

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE
MINISTERE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR ET DE LA RECHERCHE
SCIENTIFIQUE
UNIVERSITE MOULOU D MAMMERI DE TIZI-OUZOU



FACULTE DE GENIE ELECTRIQUE ET
D'INFORMATIQUE
DEPARTEMENT D'ELECTROTECHNIQUE

THESE DE DOCTORAT EN ELECTROTECHNIQUE

Présentée par

SAIM Nabila

Thème

**Etude des décharges électriques apparaissant au
niveau du point triple métal/ air/ solide isolant et de
leurs effets sur l'isolation électrique**

Soutenue publiquement le 19 Juin 2023 devant le jury composé de :

Mr	NEDJAR	Mohammed	Professeur	UMMTO	Président
Mme	BITAM-MEGHERBI	Ferroudja	Professeur	UMMTO	Rapporteur
Mr	MOULAI	Hocine	Professeur	USTHB	Examineur
Mr	MOUDOUD	Mustapha	Professeur	UMMTO	Examineur
Mr	LEHOUIDJ	Bachir	M.C.A	USTHB	Examineur

REMERCIEMENTS

Le travail présenté dans cette thèse a été effectué au Laboratoire des Technologies Avancées du Génie Electrique (LATAGE) de l'Université Mouloud Mammeri, Tizi-Ouzou.

Je remercie plus particulièrement Mme Ferroudja Bitam-Megherbi, Professeur à l'université Mouloud Mammeri de Tizi-Ouzou, pour m'avoir encadrée.

Je tiens à remercier Monsieur Mohammed Nedjar, Professeur à l'Université Mouloud Mammeri de Tizi-Ouzou, pour m'avoir fait l'honneur de présider mon jury de soutenance.

Je remercie également Monsieur Hocine Moulai, Professeur à l'Université Houari Boumédiène de Bab-Ezzouar, pour avoir accepté d'être examinateur de cette thèse.

Mes remerciements vont également à Monsieur Mustapha Moudoud, Professeur à l'Université Mouloud Mammeri de Tizi-Ouzou, pour sa présence dans le jury de cette thèse.

Que Monsieur Bachir Lehoudj, Maître de Conférences classe A à l'Université Houari Boumédiène de Bab-Ezzouar, trouve ici l'expression de mes remerciements pour avoir accepté de faire partie du jury de soutenance.

Cette thèse a également bénéficié du soutien total de ma famille. Je pense aujourd'hui avec beaucoup de tendresse à mes parents et à la confiance qu'ils m'accordent. Je veux les remercier de tout mon cœur, ainsi que ma sœur et mes frères. Sans votre soutien, tout ceci n'aura jamais pu aboutir et je vous serai éternellement reconnaissante d'avoir su me donner les moyens d'arriver jusqu'ici. Aucun mot ne saurait décrire ma pensée.

Je remercie tous mes amis et collègues pour leurs soutien et encouragements.

Enfin, un grand merci à toutes les personnes qui ont contribué à réaliser ce travail.

Résumé

Cette étude porte sur les isolateurs électriques utilisés dans le domaine de la haute tension sous pression gazeuse. Pour des raisons de coût, réduire la taille du matériel afin de réaliser une optimisation diélectrique est une nécessité. Les points que l'on peut considérer comme particulièrement préoccupants sont la région du point triple : la jonction entre les isolants, les gaz et les métaux, les zones sensibles aux décharges électriques et les particules qui peuvent s'y accumuler. Les particules métalliques ainsi que l'accumulation de charge à la surface isolante peuvent réduire la rigidité diélectrique de cette dernière lorsqu'une surtension est appliquée. A la lumière des points évoqués plus haut, cette étude caractérise expérimentalement et mathématiquement la multitude de phénomènes complexes qui apparaissent en présence de haute tension.

Mots clés : Triple jonction, isolant solide, champ électrique, courant de décharges électriques, optimisation, régression, modélisation.

Abstract

This study relates to electrical insulators used in the high voltage domain under gas pressure. For cost reasons, reducing the size of equipment in order to achieve dielectric optimization is a necessity. The points that can be considered of particular concern are the region of the triple point: the junction between insulators, gases and metals, the zones sensitive to electric discharges and the particles which can accumulate there. Metallic particles as well as the accumulation of charge on the insulating surface can reduce the electric strength of the latter when an over-voltage is applied. In the light of what has just been said, this study characterizes experimentally and mathematically the multitude of complex phenomena that appear in the presence of high voltage.

Key words: Triple junction, solid insulator, electric field, electric discharge current, optimization, regression, modeling.

Introduction générale	1
CHAPITRE I. Physique de la décharge surfacique à la triple jonction métal/ air/ solide isolant.	
I.1.Introduction	3
I.2. Phénomènes de décharges dans l’air	3
I.2.1. Généralité sur l’air.....	3
I.2.2. Décharges électriques dans l’air	4
I.2.2.1. La décharge de Townsend.	4
I.2.2.2. La décharge ‘Streamer’.....	5
I.2.3.Tenue diélectrique de l’air	6
I.2.4. Facteurs influençant la tenue diélectrique dans l’air.....	7
I.3. Les matériaux diélectriques solides.....	7
I.3.1. Grandeurs caractéristiques des milieux diélectriques solides.....	8
I.3.1.1. Permittivité diélectrique.....	8
I.3.1.2. Rigidité diélectrique.....	8
I. 4. Phénomènes de la décharge à la TJ.....	8
I. 4.1. Processus de décharge.....	8
I.4.2. Champ électrique à la TJ.....	12
I.4.3. Calcul de la tension d’apparition des décharges électriques à TJ.....	14
I.4.3.1. Méthode conventionnelle.....	14
I.4.3.2. Méthode de la tension de Paschen.....	15
I.4.4. Mécanisme de claquage à la TJ.....	15
I.4.4.1. Décharges électriques.....	15
I.4.4.2. Claquage électrique.....	15
I.4.4.2.1. Le claquage électromécanique.....	16

I.4.4.2.2. Le claquage thermique.....	16
I.4.4.2.3. Le claquage électronique.....	16
I.4.4.2.4. Le claquage par arborescence.....	16
I.5. Modélisation de la décharge à la TJ.....	17
I.5.1. Modèle de Sawada et al	18
I.5.2. Modèle de Niemeyer et al (NPW).....	19
I.5.3. Modèle de Vicente et al.....	20
I.6. Conclusion.....	21
CHAPITRE II. Etude expérimentale des décharges électriques à la triple jonction	
II.1. Introduction.....	22
II.2. Mode opératoire et déroulement des essais	22
II.3. Représentation schématique du montage expérimental.....	25
II.4. Résultats et discussion	26
II.4.1. Courant de décharge	26
II.4.2. Influence de la distance inter-électrodes sur le courant maximum de décharge	28
II.4.3. Influence de la tension appliquée sur le courant maximum de décharge électrique.....	30
II.4.4. Influence du rayon de courbure de la pointe sur le courant maximum de décharge électrique.....	34
II.4.5. Influence du temps d'application de la tension sur le courant maximal de décharge.....	36
II.4.6. Influence de l'état de surface de l'isolant sur le courant maximal de décharge.....	38
II.4.7. Influence de la permittivité de l'isolant solide sur le courant maximal de décharge.....	41
II. 5. Conclusion	42

CHAPITRE III. Conception d'un modèle de régression

III.1. Introduction.....	43
III. 2. Définition d'une modélisation.....	43
III.3. Réalisation d'une modélisation	44
III.4. Modèle de régression.....	45
III.4.1. Représentation graphique.....	45
III.4.2. Equation générale d'un modèle de régression linéaire simple.....	46
III.4.3. Modèle de régression polynomial	47
III.4.3.1. Détermination des paramètres.....	48
III.4.3.2. Choix du degré du polynôme	48
III.4.3.3. Avantages et inconvénients du modèle polynomial.....	49
III.4.3.3.1. Avantages.....	49
III.4.3.3.2. Inconvénients et limites.....	49
III.4.4. Critères d'évaluation et validation d'un modèle de régression.....	50
III. 4.4.1. Le coefficient de détermination R^2	50
III. 4.4.2. Le biais.....	52
III. 4.4.3. L'erreur moyenne absolue MAPE.....	52
III. 4.4.4. L'erreur quadratique moyenne RMSE.....	53
III. 4.4.5. Le compromis biais-variance.....	53
III. 4.4.6. Les procédures de validation croisée.....	55

III. 5. Conclusion.....	56
CHAPITRE IV. Elaboration des modèles de prédiction de la décharge électrique à la jonction triple	
IV.1. Introduction.....	57
IV.2. Méthodologie.....	57
IV.2.1. Modèle polynomial.....	57
IV.2.1.1. Modèles polynomiaux monovariables du courant maximum de décharge électrique associés à V , d et r indépendamment.....	59
IV.2.1.2. Modèles polynomiaux quadratiques à deux variables du courant maximum de décharge électrique associés à V , d	60
IV.2.1.3. Modèles polynomiaux monovariables du courant maximum de décharge électrique associés à t , t' et t'' indépendamment.....	60
IV.2.2. Modèle gaussien.....	61
IV.2.2.1. Modèles gaussiens du courant maximum de décharge électrique associés à t , t' et t''	62
IV.3. Résultats et discussion	63
IV.3.1. Modèle polynomial.....	63
IV.3.1.1. Modèles polynomiaux monovariables du courant maximum de décharge électrique associés à V , d et r indépendamment.....	63
IV.3.1.2. Modèles polynomiaux quadratiques à deux variables du courant maximum de décharge électrique associés à V et d	67
IV.3.1.2.1. Comparaison entre le modèle polynomial du courant maximum de décharge électrique mono et le double variable associé à V et d	68

IV. 3.1.2.2. Application du modèle polynomial du courant maximum de décharge électrique quadratique à deux variables pour les gammes V et d de 10 à 50 kV et de 1.9 à 8 cm respectivement.....	71
A. Test du modèle polynomial quadratique à deux variables du courant maximum de décharge électrique au centre des gammes V et d de 10 à 50 kV et 1.9 à 8 cm respectivement.....	72
B. Modèle quadratique à deux variables du courant maximum de décharge électrique sur les gammes V et d de 10 à 50 kV et 1.9 à 8 cm respectivement.....	73
IV.3.1.3. Modèles polynomiaux monovariabiles du courant maximum de décharge électrique associés à t, t' et t''	74
IV.3.2. Modèle gaussien.....	76
IV.3.2.1. Modèles gaussiens du courant maximum de décharge électrique associés à t, t' et t''	76
A. Comparaison entre le modèle polynomial et gaussien pour les variables indépendantes t, t' et t''	79
B. Validation du modèle gaussien pour t, t' et t''	81
IV.4. Conclusion	85
Conclusion générale.....	87
Références bibliographiques	

L'isolation électrique est un élément critique dans les appareils fonctionnant sous haute tension [1]. En effet, la durée de vie de ces appareils est intimement liée à leur isolation électrique [2,3]. Ainsi, un bon système d'isolation est associé au choix des matériaux isolants qui doivent résister aux différentes contraintes électriques et mécaniques. Les contraintes électriques influent directement sur l'isolation électrique et ceci à cause des décharges électriques qu'elles engendrent [3,4]. Il est donc bien connu que l'objectif de tout ingénieur chargé de concevoir une isolation électrique est d'éviter l'initiation d'une décharge partielle (DP) ou l'établissement d'un arc électrique entre deux pièces portées à des potentiels différents [5]. Cependant pour éviter les contournements, il faudrait au moins pouvoir les prévoir et l'élaboration de lois de prédétermination générales nécessiterait une meilleure compréhension des mécanismes physiques fondamentaux de la décharge électrique [6,7]. Dans ce contexte, l'amélioration des connaissances sur les processus physiques fondamentaux des décharges électriques au niveau de la triple jonction (TJ) ou point de jonction entre trois matériaux différents métal/air/solide isolant est nécessaire si l'on veut augmenter la fiabilité du transport de l'énergie électrique par voie aérienne. La présence d'une triple jonction peut être considérée comme la principale cause de la rupture d'une isolation électrique [1-2]. En effet, cette triple jonction constitue souvent un point faible de l'isolation électrique. Ceci est dû au renforcement localisé du champ électrique, ce qui peut donner naissance à des décharges partielles.

Dans cette étude, nos investigations sont menées en vue de comprendre les différents phénomènes engendrant et gouvernant les décharges électriques pouvant être générées au niveau de la triple jonction métal/air/solide. Cette dernière étant fréquente au niveau des isolateurs utilisés dans le transport aérien de l'énergie électrique. Ainsi, l'objectif de notre travail est d'effectuer une étude paramétrique des décharges électriques surfaciques pré-disruptives sur des isolateurs soumis aux contraintes électriques. La nature de l'isolateur est prise en considération à travers le matériau le constituant. Dans un premier temps, une étude expérimentale des décharges surfaciques est menée sur des isolants de natures différentes et provenant d'isolateurs utilisés en haute tension. Cette étude est suivie d'une modélisation

mathématique des décharges électriques à la jonction triple. Ceci nous permettra de prédire les différents phénomènes pouvant survenir sur un matériel électrique sans recourir à l'expérience qui, des fois est lente ou impossible à réaliser.

Dans le premier chapitre, nous abordons un état de l'art concernant la physique de la décharge surfacique à la triple jonction métal/air/ solide isolant.

Le deuxième chapitre est consacré à une étude expérimentale des décharges électriques à la surface de trois matériaux provenant des isolateurs utilisés en haute tension : silicone, porcelaine et verre trempé.

Le troisième chapitre est dédié à la conception d'un modèle de régression. Dans ce chapitre, nous nous sommes familiarisés avec les principaux outils de modélisation ainsi que les approches de programmation afin de les développer et les appliquer à notre domaine d'étude.

Dans le quatrième chapitre, nous développerons des modèles de régression pour prédire la décharge électrique à la triple jonction dans les isolateurs électriques. Nous établirons des modèles mathématiques polynomiaux et gaussiens du courant de décharge afin de permettre d'organiser au mieux les essais qui accompagnent nos recherches et mettre en évidence les paramètres et leurs interactions au niveau de la triple jonction.

Ce travail se termine par une conclusion générale où nous donnerons l'essentiel de nos résultats. Nous y donnerons également les perspectives ouvertes par ce travail.

Chapitre I

Physique de la décharge surfacique à
la triple jonction métal/ air/ solide
isolant.

I.1. Introduction

Différentes contraintes électriques, mécaniques, thermiques et environnementales affectent, à des degrés différents le matériel électrique. Dans ce chapitre, nous prenons en considération plus particulièrement les contraintes électriques. En appliquant un champ électrique aux différents points (ou zones) d'une structure isolante, des décharges électriques prennent naissance à la surface ou dans le volume de l'isolant, plus précisément dans les défauts, il se forme alors un arc électrique ou un contournement.

Les points triples composés d'un métal, d'un isolant solide et d'un gaz sont très présents dans les équipements haute et moyenne tension. Les propriétés du solide isolant et du type de gaz ainsi que la pression et la température de ce dernier influencent la rigidité diélectrique des structures isolantes dans lesquelles le point triple est présent. La connaissance du comportement de ces structures isolantes face aux différentes contraintes auxquelles elles sont exposées, notamment les décharges électriques se développant dans le volume ou à la surface isolante s'avère nécessaire. Dans ce chapitre, nous évoquons les aspects fondamentaux relatifs aux décharges électriques survenant au niveau du point triple que nous appellerons dans ce qui suit triple jonction ou TJ par abréviation. Nous nous intéressons d'abord aux phénomènes de décharge dans l'air puis aux principaux mécanismes conduisant au claquage des isolants solides. Nous abordons ensuite de manière succincte l'état de l'art des décharges à la triple jonction métal/air/solide isolant.

I.2. Phénomènes de décharges dans l'air

I.2.1. Généralité sur l'air

Dans l'isolation électrique, le gaz le plus considéré et le plus couramment employé est l'air. Cependant, d'autres gaz, comme l'azote (N_2) et l'hexafluorure de soufre (SF_6), sont employés depuis longtemps dans le domaine des systèmes d'isolation à haute tension (station blindée, câble isolé au gaz ...etc). Leur utilisation augmente la fiabilité du système et réduit son poids et sa taille [1].

Sous l'action d'agents ionisants naturels ou artificiels, le gaz et plus particulièrement l'air peut être privé de ses propriétés diélectriques et devenir plus ou

moins conducteur. Ceci provoque la séparation des molécules neutres en électrons et en ions. L'application d'un champ électrique à un système d'électrodes portées à des potentiels différents, en présence de l'air, provoque un mouvement de porteurs de charge qui génère un courant électrique appelé courant de décharge. Townsend a initialement étudié la variation de ce courant avec la tension (caractéristiques courant-tension) [1]. Cependant, on constate qu'en fonction du niveau de la tension appliquée aux électrodes, la présence d'un champ électrique dans l'espace inter-électrodes (air) peut provoquer des décharges autonomes ou non autonomes.

I.2.2. Décharges électriques dans l'air

L'air est pris comme un isolant idéal étant donné qu'il ne contient qu'une très petite quantité de porteurs de charge. En appliquant un champ électrique suffisant, un courant important est systématiquement détecté, ce qui se traduit par une décharge électrique provoquant un claquage dans l'air. Cette décharge et ce claquage électrique peuvent être différents dans leurs processus et propriétés et ceci selon les conditions expérimentales (pression, distribution du champ électrique, type de tension appliquée, ... etc.) [1].

I.2.2.1. La décharge de Townsend

Dans l'air, en appliquant un champ électrique sur un électron libre, ce dernier est accéléré sous l'effet de la force électrostatique donnée par la loi de Coulomb :

$$F = q * E \quad (I.1)$$

Avec : q la charge électrique et E le champ électrique.

A partir d'une valeur définie du champ électrique, si un électron entre en collision avec un atome ou une molécule d'air, cet électron a suffisamment d'énergie pour l'ioniser. Les nouveaux électrons seront accélérés sous l'effet du champ électrique et peuvent ioniser des atomes ou des molécules d'air. Le nombre d'électrons libres augmente alors rapidement car les nouveaux électrons libres en entraînent à nouveau

d'autres dans un phénomène appelé avalanche électronique.

En 1914, Townsend a proposé l'introduction d'un coefficient d'ionisation « α » appelé premier coefficient de Townsend en vue de traduire mathématiquement ce phénomène d'ionisation. Ce coefficient dépend du champ réduit « E/N » (avec N désignant la densité du gaz). L'apparition d'un électron primaire au niveau de la cathode se traduit par l'arrivée de « $\exp(\alpha d)$ » électrons au niveau de l'anode.

La relation de Townsend s'écrit alors :

$$I = I_0 \exp (\alpha d) \quad (\text{I.2})$$

Avec I : Courant (A),

I_0 : Courant initial dû aux électrons primaires (A),

d : Distance inter-électrodes (m),

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

La série d'avalanches continues formées dans tout l'espace inter-électrodes est la base du critère de claquage [2].

I.2.2.2. La décharge de streamer

La série d'avalanches (électrons initiaux multipliés par le phénomène d'ionisation) développées dans l'espace inter-électrodes est considérée comme étant le mécanisme pouvant expliquer le phénomène de claquage de type Townsend. Ce mécanisme est appelé la décharge streamer [3-5]. En effet, la création d'une décharge électrique nécessite la présence des particules chargées dans l'air. Ces particules chargées notamment d'électrons, généralement libérés par un atome métastable retrouvant son état d'équilibre ionisant des molécules d'air (selon l'équation I.3), seront accélérées sous l'effet du champ électrique en direction de l'anode. Au cours de leur dérive, ils vont entrer en collisions ionisantes avec les molécules neutres de l'air, contribuant ainsi à la croissance de l'avalanche électronique contenant N_e électrons (équations I.4 et I.5). Dès qu'une charge d'espace suffisante s'accumule, l'avalanche électronique se propage de l'anode à la cathode et ce, sous l'effet du champ électrique

de la charge d'espace formant ainsi des streamers, ce qui se traduit par une décharge électrique [5-8].

$$A + \eta v A^+ \rightarrow e^- \quad (I.3)$$

$$N + e^- N^+ \rightarrow 2 e^- \quad (I.4)$$

$$Ne = \exp \int_{\alpha}^l (\alpha - n). dt \quad (I.5)$$

α : étant le premier coefficient de Townsend définissant le nombre moyen de paires d'ion-électron créés par un électron primaire sur une distance parcourue d'un centimètre, dans la direction du champ électrique,

n : représente le facteur d'attachement dans l'air,

η : est la viscosité dynamique telle que $\eta = 13.3 \text{ V/mm}^2/\text{s}$ pour l'air,

v : est la vitesse des électrons.

I.2.3. Tenue diélectrique de l'air

A pression atmosphérique, l'air a une tenue diélectrique d'environ 30 kV/cm. La rigidité diélectrique relative de quelques gaz par rapport à l'air, à pression atmosphérique, pour une distance inter-électrodes de 1 cm est donnée dans le tableau I.1.

