation of breakdown in voltage of standard air gap (IEC 52) based on streamer breakdown criteria", session 2173, 9th ISH, pp. 1-4, 1995.
- [Pet-99] K. Petcharaks, "A contribution to the streamer breakdown criterion", IEE Conference Publication, High Voltage Engineering Symposium, pp 19-22, 22-27 August, 1999.
- [Pla-02] T. Plank, "Positive Corona at combined DC and AC voltage", Tartu university press, Tartu, Estonia, 2002.
- [Qot-05] R. Qotba, "Etude expérimentale des phénomènes induits dans un liquide par une injection fortement localisée d'énergie", Thèse de doctorat, Ecole Doctorale de Mécanique Energétique Energétique- Université Joseph Fourier Grenoble 1, France, 2005.
- [Rad-99] E. H. Radames Gaxiola, "Dielectric breakdown in insulating gases- space charge effects and non-uniform fields-", These de doctorat, Eindhoven, 1999.
- [Rai-91] Y.R. Raizer, "Gas discharge physics", Edition: Springer-Verlag ; Germany, 1991.
- [Raj-06] Gorur G. Raju, "Gaseous electronics-theory and practice-", Edition Taylor and Francis, 2006.

- [Raj-12] G. G. Raju, "Gaseous Electronics- Tables, Atoms, and Molecules-", Edition: Taylor & Francis Group, 2012.
- [Red-07] M. Redolfi, "Etude de l'oxydation de différents types d'hydrocarbures par des procédés utilisant des techniques de décharges électriques non-thermiques à pression atmosphérique : Application à la problématique du démarrage à froid", Thèse de doctorat en génie des procédés, Université Paris XIII, France, 2007.
- [Rev-99] I. Revel, "Simulation Monte Carlo des particules lourdes dans les décharges luminescentes", Thèse de doctorat de l'université de Toulouse I, 1999.
- [Rez-07] M. Rezouga, R.Ouiddir1, A.Tilmatine, M.Ziane et K.Medles, "Claquage de l'air dans une configuration sphère-sphère application de la méthodologie des plans d'expérience", CNHT'2007, Taghit/ Béchar, Algérie, pp 16-20, 2007.
- [Rio-07] J. A. Riouset, V. P. Pasko, P. R. Krehbiel, R. J. Thomas, W. Rison, "Three-dimensional fractal modeling of intracloud lightning discharge in a New Mexico thunderstorm and comparison with lightning mapping observations", Journal of geophysical research, Vol. 112, D15203, 2007.
- [Roy-84] G. Le Roy, C. Gary, B. Hutzler, J. Lalot, Ch. Dubanton, "Les propriétés diélectriques de l'air et les très haute tension", Edition Eyrolles, Paris 1984.
- [Sal-05] M. Salanne Jean-Philippe, "Contrôle du point de fonctionnement des décharges électriques par l'intermédiaire de leur alimentation", Thèse de doctorat, Institut national polytechnique de, Toulouse, Spécialité : Génie électrique, France, 2005.
- [Sat-09] P. Sattari, G.S.P. Castle, K. Adamiak, "FEM-FCT Based dynamic simulation of corona discharge in point-plane configuration", Conf. Presentation – P1.17, Natural Science and Engineering Research Council (NSERC) of Canada, pp 1-7, 2009.
- [Sat-10] P. Sattari, K. Adamiak, "FEM–FCT-Based dynamic simulation of corona discharge in point–plane configuration", IEEE transactions on industry applications, Vol. 46, No. 5, 2010.
- [Saw-82] Y. Sawada, S. Ohta, M. Yamazaki, H. Honjo, "Self-similarity and a phase transition-like behavior of a random growing structure governed by a non-equilibrium parameter," Phys. Rev. A, Vol. 26 pp. 3557, 1982.
- [Ser-03] Y. Serdyuk, S. Gubanski, "Modeling of Negative streamer propagation in a Weak uniform electric field", Proc. XXVI Int. Conf. on Phenomena in Ionized Gases, 3 pp. 81-82, 2003.
- [Ser-04] Y. Serdyuk, "Computer modelling of electro physical phenomena in high voltage insulation", These of doctorate, Goterborg university, Sweden 2004.
- [Set-11] A. Settaouti, L. Settaout, "Numerical simulation of positive corona discharge in air", Int. J. Engineering Systems Modelling and Simulation, Vol. 3, Nos.3/4, pp. 148-154, 2011.
- [Sin-13] A. Singh, P. Saxena, S. Lalwani, "A study of various training algorithms on neural network for angle based triangular problem", International Journal of Computer applications (0975 – 8887) Vol. 71, No.13, May 2013.
- [Taz-05] S.S. Tezcan, M.S. Dincer, H.R. Hiziroglu, "Calculation of breakdown voltages in Ar + SF6 using an artificial neural network", IEEE Annual report conference on electrical insulation and dielectric phenomena, pp. 59-62, 2005.

- [Tho-08] Ph. Thomas, A. Thomas, " Elagage d'un perceptron multicouches : Utilisation de l'analyse de la variance de La sensibilité des paramètres", CIFA'08 Bucarest, Roumanie, 3-5 septembre 2008.
- [Vai-08] V. Vaidehi, S. Monica, S. M. Sh. Safeer, M. Deepika, S. Sangeetha, " A prediction system based on fuzzy logic", Proceedings of the World Congress on Engineering and Computer Science 2008, WCECS 2008, San Francisco, USA, 2008.
- [Vin-02] A.Vincent," Conception et simulation d'un réacteur fil-cylindre à décharge couronne avec barrière diélectrique adapté au traitement des oxydes d'azote dans des effluents marqués par un isotope", Thèse de doctorat de l'université Paris VI Pierre et Marie Curie, génie des procédés et haute technologie, France, 2002.
- [Wie-86] H. J. Wiesmann, H. R. A. Zeller, "Fractal model of dielectric breakdown and prebreakdown in solid dielectrics" J. Appl. Phys, Vol. 60, pp. 1770–3, 1986.
- [Yam-97] K. Yamazawa, H. Yamashita, "Calculation of the electric field distribution under the point-plane gap configurations using the FEM", IEEE Annual Report - Conference on Electrical Insulation and Dielectric Phenomena, Minneapolis, pp. 648-651, October 19-22, 1997.
- [Yan-12] K. Yanallah, F. Pontiga, "A semi-analytical stationary model of a point-to-plane corona discharge", IOP science journal, Plasma Sources Science and Technology, Vol, No. 4, 2012.
- [You-07] L. Youssef, "Diagnostic et modélisation d'une décharge a barrière diélectrique pour le contrôle d'écoulement", Thèse de doctorat, université Toulouse III– Paul Sabatier U.F.R. Physique Chimie Automatique, France, 2007.
- [Zal-79] S. T. Zalesak, "Fully multidimensional flux corrected transport algorithms for fluids", J. Comput. Phys, Vol. 31, pp. 335–363, 1979.
- [Zeg-13] L. Zeghichi, L. Mokhnache, M. Djebabra, "Application of the Monte Carlo method for the determination of physical parameters of an electrical discharge", Springer journal-Computational Problems in Science and Engineering, Vol. 343, pp 439-447, 2013.