Tableau I.1 : Rigidité diélectrique relative de quelques gaz par rapport à l'air [9]

Symbole	Masse (g)	Masse volumique à 0 °C (kg/m ³)	Température de fusion (°C)	Température d'ébullition (°C)	Conductivité thermique à 0 °C (en 10 ⁻³ W/m · K)	Rigidité diélectrique
Air	28,96	1,292 9	.....	.....	23,547	1
O ₂	31,999	1,429	- 218,4	- 182,962	23,965	0,91
CO ₂	44	1,977	- 56,6 (5,2 bar)	- 78,6	14,101	0,75
N ₂	28,013	1,251	- 203,8	- 195,8	23,530	1
H ₂	2,016	0,089 9	- 259,14	- 252,8	169,565	0,45
CCl ₃ F ₃	104,46	.....	- 181	- 81,1	34,6 (liquide)	1,7
CCl ₂ F ₂	120,91	1,4 (à 57 °C)	- 158	- 29,79	73	2,4
CH ₂ F ₃	70,01	1,52 (à - 100 °C)	- 160	- 82,2	13,8 (liquide)	1,06
CCl ₃ F	137,37	1,467 (à 25 °C)	- 111	+ 23,82	8,374	4
CH ₄	16,04	0,554 7	- 182	- 164	29,76	1
CF ₄	87,99	3,034	- 150	- 129	69,16 (liquide)	1,25
N ₂ O	44,01	1,977	- 90,8	- 88,5	14,67	1,14
C ₈ F ₁₆ O	416	.....	- 113	+ 101 à + 104	.....	> 5 à 60 °C et 0,8 bar
C ₃ F ₈	188,02	.....	- 183	- 36	16	2,2
c-C ₄ F ₈	200,04	.....	- 38,7	- 4	.....	3,5
SF ₆	146,05	6,602	- 50,5	- 63,8	140,68	2,5
C ₂ F ₆	138,01	1,59 (à - 78 °C)	- 100,6	- 79	16,96	1,6
C ₂ Cl F ₅	154,48	.....	- 106	- 38,7	13,9	2,8
C ₂ Cl ₂ F ₄	170,92	1,455	- 94	+ 3,6	11,56	2,8
C ₄ F ₈	200,04	1,529 7	- 129	- 3	.....	4,5
He	4	0,178 5	- 272,2	- 268,9	139,63	0,14
Ar	39,948	1,784	- 189,2	- 185,7	16,27	0,27

Dans les conditions réelles, les paramètres suivants influencent la rigidité diélectrique de l'air :

- la pression et la température, autrement dit la densité de l'air.
- Le taux d'humidité dans l'air : la rigidité diélectrique de l'air baisse avec l'humidité dans l'air. Cela est dû à la vapeur d'eau apte à canaliser les électrons libres.
- La présence de charges d'espace dans l'air : la charge d'espace est prise en considération dans la polarité des électrodes influençant la répartition du champ électrique. Le claquage d'un intervalle d'air survient à une tension plus élevée en polarité négative qu'en polarité positive. Cette tendance est inversée dans le cas de l'apparition des décharges électriques.
- Dans le cas d'un champ électrique divergent, l'inclusion d'un solide diélectrique dans l'espace inter-électrodes peut améliorer la rigidité diélectrique de l'air et donc du système d'isolation. Plus la barrière est proche de l'électrode à faible rayon de courbure, plus elle est efficace [10].

I.2.4. Facteurs influençant la tenue diélectrique dans l'air

L'industrie s'intéresse fortement aux phénomènes tendant à modifier la tenue diélectrique dans l'air outre les facteurs connus (pression, température, humidité, impuretés, etc.). En effet, la tenue diélectrique de l'air est abaissée en présence d'un champ électrique fortement divergeant, ceci se traduit par l'apparition de décharges localisées, streamers et leaders. La tension de claquage dans l'air est inférieure à la tension de Paschen si le champ de propagation du streamer est inférieur au champ critique de l'air. Donc, et d'après Paschen, la réduction de la tension de claquage est le résultat de la formation d'un canal précurseur [11].

I.3. Les matériaux diélectriques solides

Parmi les matériaux diélectriques solides, on trouve :

- le verre, utilisé pour fabriquer des isolateurs des lignes hautes tension (verre trempé);
- la céramique, très utilisée pour les matériels HTB des postes électriques ;
- la plupart des plastiques ;
- le Polypropylène, utilisé plus particulièrement dans les condensateurs.

Les matériaux diélectriques solides présentent de nombreuses caractéristiques électriques. En effet, les atomes qui constituent le matériau diélectrique solide peuvent présenter des dipôles électrostatiques qui sont susceptibles d'interagir avec un champ électrique. Cette interaction se traduit par la création d'une polarisation reliée à ce champ électrique, décrite généralement par la polarisabilité au niveau microscopique et par la susceptibilité électrique au niveau macroscopique [12].

I.3.1. Grandeurs caractéristiques des matériaux diélectriques solides

Les matériaux diélectriques solides sont caractérisés en particulier par :

- leur permittivité diélectrique ϵ_r ;
- leur rigidité diélectrique.

1.3.1.1. Permittivité diélectrique

La permittivité diélectrique également nommée constante diélectrique est une constante physique notée ϵ_r . La permittivité diélectrique décrit le facteur par lequel le champ électrique entre les charges est diminué par rapport au vide. Plus la constante diélectrique est élevée, plus la force entre les deux charges électriques séparées par ce diélectrique est faible [13-14].

1.3.1.2. Rigidité diélectrique

La rigidité diélectrique ou champ disruptif d'un milieu isolant représente la valeur maximum du champ électrique que le milieu peut supporter avant le déclenchement d'un arc électrique. Autrement dit, si le champ électrique dépasse la valeur de la rigidité diélectrique du matériau, l'élément est détruit et on aura une valeur maximale de la tension électrique appliquée à ses bornes appelée tension de claquage.

I. 4. Phénomènes de la décharge à la TJ

I. 4.1. Processus de décharge

La jonction gaz/solide isolant/électrode (TJ) est généralement le point faible de l'isolation électrique où le renforcement localisé du champ électrique provoquera le développement d'une décharge électrique. En effet, au niveau du point de contact entre

l'électrode métallique (électrode portée à la haute tension), les solides isolants et les gaz (ici, le gaz considéré est l'air), apparaissent les TJs (Figure I.1).

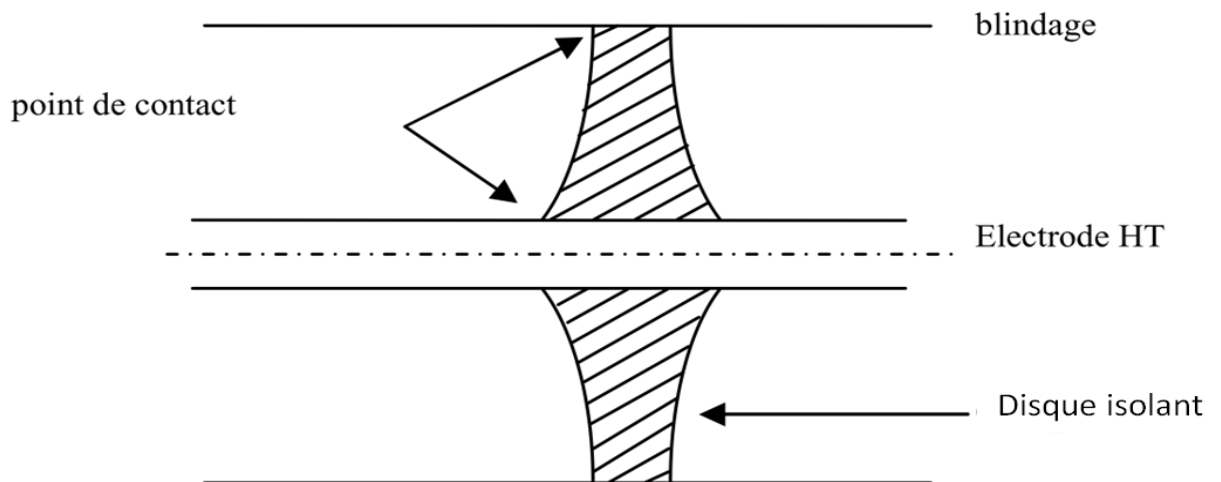


Figure I.1. Exemple de triples jonctions : le disque de support dans un poste électrique sous enveloppe métallique PSEM [15].

Dans un poste électrique, sous enveloppe métallique (PSEM) et câble à isolation gazeuse (CIG), l'électrode HT coaxiale doit être supportée par un isolant. La distribution du champ électrique à proximité de l'interface de contact plus particulièrement aux deux points de contact P et Q dépend de la géométrie et de la constante diélectrique du matériau (figure I.2), ce qui se traduit généralement par une augmentation du champ électrique dans le milieu ayant la constante diélectrique la plus faible (l'air) [15].

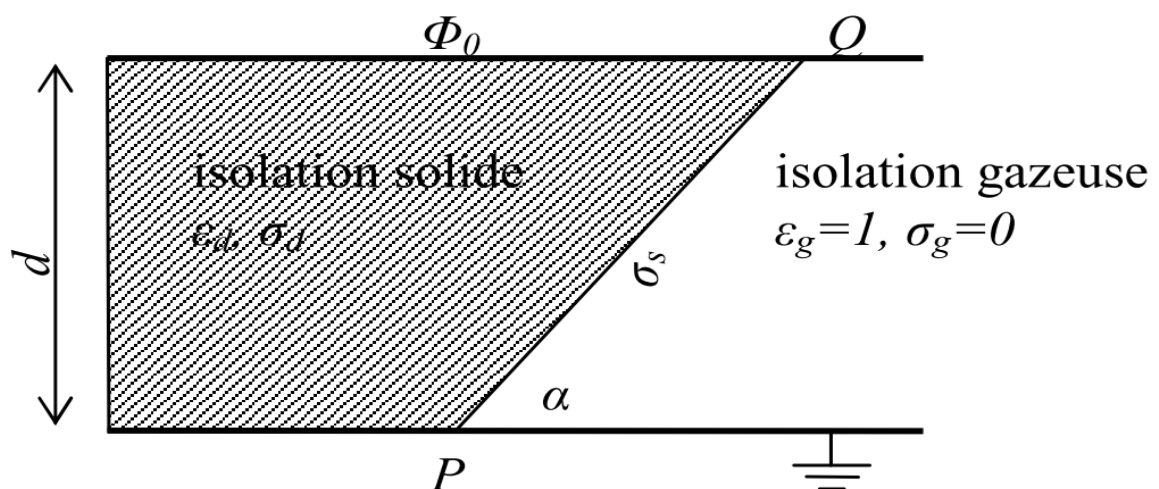


Figure I.2. Schéma 2D utilisé dans les calculs du champ dans une TJ [15].

Sur la figure I.2 :

Φ_0 est la différence de potentiel entre les électrodes ;

ϵ_d est la constante diélectrique du solide isolant ;

σ_d représente la conductivité volumique de l'isolant ;

σ_s est la conductivité de surface de l'isolant.

Le modèle illustré par la figure I.2 décrit les caractéristiques générales de l'effet de la conductivité sur le comportement du champ électrique à proximité d'une TJ où l'angle de contact est compris entre 0 et $\pi/2$.

La géométrie de la TJ est montrée dans la figure I.3. Les capacités du circuit équivalent de la TJ dessinées sur cette figure étant dépendantes de la position de la décharge électrique et de sa surface d'impact sur l'isolant solide, il n'est pas toujours aisé de les déterminer pratiquement [16].

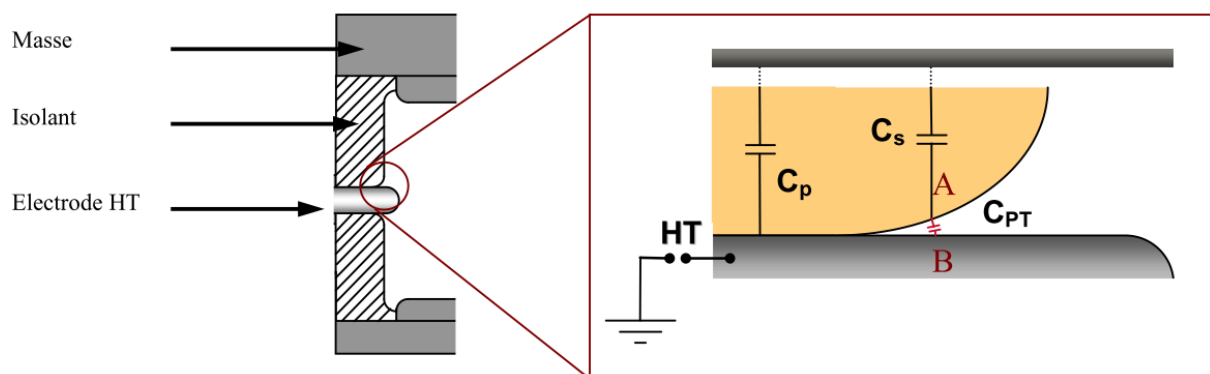


Figure I.3. Représentation schématique de la zone du TJ [16]

Les décharges qui se produisent à la surface des isolants solides au niveau de la TJ dépendent de la disposition de l'électrode portée à la haute tension par rapport à l'intervalle d'air et l'isolant solide. Ces décharges apparaissent lorsqu'il y a un fort champ tangentiel sur la surface isolante. On distingue deux types de décharges [17] :

- La décharge à barrière diélectrique (DBD) : la décharge est d'abord générée dans le volume de l'air avant de se propager sur la surface solide (Figure I.4) ;
- La décharge glissante (voir figure I.5) qui fait référence à la décharge qui se produit en présence d'un diélectrique solide placé dans l'air.

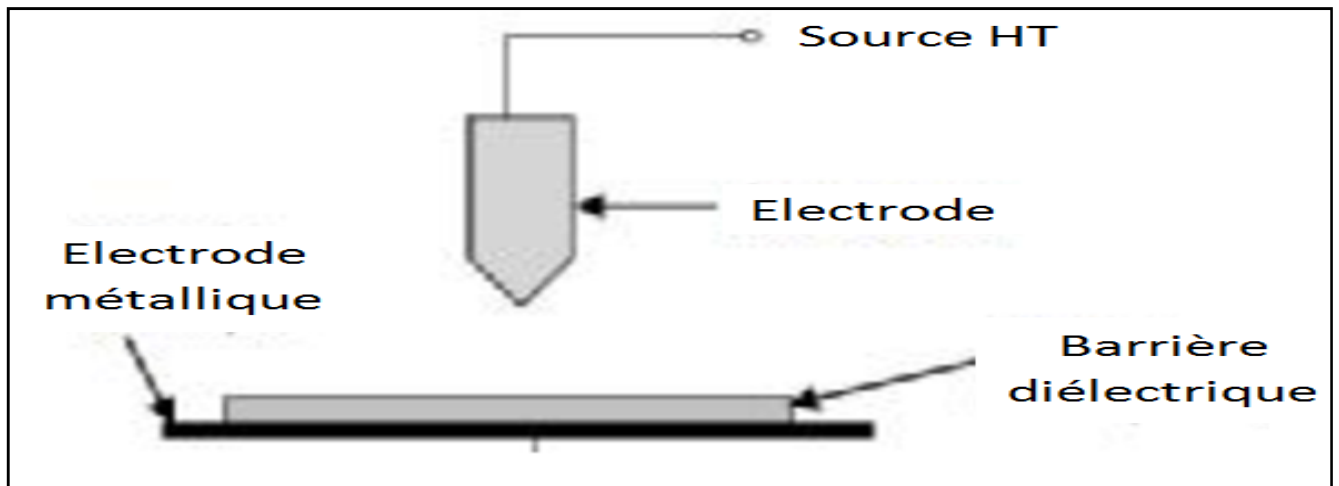


Figure I.4. Système à décharge barrière diélectrique (DBD).

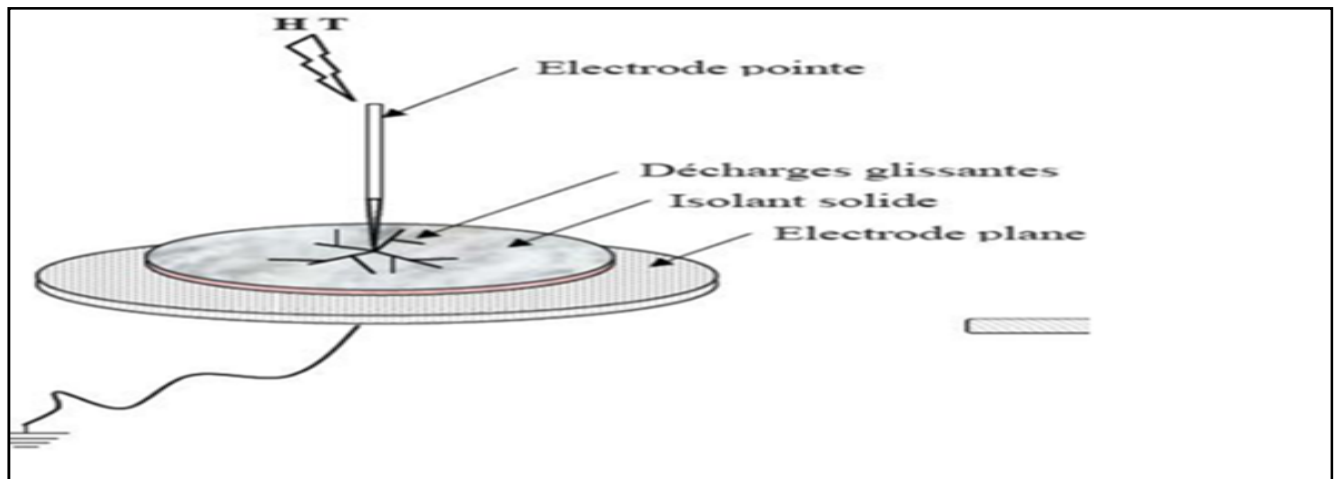


Figure I.5. Système à décharges glissantes.

On appelle donc décharge glissante ou encore décharge de surface, la décharge où les surfaces isolantes sont directement exposées à la décharge électrique autrement dit l'isolant solide entre en contact avec l'électrode portée à la haute tension.

Le développement de la décharge est modifié par la présence d'un isolant sur la surface de l'électrode. Dans la figure I.6 [18], un ensemble de condensateurs a été obtenu avec des plaques d'air parallèles en utilisant la configuration dite condensateur de coin, ce qui a permis de faire les observations suivantes : le changement provoqué par l'introduction de la paroi isolante dans l'espace entre les deux électrodes (air) n'a aucun lien avec l'amorçage de la décharge, mais plutôt avec la disparition de la décharge.

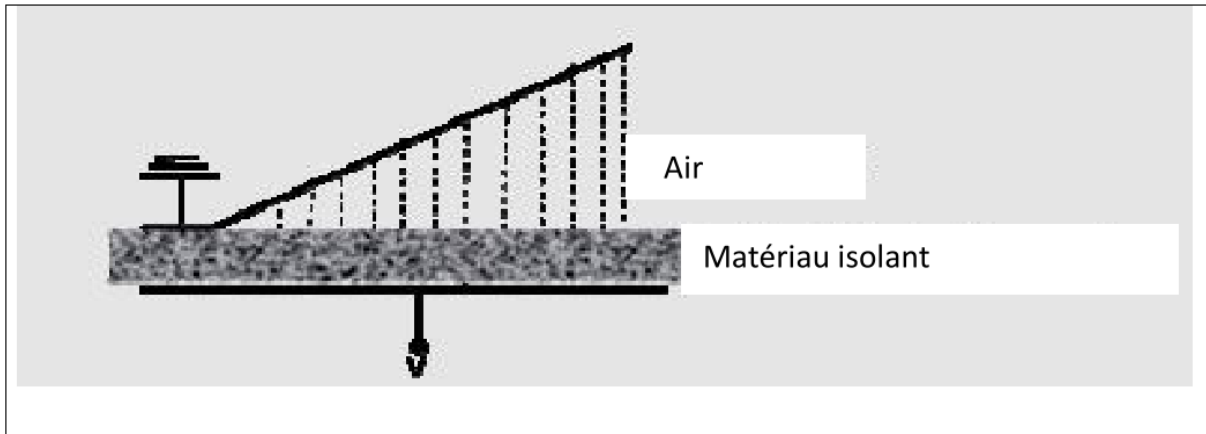


Figure I.6. Schématisation d'une combinaison TJ métal-air-isolant.

Modèle du condensateur de coin [18].

En effet, il a été observé que si une décharge se produit entre deux parois conductrices, elle suit toujours un seul chemin et peut atteindre une énergie élevée. Si l'une des parois est isolée, la décharge sera divisée en plusieurs faibles décharges individuelles. L'énergie d'une décharge individuelle répartit la charge sur toute la surface. Cette dispersion indique que la décharge a été éteinte presque immédiatement après son amorçage pour trouver d'autres voies plus favorables [18].

I.4.2. Champ électrique à la TJ

La figure I. 7 montre l'intensité du champ électrique le long de la surface diélectrique solide pour trois valeurs de la permittivité relative du solide isolant ϵ_d .

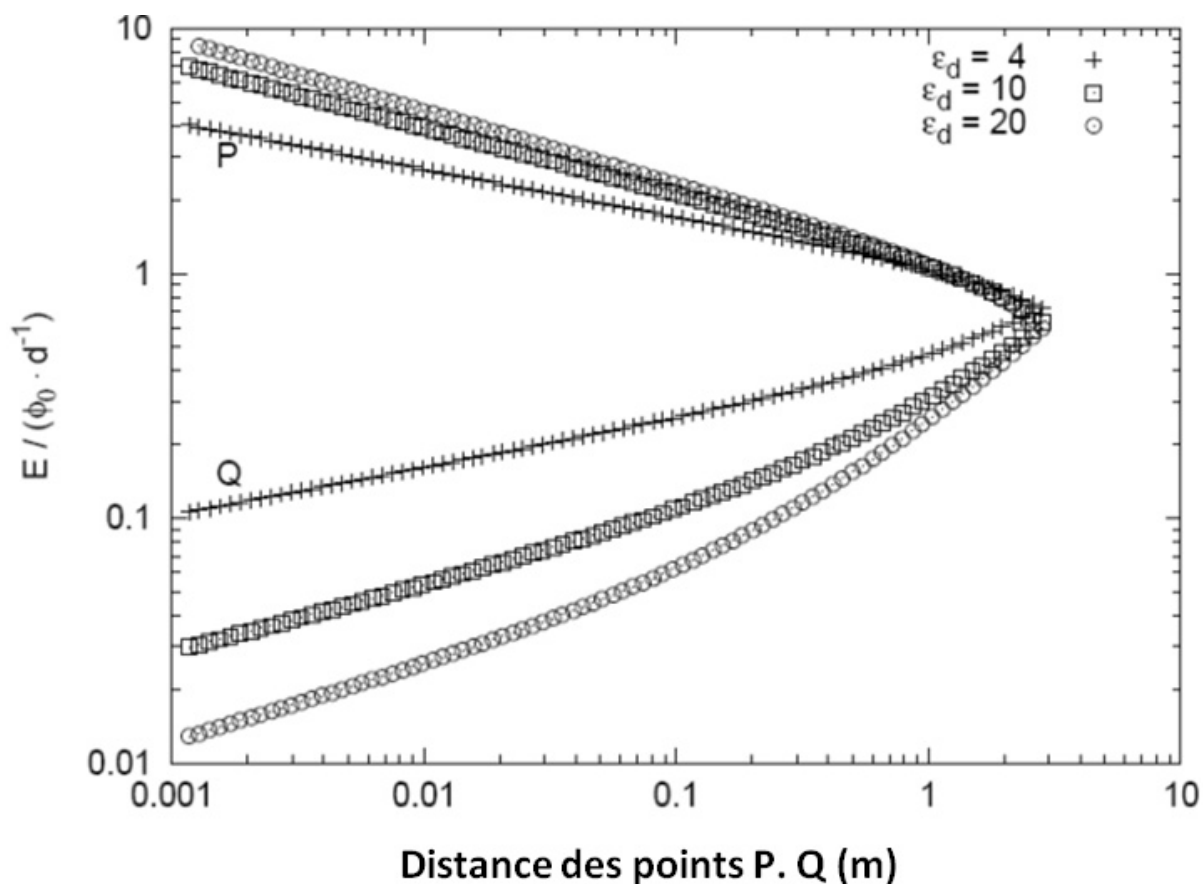


Figure I.7. Variation du champ électrique sur la surface de l'isolant (côté isolant) en fonction de la permittivité ϵ_d [15].

La figure I.7 montre que le champ électrique est normalisé par $\phi_0 d^{-1}$ (ϕ_0 est la différence de potentiel entre les deux électrodes et d est la distance inter-électrodes). En outre, le champ électrique est homogène ou uniforme lorsque les permittivités $\epsilon_d = \epsilon_g$ avec $\epsilon_g = 1$. D'autre part, il est clair que le champ électrique se rapproche de l'infini en P et de zéro en Q [15].

Cependant, une conductivité de surface peut surgir en raison de la présence de particules ou d'humidité et de la pollution dans l'air. Par ailleurs, l'isolant n'est pas parfait et la conductivité volumique n'est pas nulle. La conductivité surfacique au point de contact montre que le champ électrique est nul ou infini. En effet, on voit sur la Figure I.8 b que quelle que soit la valeur de la conductivité surfacique aux deux points de contact P et Q, le champ électrique se rapproche de l'infini en P et de zéro en Q. Par ailleurs, la présence de conductivité volumique (Figure I.8 a) augmente la singularité du champ électrique [15].

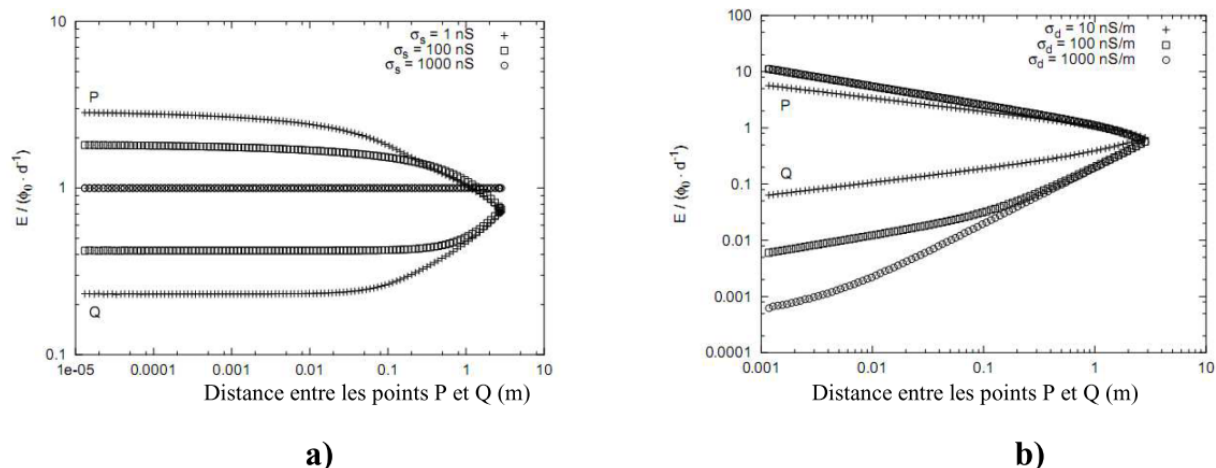


Figure I.8. Variation du champ électrique sur la surface de l'isolant (côté isolant) en fonction de a) la conductivité volumique, b) la conductivité surfacique [15].

I.4.3. Calcul de la tension d'apparition des décharges électriques à la TJ

I.4.3.1. Méthode conventionnelle

Habituellement, la condition de décharge dans le voisinage de la TJ se base sur le critère de Townsend donné par l'expression ci-dessous :

$$\frac{\alpha}{p} pd = \ln \left(1 + \frac{1}{\gamma} \right) \quad (\text{I. 6})$$

Il y a trois difficultés dans cette méthode conventionnelle [19] :

- Il n'y a pas de données expérimentales de $\frac{\alpha}{p} = f\left(\frac{E}{p}\right)$, où E est le champ électrique, p est la pression et α est le nombre d'électrons produits sur le trajet d'un seul électron parcourant une distance inter-électrodes d de 1 cm. Cela est d'autant plus valable pour des valeurs très élevées du champ électrique à proximité de la TJ dans l'air. Pour déterminer ce critère de claquage, Pedersen [20] a proposé différents algorithmes pour le calculer.
- Les résultats doivent être recalculés à chaque fois que le champ dans la zone étudiée est varié (la tension appliquée est variée) et ceci pour chaque pression.

I.4.3.2. Méthode de la tension de Paschen

Afin de prédire le seuil de la tension de décharge et la position de la décharge, une méthode de simulation facilitant les calculs a été utilisée. Dans la zone de la TJ, le champ électrique est quasi uniforme et c'est la raison pour laquelle cette méthode a été particulièrement adaptée à l'étude des décharges électriques. La courbe de Paschen a été exploitée pour calculer la tension d'amorçage et la position de la décharge électrique, tandis que le logiciel de calcul des champs (FEMM ou QuickField) a été utilisé pour calculer le champ électrique.

I.4.4. Mécanisme de claquage à la TJ

I.4.4.1. Décharges électriques

La décharge électrique signifie le passage du courant à travers un diélectrique. Dans le processus d'une décharge électrique, les électrodes sont reliées par au moins un chemin à conductivité élevée [21]. Les décharges électriques dans les isolants solides à partir de la TJ sont moins visibles mais sont importantes pour certains matériaux. Elles apparaissent localement dans le même diélectrique, à proximité des électrodes et à proximité des discontinuités où le champ électrique est très inhomogène (figure I.9) [16].

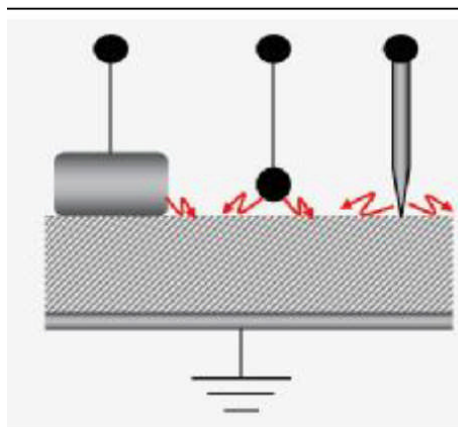


Figure I.9. Décharges électriques à la jonction triple [16].

I.4.4.2. Claquage électrique

Après le claquage d'un isolant solide, une trace du claquage sous forme de perforation, de fonte ou de brûlure sur le diélectrique peut rester et donner une forme

irrégulière à l'isolant. Si une tension est de nouveau appliquée à cet isolant, un claquage survient dans la majorité des cas, suivant le canal tracé par la décharge précédente et même à une tension inférieure. Donc un arc qui survient dans les isolants solides nécessite le remplacement des ces derniers. Chaque type de matériau possède une résistance au claquage (rigidité diélectrique) différente des autres. Nous donnons dans ce qui suit, les principaux mécanismes régissant le claquage de l'isolation solide.

I.4.4.2.1. Le claquage électromécanique

Une pression électrostatique excessive exercée par les électrodes sur l'isolant fait diminuer l'épaisseur de la couche isolante, ce qui conduit à une augmentation du champ électrique amplifiant encore l'effet. Cette pression est donc la cause principale du claquage électromécanique. Une rupture se produit si la pression appliquée est supérieure à la résistance à la compression [22-24].

I.4.4.2.2. Le claquage thermique

Une augmentation de la conductivité électrique du matériau avec la température cause un claquage thermique. L'augmentation de la densité de courant provoque des pertes qui conduisent à un échauffement supplémentaire. Le même phénomène a été observé dans des films de condensateurs soumis à des champs électriques continus très intenses (centaines de kV/mm) [22-24].

I.4.4.2.3. Le claquage électronique

Sous des champs électriques très élevés, le claquage électronique peut se produire. Diverses théories où les électrons gagnent beaucoup d'énergie et se multiplient par une avalanche ont été suggérées. Expérimentalement, ce mécanisme n'a pas été vérifié [23, 25].

I.4.4.2.4. Le claquage par arborescence

Une structure filamenteuse ramifiée composée de micro-canaux est la cause principale du claquage par arborescence. La propagation et la modélisation des arborescences électriques sont devenues l'objet de nombreux travaux. Des

renforcements locaux du champ associés à la géométrie pointe/plan utilisée en laboratoire, ou encore aux cavités d'air dans les équipements électriques peuvent générer ces arborescences. Ce qui conduit à la génération des décharges s'étendant à la surface et à l'intérieur du solide isolant [23,24]. Le temps de reproduction des arborescences est augmenté par la présence de charges renforcées et donc le temps de retard au claquage est prolongé mais cela demeure inévitable [21].

I.5. Modélisation de la décharge à la TJ

Les phénomènes de claquage (ou de contournement) dans les diélectriques solides se manifestent le plus souvent par la propagation de décharges constituées de multiples canaux formant des arborescences de formes complexes et diverses. La foudre et les décharges surfaciques sont les exemples les plus répandus. Leur structure générale montre une grande similitude entre les différents types de décharge. Cela suggère que la formation des branches des différents types de décharges serait gouvernée par une loi universelle peu sensible aux détails physiques du phénomène. Ce type d'universalité peut largement simplifier la classification et la description du phénomène de la décharge [26].

A la fin des années 1970, Mandelbrot [26] a proposé le terme de la géométrie fractale pour désigner la forme des figures aléatoires et des figures auto similaires. La géométrie fractale est considérée depuis, comme étant l'une des meilleures descriptions des figures de décharges. Ainsi, les branches et les ramifications, apparemment désordonnées, peuvent être caractérisées et classées quantitativement par la géométrie fractale.

En 1982, Sawada et al [27] ont introduit le modèle stochastique pour décrire les structures ramifiées des décharges. Ils ont aussi analysé les propriétés d'une structure aléatoire à 2 dimensions obtenue par simulation.

Par la suite (en 1984), Niemeyer et al [28] ont élaboré un modèle de maille en treillis des décharges électriques. Dans ce modèle, appelé aussi NPW (Niemeyer, Pietronero et Wiesmann), la probabilité de propagation des décharges est explicitement liée au champ électrique local. Weismann et Zeller [29] ont ensuite introduit plusieurs paramètres du champ électrique au modèle NPW et ont effectué des investigations sur

le caractère stochastique des décharges surfaciques (2 dimensions) développant ainsi le modèle WZ (Weismann et Zeller). Depuis, de nombreux travaux de recherche ont concerné le modèle stochastique des décharges obtenues par simulation [30,31].

I.5.1. Modèle de Sawada et al

Sawada et al [27] ont tenté de simuler le claquage diélectrique en attribuant de manière arbitraire un facteur de priorité à la tête des multiples canaux se propageant sur la surface d'un solide diélectrique. Ce facteur de priorité est défini comme le rapport entre la probabilité de propagation d'une tête et la probabilité de génération d'une branche latérale. Ce facteur de priorité joue un rôle important dans la formation de ces structures ramifiées. Le modèle de Sawada et al est adopté dans une simulation numérique à deux dimensions et la procédure suivie est la suivante :

- La valeur +1 est assignée aux sites de la décharge et la valeur -1 est assignée au périmètre qui l'entoure, c'est-à-dire aux sites qui entourent les sites de la décharge. La valeur 0 est assignée aux sites restants.
- L'un des sites qui porte la valeur -1 est sélectionné pour la décharge en utilisant un nombre aléatoire et les sites adjacents ayant la valeur 0 sont remplacés par la valeur -1.
- Le paramètre utilisé dans la simulation est le facteur de priorité de la pointe R .

La dimension fractale D des structures obtenues en fonction du facteur de priorité de la tête R est illustrée par la figure I.10.

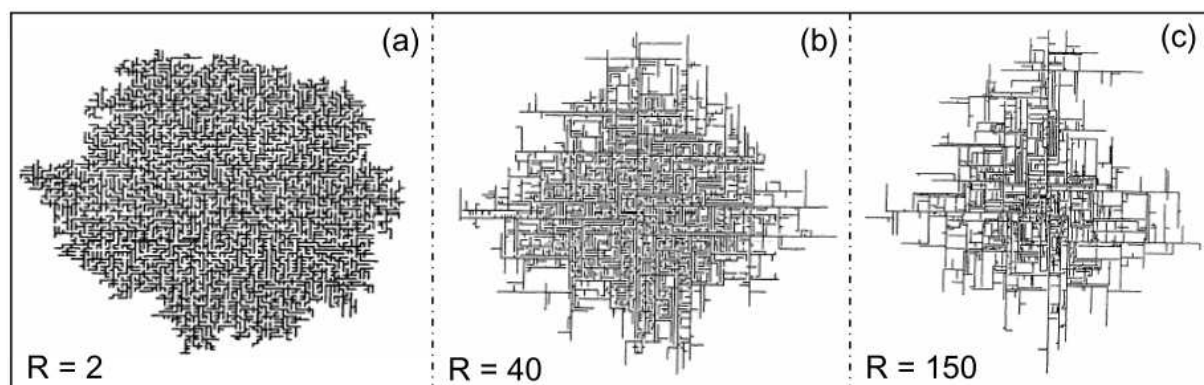


Figure 1.10. Exemples d'arborescences aléatoires obtenues par simulation numérique pour différentes valeurs de R [27].

La figure I.10 montre les résultats de simulation obtenus selon les règles précédemment décrites. La dimension D estimée par la méthode de quadrillage, dépend du facteur de priorité R , ce qui signifie que R joue un rôle important dans le processus de formation de la structure ramifiée.

Cependant, ce modèle comporte un point faible. En plus de négliger l'effet du champ électrique local qui peut en réalité être très important, les structures obtenues ne ressemblent pas aux décharges électriques obtenues expérimentalement et le sens physique du modèle n'est pas très bien soutenu [27].

I.5.2. Modèle de Niemeyer et al (NPW)

Le modèle NPW [28] de Niemeyer et al associe une probabilité de progression des streamers à la surface du solide diélectrique en introduisant la relation :

$$p(i, k \rightarrow i', k') = \frac{(Q_{i', k'})^n}{\sum (Q_{i', k'})^n} \quad (\text{I.7})$$

où i et k sont les indices des points appartenant à la décharge électrique (c'est-à-dire au potentiel $Q = 1$) et i' et k' sont les indices des points susceptibles d'être amorcés pour une branche de la décharge électrique. Le dénominateur représente tous les processus de progression possibles à partir d'un point donné de la décharge. Le paramètre n tient compte de l'inhomogénéité de certains systèmes (solide, gaz). Les auteurs considèrent que la relation entre la probabilité de progression de la décharge électrique et le champ électrique local sont mieux décrits par une fonction non linéaire [28].

La figure I.11 donne une illustration des résultats obtenus par le modèle NPW pour des décharges radiales. Leur dimension fractale correspondante est $D = 1.75 \pm 0.02$.

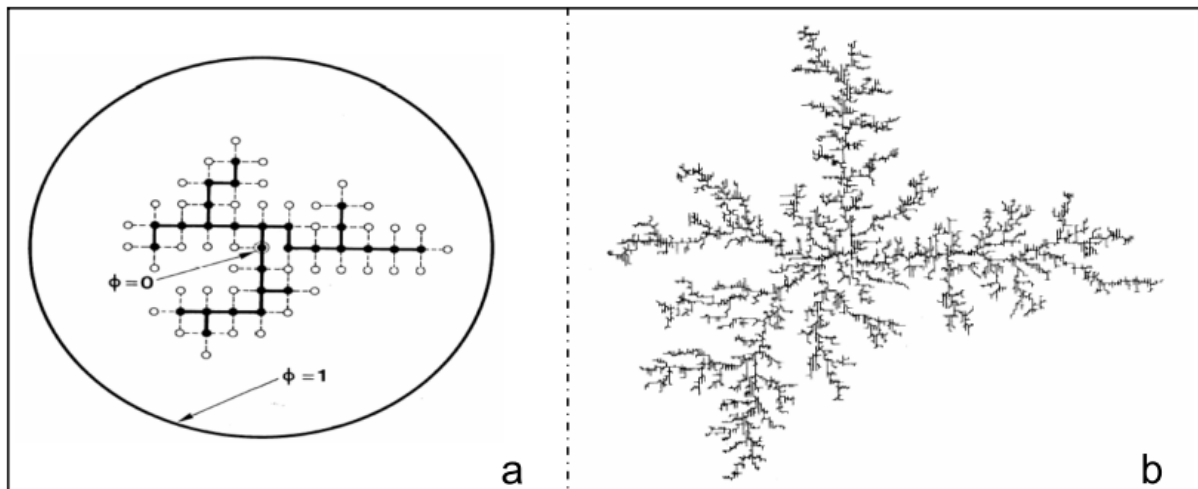


Figure 1.11. (a) Décharge surfacique en treillis obtenue par le modèle de Niemeyer et (b) arborescence générée par simulation numérique [28]

Dans le cas de la simulation des décharges à deux dimensions, quand $n = 0$, la probabilité p ne dépend pas du champ électrique local, ce qui signifie que la progression de la décharge est homogène et sa dimension est $D = 2$ (équivalente à la dimension euclidienne). Dans ce cas, la décharge remplit tout l'espace dans lequel elle évolue.

I.5.3. Modèle de Vicente et al

A partir du modèle de Niemeyer et al [28], Vicente, Razzitte et Mola [32] en ont développé un autre. Dans ce modèle, le processus de propagation de la décharge électrique évolue de la manière suivante : la tête de chaque branche peut amorcer les points environnants en $(i, j \pm 1)$ ou $(i \pm 1, j)$ ainsi que les points se situant en diagonale, c'est-à-dire en $(i \pm 1, j \pm 1)$. La figure I.12 donne une illustration des décharges simulées à l'aide de ce modèle.

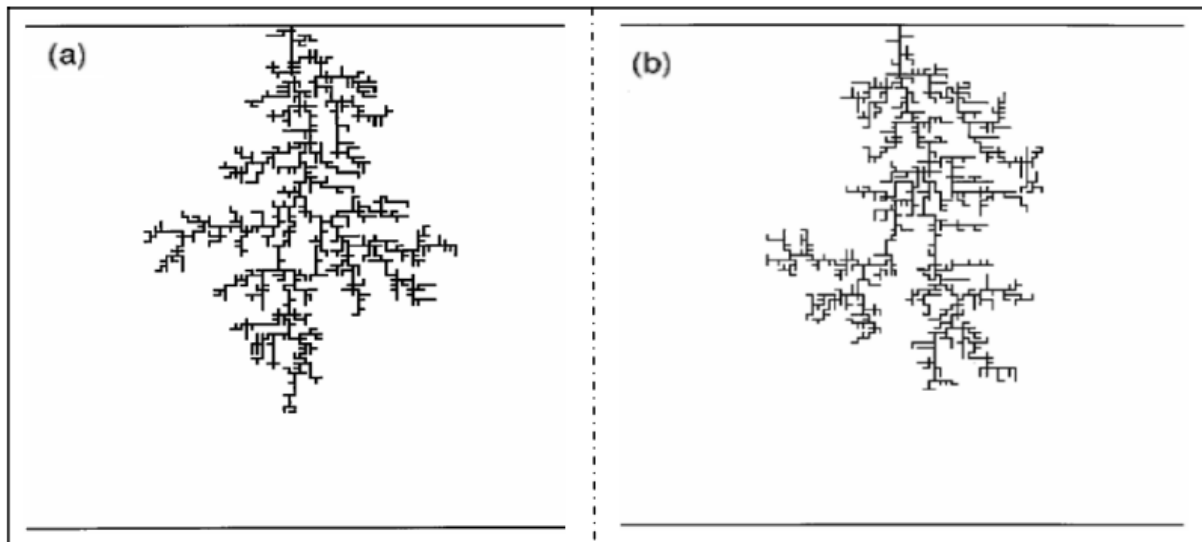


Figure 1.12. Décharges simulées avec le modèle de Vicente et al [32].

La même probabilité de propagation que dans le modèle de Niemeyer a été associée. Lorsque η varie de la valeur minimale à la valeur maximale, la dimension D varie de 1 (cas linéique) à 2 (plan). Cette variation de η a permis de tester le comportement de la dimension dans un modèle à maillage carré avec des liaisons en diagonale.

I.6. Conclusion

Les points triples constituent souvent un point faible de l'isolation au niveau duquel le renforcement localisé du champ électrique, dans le matériau qui a la rigidité diélectrique la plus faible (le gaz), peut induire l'apparition des décharges électriques.

Les mécanismes impliqués dans le développement des décharges se propageant à partir des triples jonctions gaz/solide/métal sont très complexes. Leurs caractéristiques (morphologie, longueur, courant, vitesse ...) dépendent de plusieurs paramètres qui sont principalement les propriétés physiques et géométriques de l'isolant (diélectrique solide).

Chapitre II

Etude expérimentale des décharges
électriques à la triple jonction

II.1. Introduction

Ce chapitre consiste en une étude expérimentale des caractéristiques électriques des décharges glissantes (surfaciées) initiées à la triple jonction métal/air/solide (TJ) et se développant sur différents types d'isolants solides provenant des isolateurs électriques utilisés en haute tension. Ces isolants sont la silicone, la porcelaine et le verre trempé. La triple jonction considérée consiste en une électrode en forme de pointe, en contact avec l'isolant et avec l'air sous pression atmosphérique. Le système d'électrodes utilisé est donc un système pointe plan, la pointe étant reliée à la haute tension alternative et le plan est relié à la terre via une résistance. L'étude expérimentale est réalisée en fonction des paramètres suivants :

- la distance inter-électrodes (d),
- la tension appliquée (V),
- le rayon de courbure de l'électrode active (r),
- le temps d'application de la tension (t),
- l'état de surface de l'isolant solide,
- la permittivité diélectrique de l'isolant solide (ϵ_r).

Pour rendre compte des différents phénomènes se produisant au niveau de la jonction triple, nous mesurons le courant maximal associé à la décharge. Ce courant est enregistré à l'aide d'un oscilloscope à mémoire.

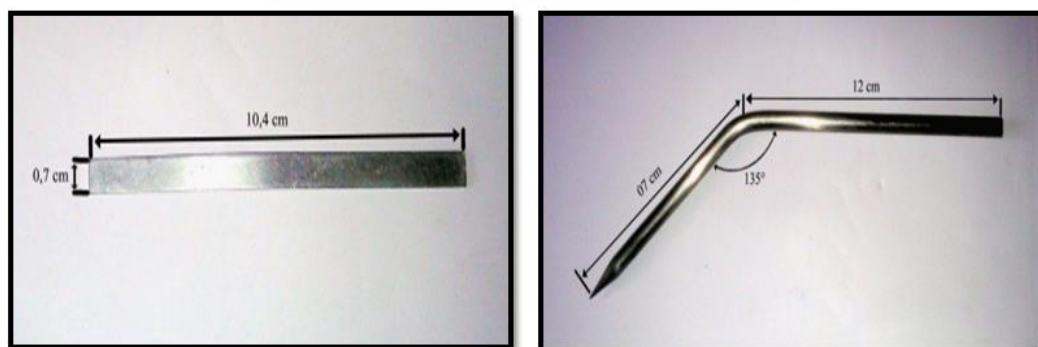
II. 2. Mode opératoire et procédé d'essai

Le dispositif expérimental utilisé pour caractériser les décharges est le même que celui qui a été utilisé dans nos précédents travaux [33]. Ce dispositif est donné sur la figure II.1. Il nous permet de fixer et de faire varier la distance d entre l'électrode pointue et l'électrode plane. L'électrode pointue (figures II.1 et II.2.b) est une tige cylindrique en acier dur Z200 d'une longueur de 19 cm, d'un diamètre de 0.6 cm. La partie droite a 12 cm de longueur et la partie inclinée de 135° a une longueur de 7 cm (figure II.2.a). L'angle entre l'électrode haute tension et la surface de l'isolant solide côté électrode mise à la terre est choisi supérieur à 90° afin que la décharge initiée au niveau du point triple s'oriente vers l'électrode plane. Afin de faire varier le rayon de courbure r de la

pointe, nous avons opté pour la variation de la longueur de la partie pointue. Nous avons réalisé 7 pointes de rayons de courbure : 0.15 mm, 0.18 mm, 0.2 mm, 0.4 mm, 0.6 mm, 0.8 mm et 1 mm. Les rayons de courbure des différentes pointes ont été mesurés à l'aide d'un projecteur de profil (figure II.3), disponible au niveau de l'entreprise Electro-Industries sise à Azazga. L'électrode plane est également en acier dur Z200, de forme rectangulaire, de 10.4 cm de longueur, de 0.7 cm de largeur et de 0.16 cm d'épaisseur (figures II.1 et II.2.a). L'échantillon est posé sur un support en plexiglas supporté par une tige en bakélite que l'on peut faire monter ou descendre grâce à un système de réglage adéquat. Le support de ce système d'électrodes est construit à base de poly-méthyle méthacrylate et de bakélite (figure II.1).



Figure II.1. Dispositif expérimental.



a) Electrode plane.

b) Electrode HT.

Figure II.2. Système d'électrodes utilisé.



Figure II.3. Machine de projection de profil.

Le mode de découpage des échantillons en silicone et en porcelaine est expliqué sur la figure II.4. Concernant les échantillons en verre trempé, nous avons utilisés des isolateurs sans découpage.



a) Coupe verticale. b) Coupe horizontale.

Figure II.4. Mode de découpage des échantillons en silicone et porcelaine.

Les différentes caractéristiques électriques des matériaux utilisés comme isolants solides sont consignées dans le tableau II.1.

Tableau II.1. Caractéristiques électriques des isolants solides utilisés [32]

Matériau / Caractéristique	Silicone	Verre trempé	Porcelaine
Permittivité relative	4.2	5	6
Rigidité diélectrique (kV/cm)	250	230	170
Résistivité superficielle (Ω)	1013	1000	980

II.3. Représentation schématique du montage expérimental

La représentation schématique du montage expérimental utilisé dans notre étude est donnée sur la figure II.5. L'alimentation haute tension est assurée par un transformateur d'essai monophasé dont les caractéristiques sont : 100 kV, 50 Hz, 10 kVA. L'électrode pointue est reliée à la borne haute tension du transformateur d'essai et la contre électrode à la terre. Le transformateur ainsi que le dispositif expérimental sont placés dans une cage de faraday. La variation de la tension se fait à partir du pupitre de commande. Le courant de décharge est obtenu à partir de la tension aux bornes d'une résistance de 48.6 k Ω . Cette tension est relevée au moyen d'un oscilloscope à mémoire numérique d'une impédance d'entrée de 1 M Ω . Pour chaque essai, un échantillon différent a été utilisé. Nos essais se sont déroulés sous les conditions moyennes suivantes :

- Pression atmosphérique : 1010 hPa ;
- Taux d'humidité relative : 63.4% ;

- Température : 15°C.

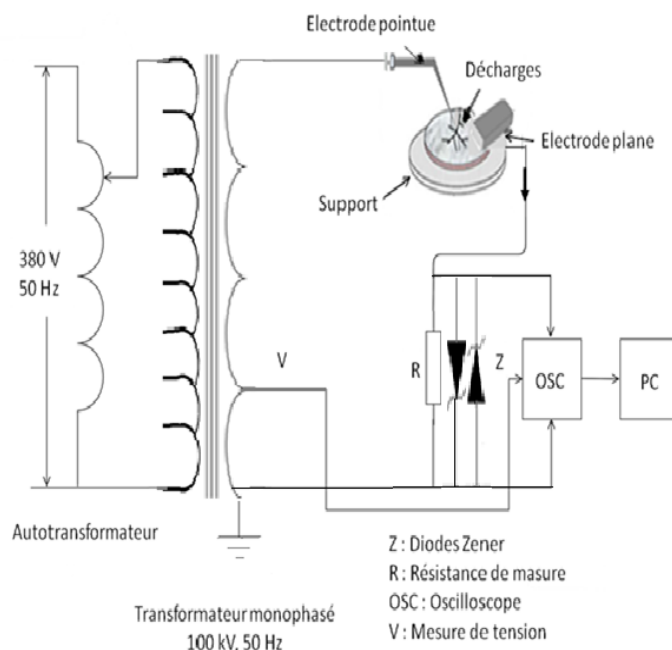


Figure II.5. Représentation schématique du montage expérimental.

II.4. Résultats et discussion

II.4.1. Courant de décharge

❖ Mesure du courant maximum de décharge I_0

Le courant de décharge se présente sous la forme d'impulsions positives et négatives. Il est enregistré à l'aide de l'oscilloscope à mémoire. Les impulsions de courant apparaissent pendant la montée de la tension, ceci étant valable pour l'alternance positive (figure II.6) et l'alternance négative de la tension (figure II.7). La figure II.7 montre que les impulsions négatives apparaissent à une tension inférieure à celle d'apparition des impulsions positives (figure II.6). Ceci est dû au fait que l'initiation du courant de décharge est plus facile en polarité négative de la tension à l'inverse des impulsions positives nécessitant une tension plus élevée. De plus, le nombre d'impulsions négatives est plus important que celui des impulsions positives. Ceci est en parfait accord avec d'autres travaux réalisés dans le cadre de l'étude des caractéristiques de la décharge électrique le long d'un fil isolé aérien sous tension impulsionnelle [34,35]. Nous voyons bien sur la figure II.6 que le premier pic du courant en polarité positive apparaît à l'instant $t = 3\text{ms}$ correspondant à une tension de

15 kV alors que le premier pic en polarité négative est généré sous une tension de 5 kV à l'instant $t = 1$ ms (figure II.7).

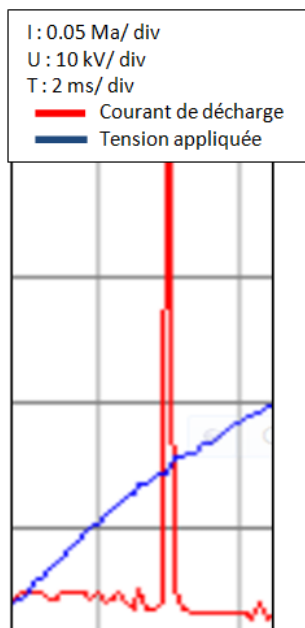


Figure II.6. Forme du courant de décharge en polarité positive.

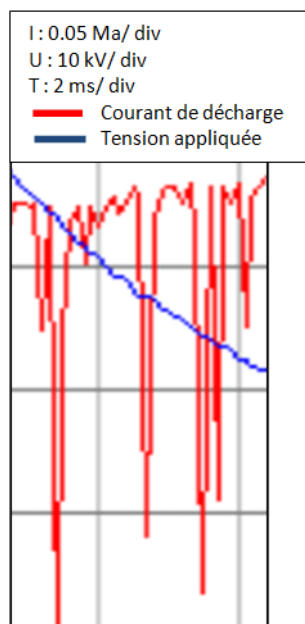


Figure II.7. Forme du courant de décharge en polarité négative.

Par ailleurs, nous enregistrons l'impulsion de courant maximale en utilisant le mode numérique d'acquisition de signaux de l'oscilloscope comme suit :

- En jouant sur la position du curseur du seuil de déclenchement, on détermine l'impulsion maximale pour chaque valeur de la tension appliquée à l'échantillon.

- Pour choisir la polarité de l'impulsion à mesurer, il suffit de placer ce curseur au-dessus de la ligne de référence 0 volt pour la polarité positive et au-dessous de cette dernière pour la polarité négative en adoptant le mode de déclenchement front montant pour la première et front descendant pour la seconde.
- Une fois l'impulsion maximale enregistrée et toutes les données la caractérisant (tableau des valeurs) transmises à l'ordinateur via l'interface RS 232, nous pouvons déterminer l'amplitude de l'impulsion.

Dans ce qui suit, nous nous intéressons uniquement à la mesure du courant maximal associé à la polarité positive de la tension.

II.4.2. Influence de la distance inter-électrodes sur le courant maximum de décharge

Afin d'évaluer l'effet de la distance inter-électrodes d sur le courant maximum de décharge I_0 , nous avons fait varier d entre 1.9 et 3.9 cm. La mesure a été réalisée sous une tension alternative appliquée $V = 12$ kV. Ensuite, le courant I_0 a été mesuré pour un échantillon de chaque matériau objet de nos investigations. Les résultats expérimentaux concernant la silicone, la porcelaine et le verre trempé sont représentés sur la figure II.8.

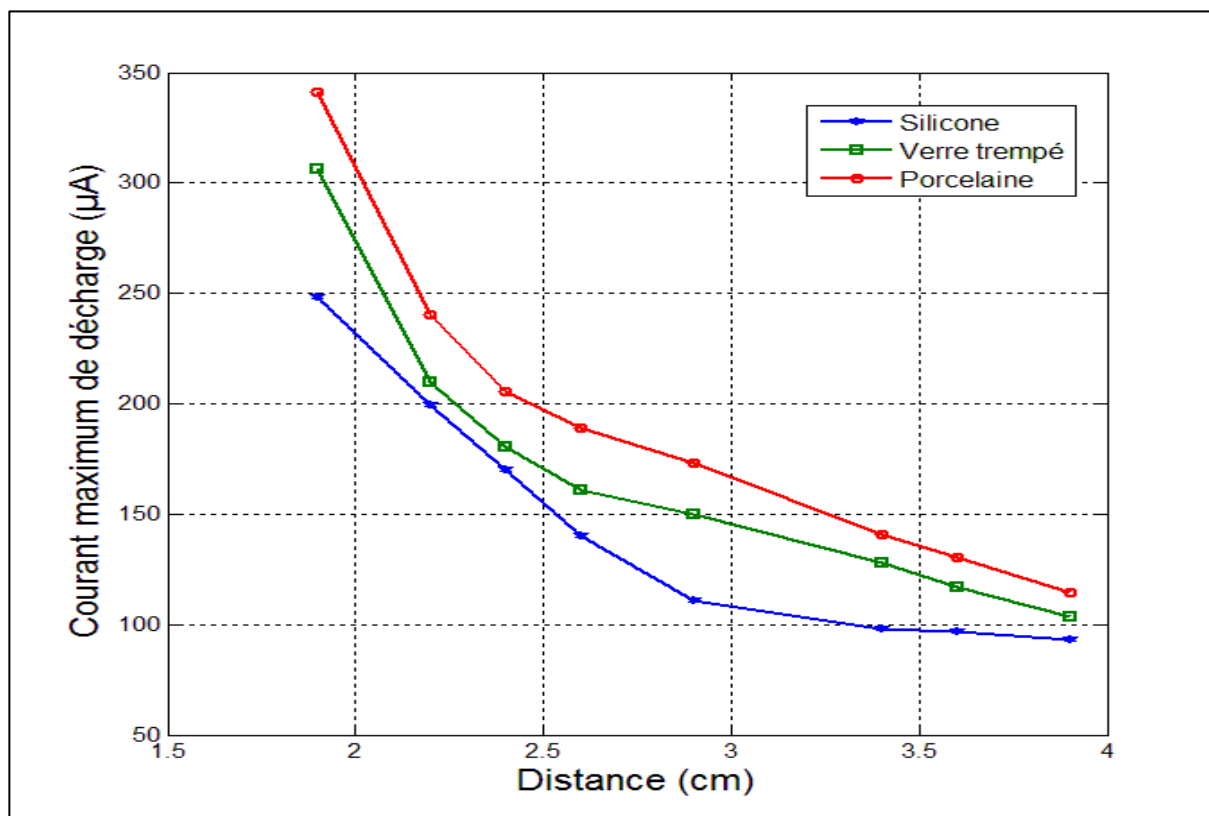


Figure II.8. Variation du courant maximum de décharge I_0 en fonction de la distance inter-électrodes d .

Rayon de courbure de la pointe : $r = 0.15$ mm.

Tension appliquée : $V = 12$ kV.

Surface isolante nette.

Sur la figure II.8, nous observons que le courant I_0 diminue quand d augmente et ceci est valable pour les trois échantillons. Des variations similaires ont été observées par L. Gao et al qui ont mesuré les courants associés à la décharge électrique le long des surfaces en silicone [36,37].

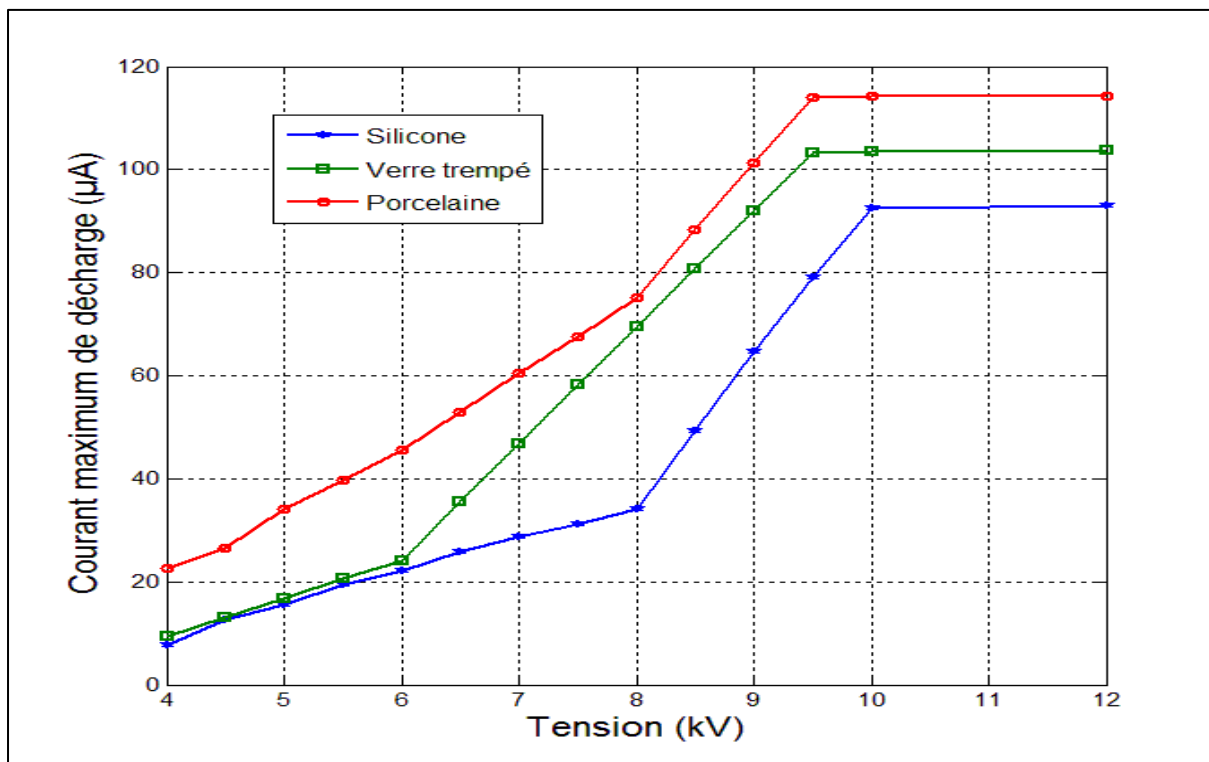
La figure II.8 montre clairement que l'amplitude des impulsions positives diminue rapidement pour une distance inter-électrode $d = 1.9$ cm jusqu'à 2.9 cm pour la silicone et 2.4 cm pour le verre trempé et la porcelaine. A partir de cette valeur de la distance inter-électrodes, les diminutions du courant de décharge sont beaucoup plus faibles. Ceci est en accord avec les travaux de T. Tokunaga et al qui rapportent que le courant de décharge dépend fortement de la valeur du champ électrique à la jonction triple

[38]. En effet, pour les zones de champ électrique intense (d plus petit), le régime de décharge est important en raison de l'activation électronique élevée qui booste la propagation des streamers impliquant ainsi un courant I_0 plus grand. Pour une zone de champ électrique faible (d plus grand), l'espace entre les électrodes subit une baisse de l'activité de la décharge qui est due à une faible probabilité d'apparition d'un processus d'ionisation. En d'autres termes, l'attachement électronique est plus important et prédominant et donc la valeur du courant I_0 est plus petite [39].

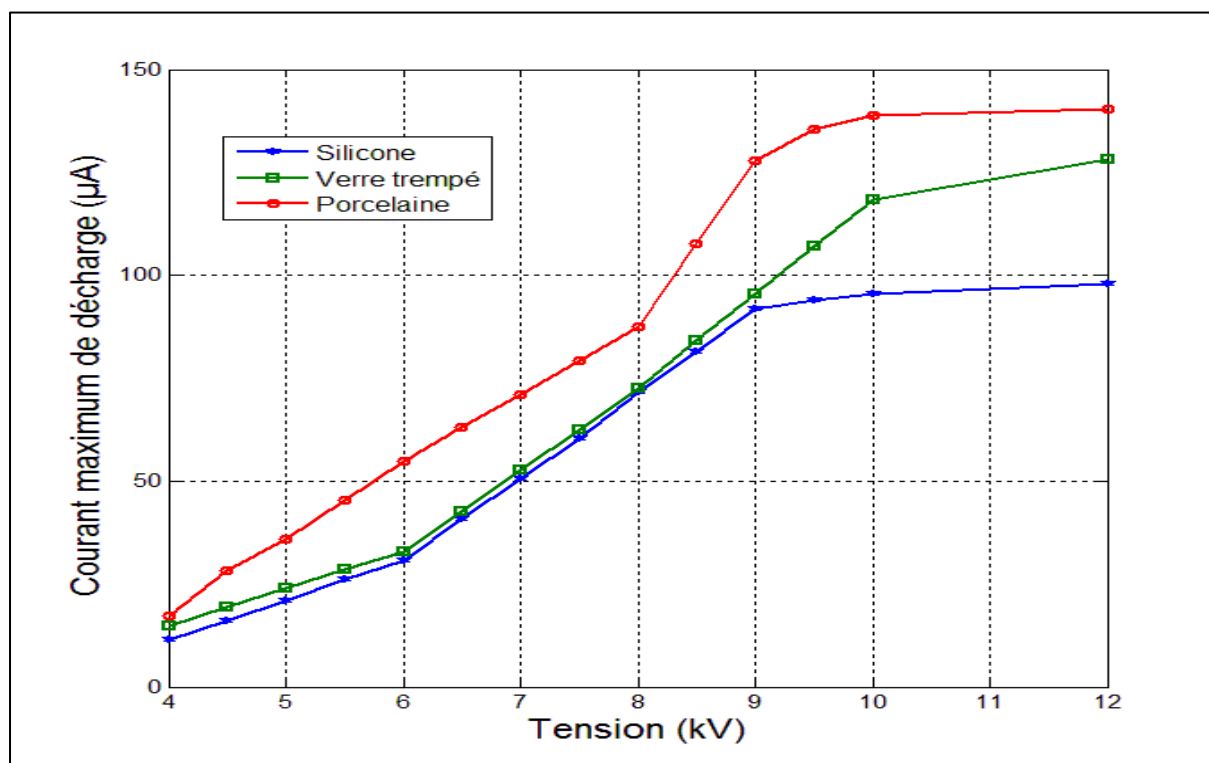
De plus, nous avons observé que l'amplitude des impulsions positives associées à la porcelaine est supérieure à celles associées au verre trempé et à la silicone. Ceci pourrait être expliqué par le fait que les streamers positifs se développent sur une plus grande distance que celles du verre trempé et de la silicone. Cette interprétation a été donnée par d'autres auteurs qui ont étudié les décharges électriques le long de la résine, du polyamide et du polycarbonate. En effet, ces auteurs ont trouvé que la décharge électrique est plus importante pour la résine que pour le polyamide et le polycarbonate et ont conclu que ceci serait dû au fait que les streamers positifs se développent sur des distances plus grandes pour la résine que pour le polyamide et le polycarbonate [40].

II.4.3. Influence de la tension appliquée sur le courant maximum de décharge électrique

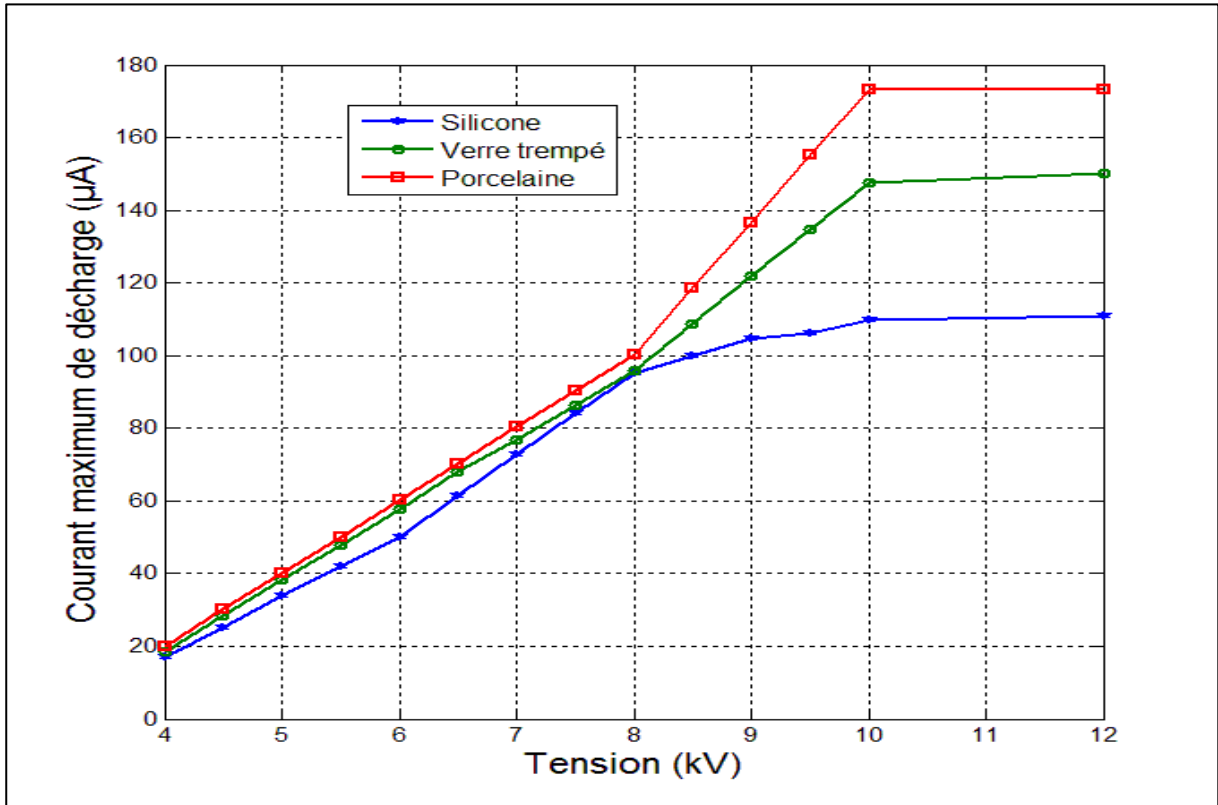
La tension appliquée V a été variée entre 4 et 10 kV. La mesure a été effectuée pour des distances inter-électrodes allant de 1.9 à 3.9 cm. Le courant I_0 a été mesuré pour les échantillons de silicone, porcelaine et verre trempé. Les résultats sont présentés sur la figure II.9.



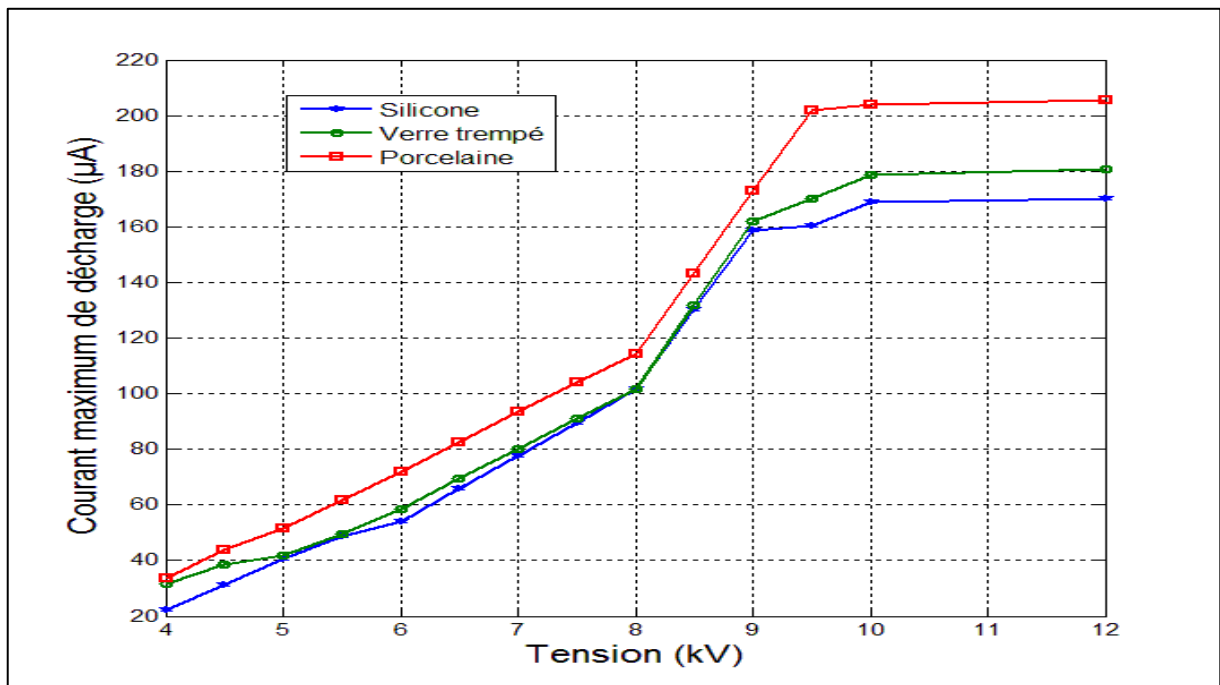
a) d = 3.9 cm.



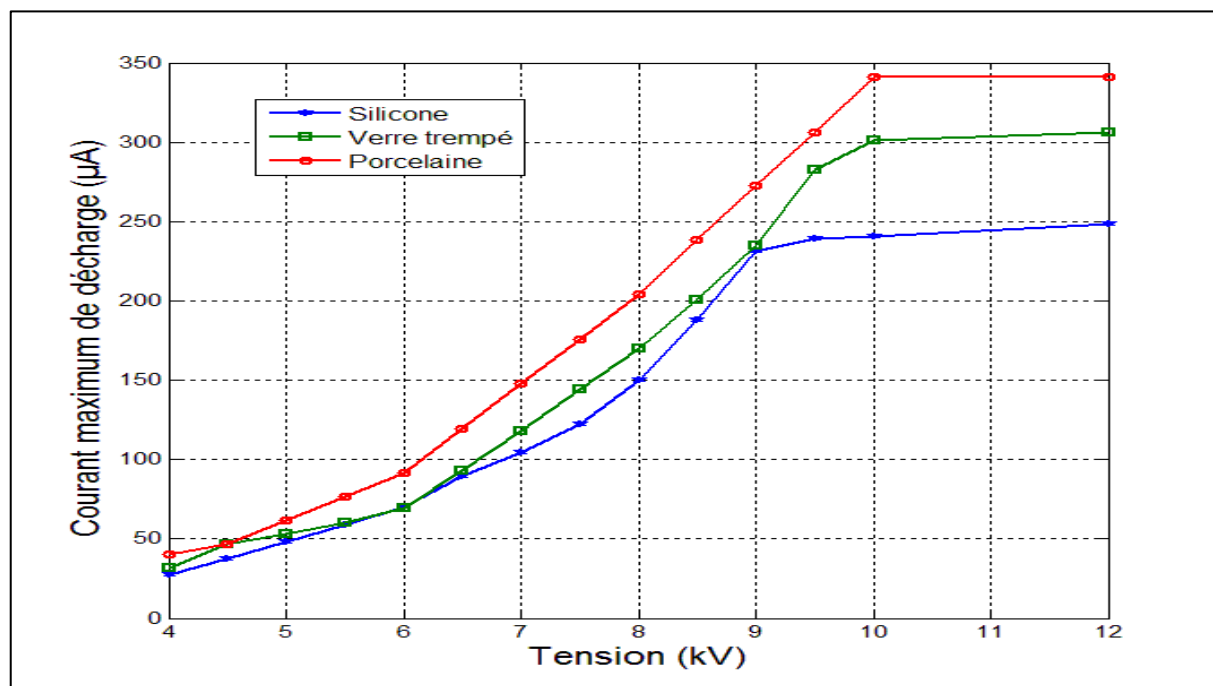
b) d = 3.4 cm.



c) d = 2.9 cm



d) d = 2.4 cm



e) $d = 1.9 \text{ cm}$

Figure II.9. Variation du courant maximum de décharge I_0 en fonction de la tension appliquée V .

Rayon de courbure de la pointe : $r = 0.15 \text{ mm}$.

Surface isolante nette.

À partir des Figures II.9 (a), II.9 (b), II.9 (c), II.9 (d) et II.9 (e), on observe que le courant maximum de décharge I_0 augmente avec la tension appliquée V pour les trois matériaux. Cette augmentation s'explique par le phénomène d'accumulation de charges électriques à la jonction triple. Ceci est dû au renforcement du champ électrique à la surface étudiée, ce qui donne lieu à des décharges situées dans cette zone [41,42]. En effet, le champ électrique est proportionnel à la tension V au niveau de la jonction triple. Le champ électrique augmente avec la tension, ce qui génère plus d'électrons énergétiques et c'est ce qui rendra l'amplification de l'avalanche électronique plus forte et plus rapide [43]. Cela conduit à une augmentation du courant I_0 . Les mêmes phénomènes ont également été observés dans la littérature par A. Larsson et al. [37], H. Javadiz et al [44], K.V. Kozlov et al. [45] ainsi que O. Eichwald et al. [46].

II.4.4. Influence du rayon de courbure de la pointe sur le courant maximum de décharge électrique

Afin d'évaluer l'effet du rayon de courbure r de la pointe sur le courant maximum de décharge I_0 , r a été varié entre 0.15 et 1 mm. La mesure a été réalisée sous une tension appliquée $V = 12$ kV et une distance inter-électrodes $d = 2.9$ cm. Les résultats concernant les trois matériaux considérés avec une surface nette sont donnés sur la figure II.10.

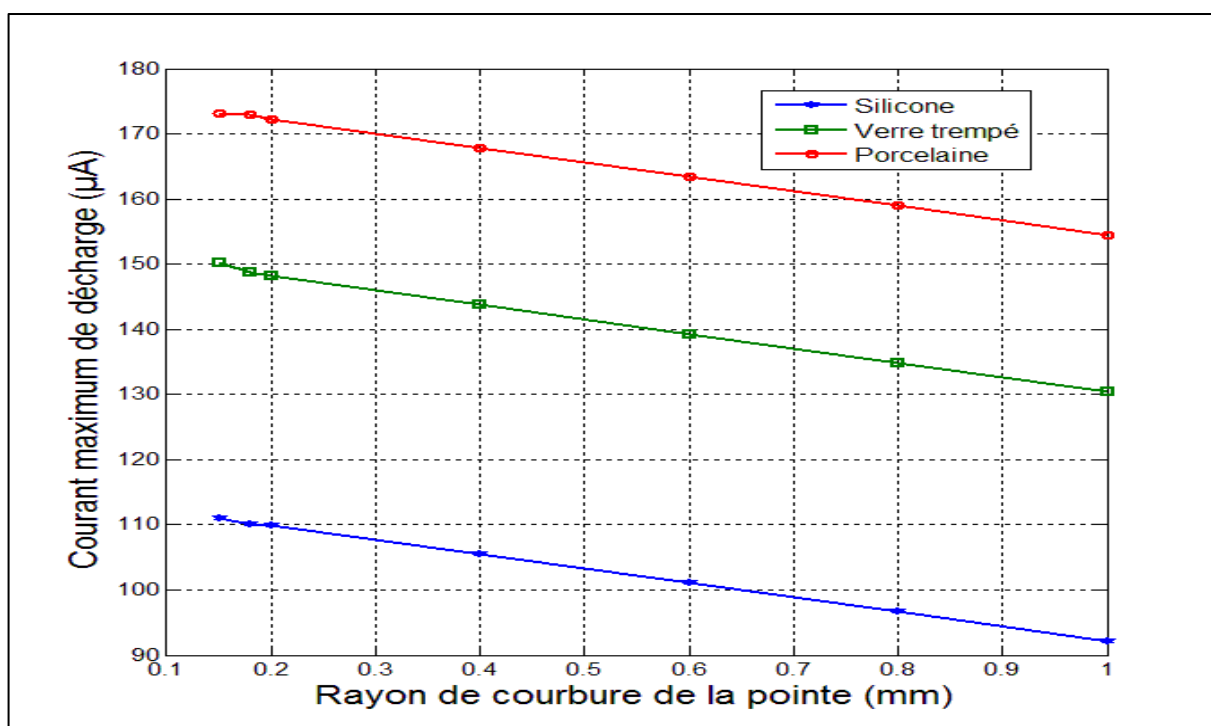


Figure II.10. Variation du courant maximum de décharge I_0 en fonction du rayon de courbure de la pointe r .

Distance inter-électrodes : $d = 2.9$ cm. Tension appliquée : $V = 12$ kV.

Surface isolante nette.

La figure II.10 montre que le courant maximum de décharge I_0 à la jonction triple diminue lorsque le rayon de courbure de la pointe r augmente. Ceci se traduit par une faible force de répulsion des charges qui s'accumulent à la jonction triple. Ainsi, la charge accumulée et le champ électrique généré sont d'autant plus importants que le rayon de courbure de la pointe r est petit [47].

Pour une meilleure compréhension de l'effet du rayon de courbure de la pointe, nous considérons deux électrodes portées à la haute tension : une grande électrode avec un grand rayon R et une petite électrode avec un petit rayon $r = R / 2$ portée au même potentiel électrique V . Chaque électrode contient une charge donnée par les équations suivantes [48] :

$$q_R = V \times 4 \pi \varepsilon_0 R \quad (\text{II. 1})$$

$$q_r = V \times 4 \pi \varepsilon_0 r = \frac{V \times 4 \pi \varepsilon_0 R}{2} = \frac{q_R}{2} \quad (\text{II. 2})$$

L'électrode avec le plus grand rayon de courbure se chargera donc deux fois plus que celle avec le plus petit rayon de courbure. Le champ électrique E peut être calculé comme suit [48] :

$$E_R = \frac{V \times R}{d^2} \quad (\text{II. 3})$$

$$E_r = \frac{V \times r}{d^2} = \frac{V \times R/2}{d^2} = \frac{1}{2} \frac{V \times R}{d^2} = \frac{E_R}{2} \quad (\text{II. 4})$$

Le champ pour la grande électrode sera donc deux fois plus important et ce pour la même distance d . En se rapprochant de leur voisinage, c'est-à-dire de la distance de leur centre, on peut écrire : $d = r$ pour la petite électrode et $d = R$ pour la grande. Cela nous permet d'écrire les équations II. 5 et II. 6 :

$$E_R = \frac{V \times R}{R^2} \quad (\text{II. 5})$$

$$E_r = \frac{V \times r}{r^2} = \frac{V \times R/2}{(\frac{R}{2})^2} = \frac{V \times R/2}{R^2/4} = 2 \frac{V \times R}{R^2} = 2 E_R \quad (\text{II. 6})$$

On obtient alors un champ électrique au niveau de la petite électrode deux fois plus grand que celui de la grande électrode. Par généralisation, si nous avons un rayon de courbure n fois plus petit, le champ électrique à proximité de cette électrode est n fois

plus grand.

Au final, on peut dire que le champ électrique augmente en fonction de l'inverse du rayon, tandis que les charges q contenues sur les TJ portées au potentiel électrique V augmentent linéairement avec le rayon. L'influence du rayon de courbure de la pointe sur la valeur de courant mesurée est en accord avec les travaux de Hartmann qui a évalué théoriquement la loi de Peek donnant le gradient d'apparition de l'effet couronne. Un modèle mathématique physique permettant la détermination du champ d'apparition de l'effet couronne en fonction du rayon de courbure de la pointe dans l'air pour des géométries fil/cylindre et pointe/plan a été proposé. Les résultats montrent que le champ d'apparition de l'effet couronne est inversement proportionnel au rayon de courbure. Ensuite, ces résultats sont comparés à une variété de résultats expérimentaux [49].

II.4.5. Influence du temps d'application de la tension sur le courant maximal de décharge

La figure II.11 représente la variation du courant maximum de décharge I_0 en fonction du temps d'application de la tension t pour les trois matériaux sélectionnés. La tension $V = 12$ kV a été appliquée à l'isolant solide pour une distance inter-électrodes $d = 2.9$ cm pendant 4 heures sans interruption. La mesure du courant maximal I_0 est effectuée toutes les 30 min.

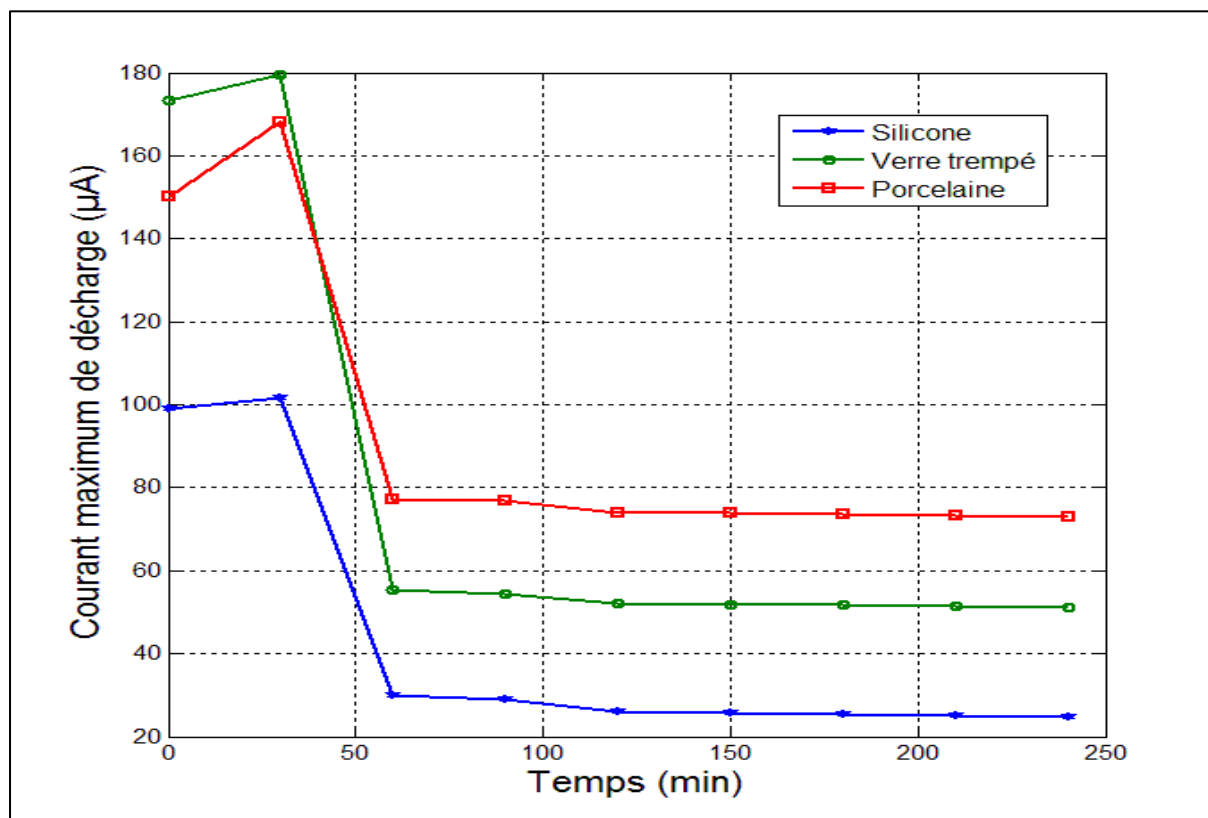


Figure II.11. Influence du temps d'application de la tension t sur le courant maximum de décharge I_0 .

Rayon de courbure de la pointe : $r = 0.15$ mm.

Distance inter-électrodes : $d = 2.9$ cm.

Tension appliquée : $V = 12$ kV.

Surface isolante nette.

On observe sur la figure II.11 que le courant maximum de décharge I_0 augmente pendant la première période de vieillissement électrique. A partir de cette période, le courant de décharge diminue. Ce dernier est plus importants pour la porcelaine que pour le verre trempé et la silicone.

Lors de la première période de vieillissement électrique, les trois matériaux soumis à une décharge électrique subissent une dégradation qui se traduit par la rupture de certaines liaisons chimiques, la formation du groupement carboxylique OH et un développement important des arborescences en surface (la longueur des arborescences augmente avec le temps d'application de la tension) qui pourraient favoriser la conduction électrique superficielle et par conséquent l'augmentation de I_0 [50].

Par ailleurs, sur la deuxième partie du vieillissement électrique, la diminution du courant maximum de décharge I_0 après plus de 30 minutes de vieillissement électrique pour les trois matériaux, est due à un dépôt d'humidité, lui-même consécutif à une dégradation de la surface électrique. Cette dégradation facilite la liaison électronique qui prédomine sur l'activité ionique. Cette liaison électronique ralentit à son tour le régime de décharge, d'où l'extinction de cette décharge [51].

En revanche, il a été clairement observé que le courant I_0 associé à la porcelaine est supérieur à ceux associés au verre trempé et à la silicone. Cela signifie que le temps de vieillissement électrique a une plus grande influence sur la porcelaine que sur le verre trempé et la silicone, ce qui pourrait s'expliquer par le fait que la porcelaine est plus perméable aux phénomènes de propagation des décharges électriques qui peuvent être liés à la structure chimique. En d'autres termes, la porcelaine a une faible force de liaison entre ses molécules, contrairement au verre trempé et à la silicone (la silicone a une forte force de liaison entre ses molécules à base d'oxygène et de silicium). Ainsi, la structure chimique joue un rôle majeur dans les propriétés électriques et diélectriques de ces matériaux [52].

II.4.6. Influence de l'état de surface de l'isolant sur le courant maximal de décharge

La figure II.12 montre la variation du courant maximum de décharge I_0 mesuré toutes les 30 min pendant les quatre heures du temps d'application de la tension sans interruption sur l'isolant solide (trois matériaux : silicone, porcelaine et verre trempé) pour un état de surface de l'isolant solide net (t') et dégradée avec du papier de verre (t''). Les expériences se sont déroulées sous une tension appliquée $V = 12$ kV et une distance inter-électrodes $d = 2.9$ cm.

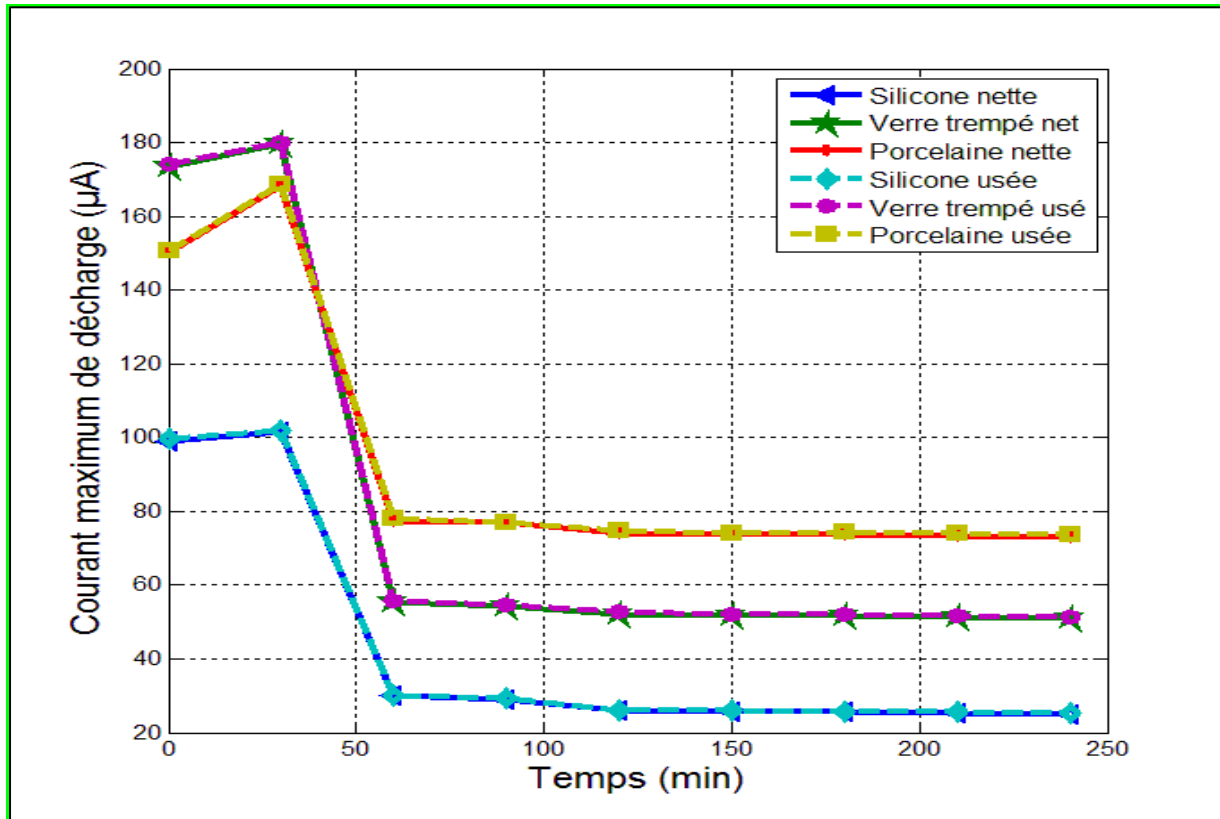


Figure II.12. Influence de l'état de surface de l'isolant solide (isolant solide à surface nette t' puis à surface dégradée avec du papier de verre t'') sur le courant maximum de décharge I_0 .

Rayon de courbure de la pointe : $r = 0.15$ mm.

Distance inter-électrodes : $d = 2.9$ cm.

Tension appliquée : $V = 12$ kV.

Pour les trois matériaux étudiés (Figure II.12), on constate que le courant maximum I_0 augmente jusqu'à un temps de 30 minutes. Au-delà de 30 min, une diminution de I_0 est observée en augmentant t . Cette diminution est plus importante pour la silicone que pour le verre trempé et la porcelaine, ceci est valable quel que soit l'état de surface de l'isolant solide (surface nette et surface dégradée avec du papier de verre).

De plus, on observe que les valeurs du courant I_0 sont plus grandes pour un état de surface de l'isolant dégradée avec du papier de verre. Pour mieux apprécier la différence des résultats concernant les surfaces nettes et celles dégradées, nous donnons les valeurs des différents courants sur le tableau 2.

Tableau II.2. Influence du temps d'application de la tension sur le courant maximum de décharge pour les trois matériaux étudiés et pour différents états de surface de l'isolant solide : surface nette et surface dégradée avec du papier de verre.

Temps (min)	0	30	60	90	120	150	180	210	240
I_{\max}^+ Silicone nette (μA)	99.17	101.51	29.98	29.11	25.87	25.64	25.52	25.19	24.88
I_{\max}^+ Silicone usée (μA)	102.22	104.48	32.78	32.33	28.88	28.65	28.58	28.21	27.93
I_{\max}^+ Verre trempé net (μA)	150.22	168.15	77.24	76.86	74.06	73.84	73.71	73.43	72.98
I_{\max}^+ Verre trempé usé (μA)	153.96	171.89	80.71	80.39	78.11	77.92	77.73	77.45	76.99
I_{\max}^+ Porcelaine nette (μA)	173.41	179.63	55.24	54.36	52.06	51.84	51.71	51.43	50.98
I_{\max}^+ Porcelaine usée (μA)	176.5	182.70	58.29	57.38	55.11	54.96	54.73	54.46	53.91

L'augmentation du courant maximal associé aux surfaces dégradées par rapport à celui associé aux surfaces nettes pourrait trouver son explication dans ce qui suit. La surface dégradée et frottée avec du papier de verre présente des défauts d'homogénéité, des cavités et des inclusions de particules étrangères. Par conséquent, des décharges

électriques se produisent au voisinage de ces défauts. Dès que le champ électrique devient suffisamment important, ces décharges peuvent créer par érosion, fusion localisée, transformations chimiques induites ou autres processus dans l'isolation, des réseaux de canaux plus ou moins conducteurs appelés arborescences. Ces arborescences évoluent avec le temps, augmentant ainsi la décharge électrique et par conséquent I_0 [53-55].

II.4.7. Influence de la permittivité de l'isolant solide sur le courant maximal de décharge

Nous allons considérer dans ce qui suit l'effet de la permittivité sur le courant maximum de décharge. En partant de la considération que les permittivités relatives ϵ_r de la silicone, la porcelaine et le verre trempé sont respectivement de 4.2, 6 et 5 et au regard des figures II.8 à II.12, le courant maximum de décharge électrique est plus important pour l'isolant ayant la permittivité la plus élevée. Ceci est valable quelque soit le paramètre considéré (distance inter-électrode d , tension appliquée V , rayon de courbure de la pointe r , temps d'application de la tension t , isolant solide à surface nette ou isolant solide dont la surface a été dégradée au papier de verre). En effet, le champ dans l'air à la surface du solide sera d'autant plus élevé que la permittivité relative ϵ_r de ce dernier est élevée et donc la valeur du courant I_0 sera également élevée [38]. Ce résultat est qualitativement en accord avec la deuxième loi de Toepler (Equation II. 7) [41] :

$$\epsilon_0 \epsilon_r \frac{V_s^2}{e} = \text{Constante} \quad (\text{II. 7})$$

où e est l'épaisseur de l'isolant solide et ϵ_0 est la permittivité du vide. Selon cette loi, la tension de déclenchement des décharges glissantes (V_s) est inversement proportionnelle à la racine carrée de ϵ_r du solide isolant [56]. Les études réalisées par T.W. Dakin et al [57] et par M.C. Halleck [58] rapportent le même résultat.

II. 5. Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons réalisé une étude expérimentale concernant le courant de décharge à la jonction triple métal/air/isolant. Le système d'électrodes utilisé est une configuration pointe-plan et les échantillons d'isolants solides considérés sont issus d'isolateurs utilisés en haute tension. Ainsi nous avons utilisé la silicone, la porcelaine et le verre trempé. Nous avons mesuré le courant maximum de décharge électrique au niveau du point triple en fonction de la distance inter-électrodes, la tension appliquée, le rayon de courbure de la pointe, le temps d'application de la tension, l'état de surface de l'isolant solide (surface nette et surface dégradée avec du papier de verre). Ces courants de décharge ont également été comparés en considérant les permittivités relatives des trois matériaux étudiés. A partir des résultats expérimentaux, nous avons montré que l'amplitude des impulsions de courant diminue avec l'augmentation de la distance inter-électrodes. Par ailleurs, les courants associés aux décharges augmentent avec la tension appliquée. En outre, nous avons mis en évidence l'influence du rayon de courbure de la pointe sur le courant maximum de décharge. Ce dernier augmente lorsque le rayon diminue. De plus, il a été prouvé que le vieillissement électrique impacte grandement la décharge électrique. Et l'état de surface de l'isolant solide semble avoir une influence sur les caractéristiques de pré-claquage. Le courant sur les surfaces polies est plus faible que sur les surfaces rugueuses.

Par ailleurs, nous avons montré que les facteurs tels que la distance, la tension appliquée, le rayon de courbure de la pointe, le temps d'application de la tension et l'état de surface de l'isolant solide ont une influence plus marquée sur la porcelaine que sur le verre trempé et la silicone. Ceci s'explique par le fait que la porcelaine et le verre trempé ont une permittivité diélectrique plus élevée. Autrement dit, la silicone a une tenue diélectrique plus grande que celle du verre trempé et de la porcelaine.

Chapitre III

Conception d'un modèle de régression

III.1. Introduction

Dans le présent chapitre, nous allons nous familiariser avec les modèles de régression et leur conception. Il s'agit ici de la modélisation d'un phénomène quelconque qui permet l'établissement d'une relation mathématique pratique reliant la grandeur de ce phénomène et les paramètres l'influençant. Les modèles que nous développerons serviront à faire des prévisions sur la grandeur du phénomène en optimisant l'organisation des essais expérimentaux pour obtenir le maximum de renseignements avec le minimum de données expérimentales et la meilleure précision possible sur les réponses calculées avec les modèles. Cet objectif sera atteint en suivant les règles que nous établissons mathématiquement et en adoptant une démarche rigoureuse. Il existe de nombreux modèles fréquemment utilisés dans la modélisation des phénomènes physiques [59]. Pour pouvoir décrire les différents paramètres pouvant intervenir dans la description de nos essais, nous choisissons les modèles de régression linéaire polynomiaux.

III. 2. Définition d'une modélisation

Dans certains cas, on essaie de modéliser par une équation la valeur d'une variable généralement notée Y en fonction d'une ou plusieurs autres variables X_i [60]. Cette équation est utilisée pour décrire un phénomène bien précis du point de vue causalité pour prédire de nouvelles valeurs sous certaines conditions [61]. Dans le cas où nous avons une seule variable, nous utilisons une régression simple et dans le cas où nous avons plusieurs variables, nous utilisons une régression multiple.

Il sera sans aucun doute plus facile d'utiliser les termes de régresseurs et de régressée que de parler de variables explicatives et de variables à expliquer, de variables indépendantes et de variables dépendantes, on retrouve également les noms de variables exogènes et endogènes (Y est appelé régressé, variable dépendante et variable endogène, tandis que les X_i sont appelés régresseurs, variables explicatives, variables indépendantes et variables exogènes).

Le modèle de régression linéaire est le modèle le plus simple, le plus connu et le plus étudié lorsque Y et X_i sont quantitatifs [62]. On appelle modèle de régression

logistique, le modèle dont Y est qualitatif. Ce modèle vise à construire un modèle permettant de prédire et expliquer les valeurs prises par une variable cible qualitative (le plus souvent binaire, on parle alors de régression logistique binaire, si elle possède plus de deux modalités, on parle de régression logistique polynomiale) à partir d'un ensemble de variables explicatives ou qualitatives. Lorsque l'on étudie la fonction de Y quantitatif et de X_i qualitatif, on parle d'analyse de variance plutôt que de régression. L'étude de Y qualitatif en fonction de X_i qualitatif ne possède pas de termes réservés.

En effet, le cas le plus simple est l'analyse croisée par le test de χ^2 qui consiste en un test statistique où la statistique de test suit une loi du χ^2 sous l'hypothèse nulle (Il s'agit ici de se demander si deux listes de nombres de même effectif total peuvent dériver de la même loi de probabilité. L'hypothèse nulle est la suivante : les deux échantillons proviennent de deux variables aléatoires suivant la même loi). Ce test permet, par exemple, de tester l'adéquation d'une série de données à une famille de lois de probabilité ou de tester l'indépendance entre deux variables aléatoires [63]. Le tableau III.1 donne les différentes fonctions reliant des Y et des X_i quantitatives/qualitatives.

Tableau III.1. Différentes fonctions reliant des Y et X_i quantitatives/ qualitatives.

Modélisation	X_i quantitatives	X_i qualitatives	X_i quantitatives et qualitatives
Y quantitative	Linéaire	analyse de la variance	analyse de la covariance
Y qualitative	Logistique	logistique	logistique

III.3. Réalisation d'une modélisation

Plusieurs étapes doivent être réalisées afin d'effectuer une bonne modélisation. Il est nécessaire de choisir tout d'abord un modèle parmi les modèles possibles. La sélection de variables dans plusieurs modèles avec ou sans interaction (définir d'autres variables comme le produit des variables de départ) est généralement une étape difficile dans le cas où il y en a plusieurs. Il est nécessaire par la suite de trouver les

coefficients dans l'équation de régression c'est-à-dire de déterminer les paramètres du modèle. Enfin, il est indispensable de tester la qualité générale du modèle, analyser l'ajustement entre le modèle et les données en analysant les résidus et tester l'invalidité des coefficients. En effet, pour qu'on ait le droit d'utiliser un modèle, les variables X_i doivent parfois vérifier certaines conditions (normalité, non colinéarité, non multicollinéarité...). En outre, un calcul et un estimateur utilisé pour déterminer le modèle en sélectionnant des variables, des tests de qualité de régression et une analyse résiduelle sont associés à chaque type de modélisation (linéaire, logique, etc.) [64].

III.4. Modèle de régression

III.4.1. Représentation graphique

La représentation des données est intéressante avant de faire toute analyse. Cependant, trouver une fonction f telle que $y_i \approx f(x_i)$ est le but de la régression. On peut écrire $y_i = f(x_i) + e_i$, e_i étant une erreur.

Par conséquent, une étude de régression commence toujours par un graphique d'observations (x_i, y_i) , $i = 1, \dots, n$. Cette première représentation permet de savoir si le modèle est pertinent. La figure III.1 montre trois nuages de points différents [65-67].

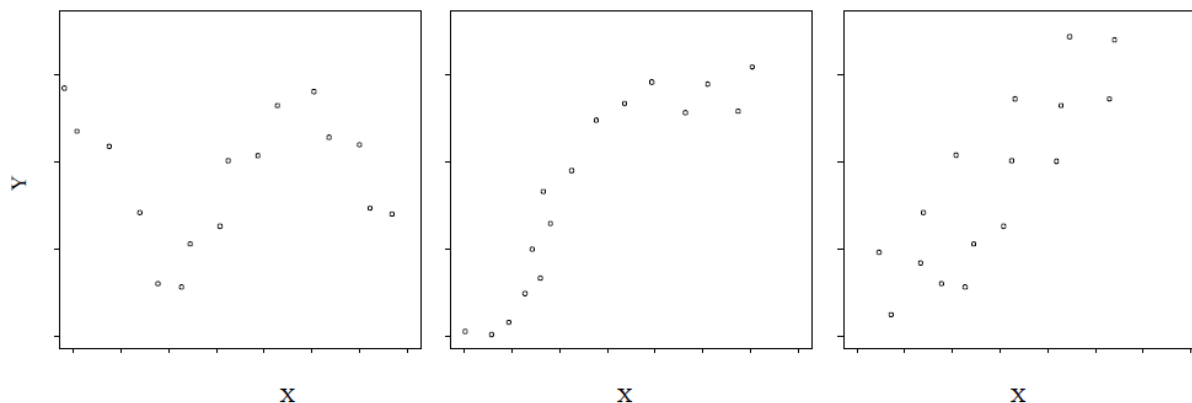


Figure III.1. Nuages de points différents.

D'après cette figure, le tracé présente une forme sinusoïdale ou sigmoïdale pour les deux premiers graphiques, il est donc inadéquat de proposer une régression linéaire. En revanche, pour le dernier graphique la modélisation par une droite de la relation entre X et Y semble correspondre à une bonne approximation de la liaison.

III.4.2. Equation générale d'un modèle de régression linéaire simple

Il s'agit d'un modèle simple exprimant la relation entre Y et X à l'aide d'une fonction linéaire. Graphiquement, la relation est représentée par une ligne droite d'équation :

$$y = b_0 + b_1x \quad (\text{III. 1})$$

Ce modèle particulier comporte deux paramètres (coefficients) :

- Le coefficient b_1 est la pente de la droite, il est clair que $b_1 > 0$ si la droite est croissante, $b_1 = 0$ si la droite est horizontale et $b_1 < 0$ si la droite est décroissante.
- Le coefficient b_0 est l'ordonnée du point d'intersection de la droite avec l'axe vertical.
- L'équation III.1 peut donc être utilisée si les points sont alignés.

D'autres variables ayant une influence sur la variable Y et qui ne sont pas prises en compte dans le modèle (équation III.1), et qui sont généralement dues à des erreurs de mesures peuvent bien intervenir. Pour tenir compte de cette situation, nous écrivons la relation (III.1) sous la forme générale suivante :

$$Y = b_0 + b_1x + \varepsilon \quad (\text{III. 2})$$

Pour un x donné, y est la somme de deux termes :

- 1er terme : $b_0 + b_1 x$ entièrement déterminé par x;
- 2ème terme : le terme d'erreur ε qui varie de façon aléatoire d'un individu à l'autre.

La variable x est supposée être une variable non aléatoire tandis que la variable Y est aléatoire. La valeur mesurée de chaque variable est sans erreur.

Cette équation générale est appliquée aux n observations de Y et à la valeur correspondante de x. On peut donc écrire le modèle sous la forme suivante :

$$Y_i = b_0 + b_1x_i + \varepsilon_i \quad (\text{III. 3})$$

avec $i = 1, \dots, n$

Pour chaque individu i , la variable aléatoire ε_i représente l'erreur commise, c'est-à-dire l'écart entre la valeur de Y observée et la valeur $b_0 + b_1 x_i$ donnée par la relation linéaire.

Il est nécessaire de définir les conditions sur l'erreur afin d'étudier le modèle. Il est supposé que ces erreurs sont des variables indépendantes [68].

III.4.3. Modèle de régression polynomial

La figure III.2 donne quelques exemples de modèles polynomiaux de degrés différents.

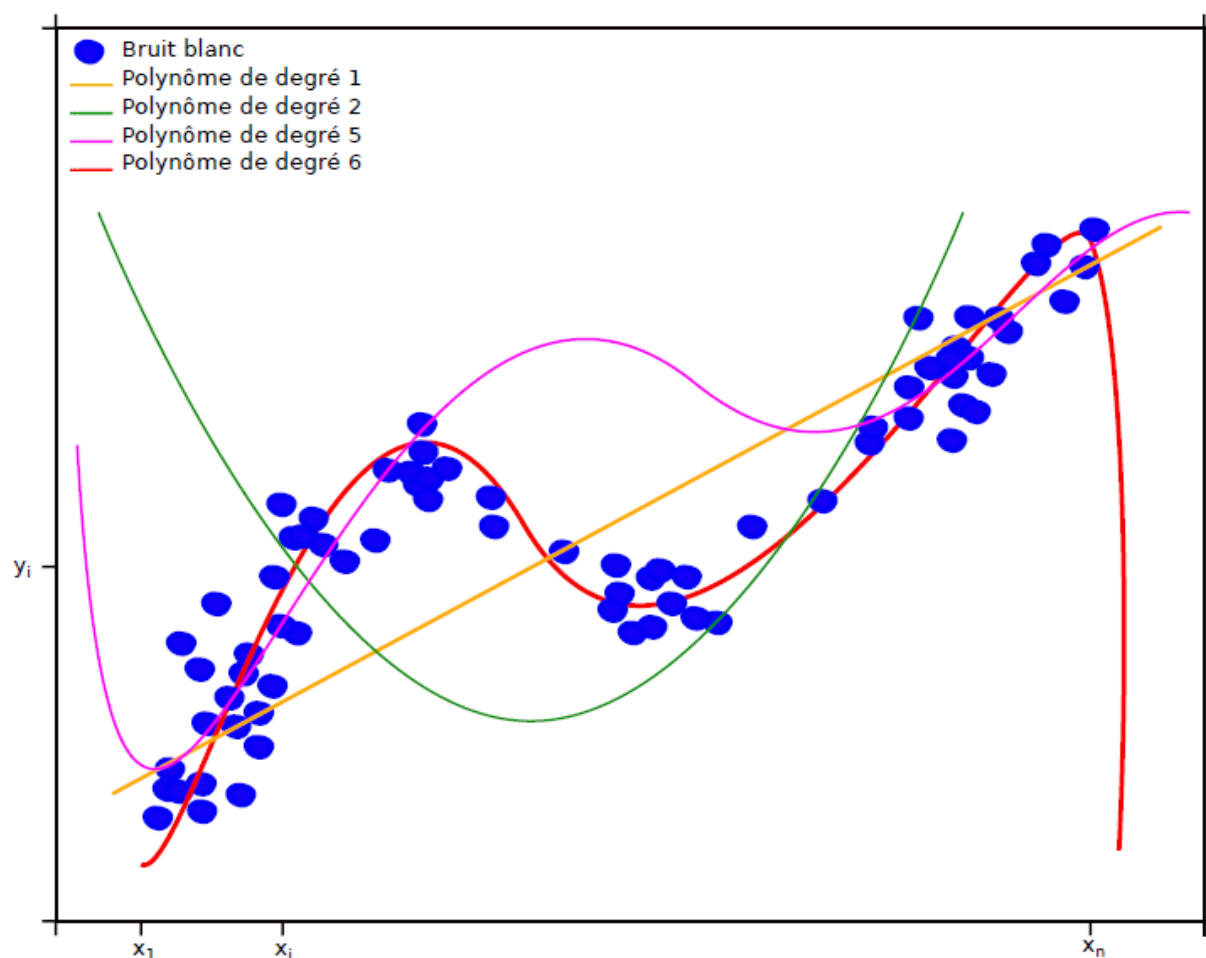


Figure III.2. Exemples de modèles de régression polynomiaux de degrés différents [69].

Supposons que nous avons n variables aléatoires réelles y_i , $i = 1, \dots, n$ indépendantes, alors un modèle de régression polynomial de degré D s'écrit sous la forme suivante [69] :

$$y_i = \beta_0 + \sum_{j=1}^D \beta_j x_i^j + \varepsilon_i \quad (\text{III. 4})$$

Où les x_i tels que $i = 1, \dots, n$ sont les observations de la variable explicative X , β_j sont les coefficients et D le degré du modèle. On suppose que les variables aléatoires ε_i sont indépendantes et identiquement distribuées.

On peut mettre l'équation III.4 sous la forme suivante ($j = 0, \dots, D$) :

$$y_i = \sum_{j=0}^D \beta_j x_i^j + \varepsilon_i \quad (\text{III.5})$$

III.4.3.1. Détermination des paramètres

L'écriture matricielle du modèle est la suivante:

$$y = X\beta + \varepsilon \quad (\text{III. 6})$$

Avec :

$$X = \begin{pmatrix} 1 & x_1 & x_1^2 & \dots & x_1^D \\ 1 & x_2 & x_2^2 & \dots & x_2^D \\ 1 & x_3 & x_3^2 & \dots & x_3^D \\ \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ 1 & x_n & x_n^2 & \dots & x_n^D \end{pmatrix} \quad (\text{III. 7})$$

qui est une matrice de Vandermonde de n lignes et $D + 1$ colonnes, où l'on note:

$$x_{i,j} = x_i^{j-1} \text{ et } \beta = (\beta_0, \dots, \beta_D)^T \in R^{D+1}.$$

Il est à noter que nous avons $D + 1$ paramètres pour un polynôme de degré D .

III.4.3.2. Choix du degré

Pour sélectionner l'ordre du polynôme, on peut utiliser la validation croisée [69]. Cette dernière est un outil standard dans l'analyse des modèles et constitue une fonctionnalité importante pour aider à développer et à ajuster les modèles

d'exploration de données. Nous recourons à la validation croisée après avoir créé une structure d'exploration de données et des modèles d'exploration de données connexes dans le but d'établir la validité du modèle. Les applications de la validation croisée sont les suivantes :

- Choix du degré (ordre) du modèle de prédiction sélectionné,
- Validation de la robustesse d'un modèle d'exploration de données particulier,
- Evaluation de plusieurs modèles à partir d'une instruction unique,
- Génération de plusieurs modèles et identification du meilleur modèle sur la base de statistiques.

On remarque lors du choix du degré du modèle de régression polynomial que :

- le nombre de paramètres à estimer augmente vite avec le degré (la dimension).
- Quand D est relativement grand, on observe des oscillations aux bords c'est-à-dire aux points x_1 et x_n .

En prenant $n = 2$ et $D = 2$, par exemple, nous aurons :

$$x_i = \begin{pmatrix} x_i & 1 \\ x_i & 2 \end{pmatrix} \quad (\text{III. 8})$$

et

$$X = \begin{pmatrix} 1 & x_{1,1} & x_{1,2} & x_{1,1}^2 & x_{1,2}^2 & x_{1,1}x_{1,2} \\ 1 & x_{2,1} & x_{2,2} & x_{2,1}^2 & x_{2,2}^2 & x_{2,1}x_{2,2} \end{pmatrix} \quad (\text{III. 9})$$

Un polynôme de degré 2 nécessite une fixation des coefficients liés aux variables : $[x_{i,1}, x_{1,2}, x_{i,1}^2, x_{i,2}^2, x_{i,1}x_{i,2}]$.

III.4.3.3. Avantages et inconvénients du modèle polynomial

III.4.3.3.1. Avantages

- Utile en estimation non-paramétrique,
- Flexible pour de faibles degrés. Il est à noter qu'un modèle est flexible quand il a l'aptitude de s'adapter à la variation des observations [69].

III.4.3.3.2. Inconvénients et limites Les polynômes ne sont pas localisés (fonctions

globales, non localisées),

- Le nombre de paramètres à estimer augmente vite avec le degré (la dimension),
- Effet de bord et oscillations (mauvaise prédiction en dehors de la gamme des valeurs observées) [69].

III.4.4. Critères d'évaluation et validation d'un modèle de régression

En modélisation par régression, nous essayons souvent de prédire la valeur de la variable que l'on veut modéliser. L'obtention de cette variable est généralement plus coûteuse et prend du temps, nous cherchons donc à développer un modèle plus ou moins complexe pour estimer avec succès cette variable. Afin de rendre la prédiction précise, le modèle à concevoir doit être soigneusement vérifié et validé. Le but est de prouver que le modèle peut bien estimer la valeur de la variable étudiée. A cet égard, au moins un ensemble de données d'apprentissage et un ensemble de données de validation doivent être utilisés. Les données d'apprentissage sont utilisées pour concevoir le modèle tandis que l'ensemble de validation est utilisé pour montrer que le modèle est fiable et pertinent. Pour être aussi objectifs que possible, les ensembles de données d'apprentissage et de validation doivent provenir de populations indépendantes (pour garantir des résultats impartiaux). En effet, il faut séparer l'ensemble d'échantillons initial de base en un jeu de données d'apprentissage et un jeu de données de validation. Il est généralement recommandé d'utiliser 60% à 80% de l'ensemble de données initial comme ensemble d'apprentissage et les 20% à 40% restants comme ensemble de validation. Cependant, ces pourcentages ne sont pas fixes [70]. Une fois que le modèle est créé à l'aide de l'ensemble de données d'apprentissage, des indicateurs objectifs doivent être calculés pour évaluer si le modèle a généré des prédictions pertinentes pour les variables de recherche. Intuitivement parlant, pour chaque échantillon de l'ensemble de données d'apprentissage et de validation, nous voulons savoir si la valeur prédite par le modèle est proche de la valeur réelle de l'ensemble des données. Nous donnons dans ce qui suit les indicateurs fréquemment rapportés dans la littérature [71].

III. 4.4.1. Le coefficient de détermination R^2

Le coefficient de détermination R^2 est donné par l'équation suivante :

$$R^2 = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (y_i - \hat{y}_i)^2}{\sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2} \quad (\text{III. 10})$$

Où, y_i est la $i^{\text{ème}}$ observation dans l'ensemble de données, \bar{y} est la valeur moyenne dans l'ensemble de données et \hat{y}_i est la valeur prédite de la $i^{\text{ème}}$ observation et n est le nombre de mesures.

Plus R^2 est proche de 1, meilleure est la prédiction. La figure III.3 montre un graphique à deux dimensions représentant la valeur réelle sur l'axe des x et la valeur prédite sur l'axe des y. Cette figure représente l'ajustement d'une régression linéaire à l'ensemble de données [72].

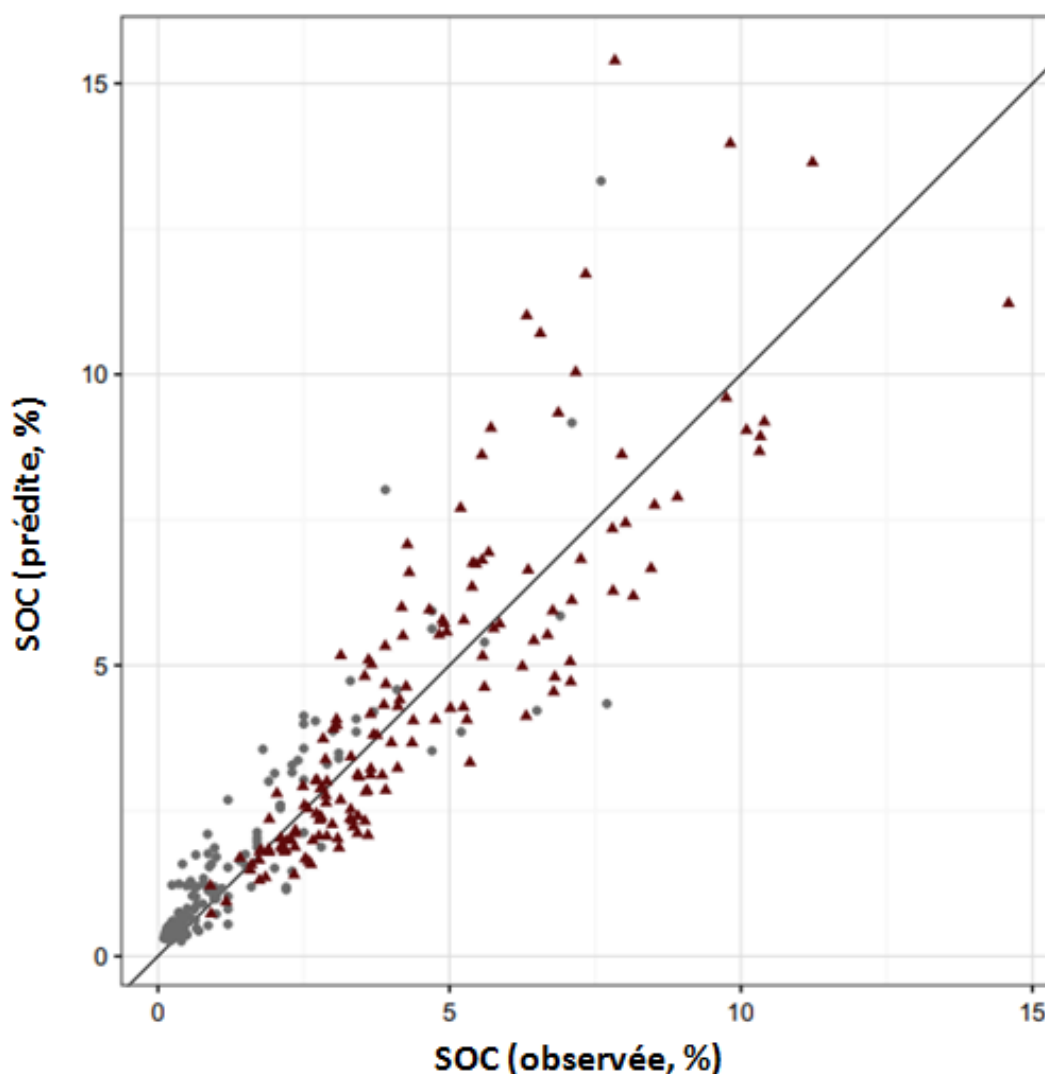


Figure III.3. Ajustement de qualité entre les valeurs réelles et prédites.
SOC est la teneur en carbone du sol («Soil Organic Carbon content») [72].

Cependant, il faut être prudent lors du calcul du coefficient de détermination, car il peut conduire à des conclusions erronées. En effet, certains points d'influence peuvent augmenter la valeur du coefficient de détermination, ce qui peut parfois indiquer que la prédiction est très précise. Dans ce cas là, le modèle ajuste les données relativement. Néanmoins, les points gris près de l'origine du graphe peuvent encore aider à augmenter la valeur du coefficient de détermination.

III. 4.4.2. Le biais

Le biais décrit la manière avec laquelle le modèle décrit l'ensemble des données. Un modèle avec un biais faible décrit mieux un ensemble de données que celui avec un biais élevé.

Le biais se calcule comme suit :

$$Bias = \frac{\sum_{i=1}^n (\hat{y}_i - y_i)}{n} \quad (\text{III. 11})$$

Où y_i est la valeur de la $i^{\text{ème}}$ observation du jeu de données et \hat{y}_i est la valeur prédite pour la $i^{\text{ème}}$ observation [72].

III. 4.4.3. L'erreur moyenne absolue MAPE

L'erreur moyenne absolue MAPE est donnée par l'équation suivante :

$$MAPE = \frac{\sum_{i=1}^n |\hat{y}_i - y_i|}{n} \quad (\text{III. 12})$$

Où y_i est la valeur de la $i^{\text{ème}}$ observation du jeu de données et \hat{y}_i est la valeur prédite pour la $i^{\text{ème}}$ observation.

Il existe une seule différence entre l'erreur moyenne absolue MAPE et le biais. Cette différence consiste en la valeur absolue de la différence entre la valeur réelle et la valeur prédite. L'un des avantages de l'indicateur MAPE est qu'il permet de mieux prédire la qualité des prévisions. Cependant, il est impossible de savoir si le modèle a tendance à sous-estimer ou surestimer la prévision [72].

III. 4.4.4. L'erreur quadratique moyenne RMSE

L'erreur quadratique moyenne RMSE est donnée par l'équation suivante :

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (\hat{y}_i - y_i)^2}{n}} \quad (\text{III. 13})$$

RMSE est un indicateur pertinent. Il donne une indication de la dispersion ou de la variabilité de la qualité de la prédiction. De plus, l'erreur quadratique moyenne peut être liée à la variance du modèle. En règle générale, la valeur RMSE est difficile à interpréter. A cet égard, standardiser le RMSE afin que l'indicateur soit exprimé en pourcentage de la valeur moyenne des observations semble plus avantageux. Cela peut rendre l'indicateur plus significatif.

Il est clairement nécessaire d'employer tous les indicateurs ci-dessus ensemble pour mieux comprendre et caractériser la qualité du modèle prédictif car aucun des indicateurs ci-dessus n'est significativement meilleur que les autres indicateurs [72].

III. 4.4.5. Le compromis biais-variance

Le compromis entre le biais et la variance du modèle est illustré sur la figure III.4.

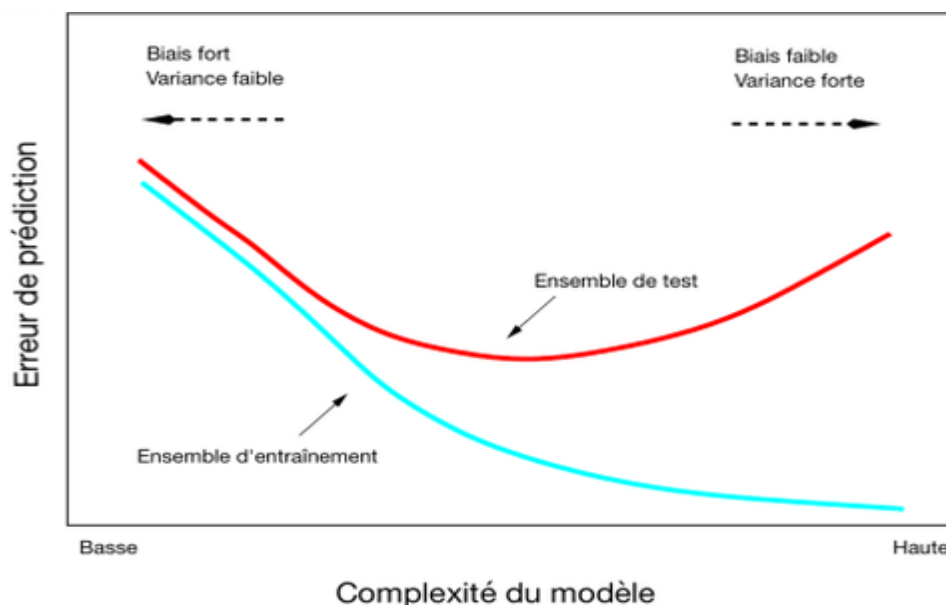


Figure III.4. Le compromis biais-variance [72].

La variance peut signifier la précision du modèle. Lors de la création d'un modèle, l'objectif est de minimiser le biais et la variance pour garantir la meilleure estimation. Toutefois, réduire les deux paramètres en même temps est relativement difficile. En fait, une variance croissante est équivalente à un biais décroissant. De même, la diminution de la variance est entraînée par une augmentation du biais.

En effet, la qualité de l'ajustement entre le modèle et les données est étroitement liée au biais et à la variance. On peut dire que les modèles à faible variance et à grands biais ne sont souvent pas adaptés aux données. Cependant, cela signifie que la prédiction ne sera pas très précise, en d'autres termes, le modèle n'est pas propre aux données étudiées. Sinon, afin d'augmenter l'ajustement (surajuster), il suffit d'un modèle avec une grande variance et un biais faible. Alors, pour cet ensemble de données, le modèle génère des prédictions très précises (très proches de la réalité), ceci nous permettra de dire que ce modèle est très spécifique aux données étudiées. En revanche, l'estimation donnée par ce modèle sera très mauvaise si on l'applique à d'autres situations (par exemple, sur un autre ensemble de données) car le modèle ne pourra pas prendre en compte des observations trop différentes des observations utilisées pour le créer.

Les modèles sont généralement créés pour s'adapter correctement aux données disponibles en amont pour construire le modèle, c'est pourquoi le surajustement est un problème relativement courant. Les résultats sont très peu fiables quand le modèle rencontre des sources de données indépendantes. C'est la raison pour laquelle le modèle doit être calibré avec l'ensemble des données d'apprentissage tandis que l'ensemble des données de vérification sera utilisé pour la vérification, indépendamment de l'ensemble des données d'apprentissage. Le modèle doit être suffisamment flexible pour pouvoir prédire des observations qui ne sont pas complètement similaires à celles du modèle d'étalonnage [72].

III. 4.4.6. Les procédures de validation croisée

Tel qu'il a été mentionné précédemment, afin de vérifier un modèle de prédiction, il faut :

- a) diviser l'ensemble initial des données en un ensemble de données d'apprentissage et un ensemble de données de vérification,
- b) calibrer le modèle avec l'ensemble d'apprentissage,
- c) en utilisant les indicateurs déjà définis, vérifier l'adéquation du modèle à l'ensemble des données.

Ces trois étapes doivent être répétées plusieurs fois pour garantir la bonne qualité du modèle. En effet, l'ensemble initial de données peut être divisé en un grand nombre de paires d'ensembles de données d'apprentissage et de validation. Par exemple, dans la première itération, les 70% des observations qui seront utilisées pour calibrer le modèle seront différentes des 70% des observations de l'ensemble de données d'apprentissage de la deuxième itération [72].

Pour mieux caractériser le modèle, les métriques de vérification peuvent être moyennées dans toutes les itérations. Ce concept est appelé validation croisée, car le but est de savoir si la validation du modèle est équivalente lors de l'utilisation de différents ensembles de données d'apprentissage et de validation. Il est dit auparavant que l'ensemble de données d'apprentissage contient généralement 60 à 80% d'observations de l'ensemble des données d'origine. Nous disons que nous avons terminé 20 fois la validation croisée si l'ensemble de données de validation est défini pour contenir 20% d'observations et que plusieurs itérations sont effectuées. Si l'ensemble de validation ne contient que 5% d'observations, il s'agit d'une validation croisée de 5 fois. Une autre méthode fréquemment signalée est la validation croisée par omission. Comme son nom l'indique, la vérification ne nécessite qu'une seule observation. Il est recommandé de réaliser ces procédures de validation croisée et de calculer les indicateurs de validation pour que les modèles de prédiction soient correctement évalués [73].

III. 5. Conclusion

Une modélisation par régression offre un moyen simple et efficace de réduire le coût et d'augmenter la robustesse des études expérimentales effectuées lors de la conception ou de la validation d'un produit industriel. Cette modélisation permet d'utiliser toute la connaissance du produit dont le concepteur peut disposer a priori, elle offre un cadre de modélisation rigoureux et sa mise en œuvre ne nécessite que des connaissances mathématiques élémentaires.

Ces modèles ont un bon pouvoir explicatif sur les données mais le pouvoir prédictif risque d'être entaché. C'est pourquoi ces modèles ne peuvent être utilisés que sur la gamme de données dans laquelle nous les avons développés sinon ils doivent être testés pour les valider dans d'autres gammes de données.

Chapitre IV

Elaboration des modèles de
prédiction de la décharge électrique
à la jonction triple

IV.1. Introduction

Ce chapitre consiste en une étude mathématique de la décharge électrique à la triple jonction (TJ) à pression atmosphérique en fonction de la distance inter-électrodes (d), la tension appliquée (V), le rayon de courbure de la pointe (r), le temps d'application de la tension (t) et l'état de surface de l'isolant solide : surface nette (t') et surface dégradée avec du papier de verre (t'').

Nous avons développé des modèles de régression polynomiaux monovariés du courant maximum de décharge électrique (I_0) à la TJ associés à V , d , r , t , t' et t'' , des modèles polynomiaux quadratiques à deux variables pour les variables d et V ainsi que des modèles gaussiens de I_0 pour les variables t , t' et t'' indépendamment. Ces modèles représentent une caractérisation des essais expérimentaux que nous avons exposés dans le chapitre II.

IV.2. Méthodologie

Dans cette partie, nous détaillons l'approche mathématique utilisée pour élaborer des modèles pouvant décrire de manière fiable les décharges électriques au niveau d'un point triple métal/air/solide isolant [74-75].

Selon les résultats expérimentaux illustrés sur les Figures II.8, II.9, II.10, II.11, et II.12 du deuxième chapitre, on distingue deux types de relations du courant maximum de décharge électrique (I_0) à savoir, une relation de dépendance linéaire concernant le rayon de courbure de la pointe (r) et une relation de dépendance non linéaire concernant la tension appliquée (V), la distance inter-électrodes (d), le temps d'application de la tension (t), état de surface nette de l'isolant solide (t') et état de surface frotté usé avec du papier de verre (t''). Nous avons opté dans un premier lieu pour le modèle polynomial. Le modèle polynomial regroupe donc le cas linéaire $y = a x$ et le cas non-linéaire tel que $y = a x + b x^2$.

IV.2.1. Modèle polynomial

Notre premier choix pour f (les modèles de régression qui seront développés afin de prédire la décharge électrique à la TJ) est d'être une fonction polynomiale.

Ces modèles polynomiaux sont largement utilisés pour les raisons suivantes:

Une analyse de régression a été effectuée pour obtenir notre modèle. C'est donc un polynôme qui peut être attribué pour une relation linéaire et non linéaire, valable pour les trois matériaux: silicone, porcelaine et verre trempé, et ce quelle que soit la variable étudiée et le degré de sa non-linéarité. De plus, il est simple et aboutit à un problème d'optimisation facile à résoudre [76-77].

Soit y la variable observée ou variable à expliquer (dépendante). Notons que nous avons n observations que nous notons $y_i, \forall i = 1, \dots, n$, nous supposons que chaque y_i est corrompu par un bruit aléatoire normal ε_i , de moyenne et de variance égales à 0 et σ^2 respectivement. Notre objectif principal est de trouver une fonction $f(x)$, où x est la variable indépendante (variable explicative), telle que $y \cong f(x)$. C'est-à-dire que nous cherchons f qui minimise l'erreur entre les observations et le modèle proposé. Le choix de f se fait en fonction de plusieurs critères ; en particulier, le type de relation entre la variable dépendante et indépendante (linéaire / non linéaire) et/ou le type de problème d'optimisation associé.

Notre polynôme est donné par l'équation suivante. Dans ce cas, les variables à expliquer peuvent s'écrire:

$$y_i = \sum_{j=0}^D \beta_j x_i^j + \varepsilon_i, \forall i = 1, \dots, n \quad (\text{IV.1})$$

Où, x_i sont les variables indépendantes: r (mm), d (cm), V (kV), t (min), t' (min) et t'' (min). Tandis que β_j et D sont les coefficients et les degrés du modèle à déterminer.

Après avoir spécifié le modèle, nous identifierons D et β_j pour chaque variable r, d, V, t, t' et t'' .

Nous identifierons D en fonction du type de dépendance (linéaire / non linéaire) et de la sévérité de cette non-linéarité [78]. Pour $D = 1$, nous avons un modèle linéaire.

ε_i est indépendant du degré D du polynome, ε_i représente un bruit gaussien.

Nous pouvons en outre mettre l'équation (IV.1) sous une forme compacte (matrice) comme suit :

$$y = XB + \varepsilon \quad (\text{IV.2})$$

Avec

$$y = [y_1 \quad \dots \quad y_n]^T, \quad \varepsilon = [\varepsilon_1 \quad \dots \quad \varepsilon_n]^T \text{ et}$$

$$X = \begin{bmatrix} 1 & x_1 & x_1^2 & \dots & x_1^D \\ 1 & x_2 & x_2^2 & \dots & x_2^D \\ \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ 1 & x_n & x_n^2 & \dots & x_n^D \end{bmatrix} \quad (\text{IV. 3})$$

Où, $(.)^T$ est la transposée d'un vecteur / matrice. La matrice X de taille $(n \times D + 1)$ est supposée être un rang de colonne complète avec $n \geq D + 1$.

Selon l'équation (IV. 2) et les hypothèses ci-dessus sur ε et X, minimiser l'erreur entre y et $X\beta$ équivaut à résoudre le problème des moindres carrés bien connu suivant:

$$\text{argmin}_{\beta} \|y - X\beta\|_2^2 \quad (\text{IV. 4})$$

La solution du problème d'optimisation dans l'équation (IV.4) est le pseudo-inverse donné par :

$$\beta^* = X^T(X^T X)^{-1} \quad (\text{IV. 5})$$

IV.2.1.1. Modèles polynomiaux monovariables du courant maximum de décharge électrique associés à V, d et r indépendamment

Le modèle du courant maximum de décharge I_0 pour chaque variable indépendante tension appliquée V, distance inter-électrodes d et rayon de courbure de la pointe r et pour chaque matériau sélectionné est pris et calculé à partir du modèle général (équation IV. 1) et présenté dans l'équation suivante. L'équation IV.6 caractérise les expériences réalisées comme le montrent respectivement les Figures II.8, II.9 et II.10 (voir le deuxième chapitre). Degré du modèle $D = 4$, $d = [3,9, 3,6, 3,4, 2,9, 2,6, 2,4, 2,2, 1,9]$ cm, $V = 12$ kV, $r = 0,15$ mm pour $x = d$, $D = 7$, $V = [4, 4,5, 5, 5,5, 6, 6,5, 7, 7,5, 8, 8,5, 9, 9,5, 10, 12]$ kV, $r = 0,15$ mm pour chaque d sélectionné:

3.9, 3.4, 2.9, 2.4, 1.9 cm et pour $x = V$ et enfin $D = 1$, $r = [0.15, 0.18, 0.2, 0.4, 0.6, 0.8, 1]$ mm, $d = 2.9$ cm, $V = 12$ kV pour $x = r$.

$$I_0 = \sum_{i=0}^D a_i x^i \quad (\text{IV. 6})$$

IV.2.1.2. Modèles polynomiaux quadratiques à deux variables du courant maximum de décharge électrique associés à V, d

Le modèle quadratique du courant maximum de décharge I_0 correspondant aux variables tension appliquée V et distance inter-électrodes d obtenues pour un rayon de courbure de la pointe $r = 0.15$ mm, $V = [4, 6, 8, 10, 12]$ kV, $d = [3.9, 3.4, 2.9, 2.4, 1.9]$ cm et pour chaque matériau sélectionné caractérisant les expériences réalisées sur les figures II.8 et II.9 (voir chapitre II) sont également pris et calculés sur la base du modèle général (équation IV.1). Ce modèle est présenté par l'équation IV.7. Nous n'avons pas pris en compte la variation de la variable r en raison de la complexité de la réalisation expérimentale.

$$I_0 = a_0 + a_1 (d^2) + a_2 (V \times d) + a_3 (d) + a_4 (V) \quad (\text{IV.7})$$

IV.2.1.3. Modèles polynomiaux monovariabiles du courant maximum de décharge électrique associés à t, t' et t'' indépendamment

En appliquant l'équation générale (IV.1), nous obtenons les modèles polynomiaux de degré $D = 7$ pour $x =$ temps d'application de la tension t , $x =$ état de surface nette t' et $x =$ état de surface usée t'' correspondant à la variable dépendante $y =$ courant maximum de décharge I_0 et ceci pour les trois matériaux sélectionnés silicone, porcelaine et verre trempé. Les coefficients d'un même modèle sont différents et ils sont différents d'une variable indépendante à l'autre et d'un matériau à l'autre.

Par ailleurs, pour $x = t$, $x = t'$ et $x = t''$, le degré des modèles polynomiaux est élevé (7) et le nombre associé de termes estimés est également élevé (8). Ces polynômes ont des oscillations entre des valeurs de dimension parfaitement associées. Leur propriété d'interpolation est mauvaise, de plus ces fonctions ne sont pas localisées (fonction globale non localisée) : il s'agit ici d'une sur-régression en utilisant des

modèles polynomiaux (cas non linéaire). Cette sur-régression peut engendrer des oscillations au niveau des bornes (valeur initiale et valeur finale).

Par conséquent, le modèle polynomial peut manquer de précision lorsque la fonction à modéliser présente des non-linéarités sévères. La raison pour laquelle l'utilisation de fonctions rationnelles dans un deuxième lieu telles que la gaussienne pour la modélisation peut donner un bon ajustement.

IV.2.2. Modèle gaussien

Il existe de nombreux phénomènes physiques qui suivent une distribution gaussienne, c'est pourquoi ces fonctions sont largement utilisées. De plus, ces fonctions présentent des avantages majeurs tels que leur théorème limite central ainsi que la fonction gaussienne qui est la transformée de Fourier d'une fonction gaussienne [79-80].

Nous proposons la fonction gaussienne f donnée par l'équation (IV.8) caractérisant les expériences réalisées dans les figures II.11 et II.12.

$$f(x; \alpha) = \alpha_0 + \exp\left(\frac{-(x-\alpha_1)^2}{\alpha_2^2}\right) + \exp\left(\frac{-(x-\alpha_3)^2}{\alpha_4^2}\right) \quad (\text{IV. 8})$$

Où,

$$\alpha = [\alpha_0 \quad \dots \quad \alpha_4]^T \quad (\text{IV. 9})$$

Comme dans le cas polynomial, nos variables à expliquer peuvent être écrites sous forme matricielle comme suit:

$$y = F(x; \alpha) + \varepsilon \quad (\text{IV. 10})$$

Avec,

$$F(x, \alpha) = \begin{bmatrix} f(x_1; \alpha) \\ \vdots \\ f(x_n; \alpha) \end{bmatrix} \quad (\text{IV.11})$$

Il reste maintenant à déterminer le vecteur des coefficients α . Nous pouvons le faire en résolvant le problème d'optimisation suivant:

$$\operatorname{argmin}_{\alpha} \|y - F(x; \alpha)\|_2^2 \quad (\text{IV. 12})$$

Comparé à l'équation (IV.4), le problème d'optimisation de l'équation (IV.12) est plus difficile. Il n'a pas de solution analytique. De plus, il n'est pas convexe. Ainsi, nous essayons de le résoudre approximativement en utilisant certains algorithmes connus tels que l'algorithme de Levenberg-Marquardt [81], que nous utilisons dans ce chapitre. Il faut cependant mentionner que cet algorithme (comme les autres) n'est pas garanti pour trouver la solution optimale exacte de l'équation (IV.12). Néanmoins, il s'avère que cela fonctionne bien dans la pratique et qu'il réussit généralement à trouver une bonne solution approximative.

IV.2.2.1. Modèles gaussiens du courant maximum de décharge électrique associés à t , t' et t''

Nous développons ici des modèles de régression gaussiens (ces modèles sont sous la forme générale de l'équation (IV. 8)) de variable dépendante I_0 associé aux variables indépendantes t , t' et t'' . Ces modèles sont une caractérisation des expériences réalisées dans II.4.5 (figure II.11) et II.4.6 (figure II.12) (influence du temps d'application de la tension sur le courant maximum de décharge et influence de l'état de surface de l'isolant solide sur le courant maximum de décharge) du deuxième chapitre. Nous obtenons les modèles gaussiens pour $y =$ courant maximum de décharge I_0 correspondant à $x =$ temps d'application de la tension t , $x =$ état de surface nette t' et $x =$ état de surface usée t'' pour les trois matériaux étudiés (silicone, porcelaine et verre trempé).

IV.3. Résultats et discussion

IV.3.1. Modèle polynomial

IV.3.1.1. Modèles polynomiaux monovariables du courant maximum de décharge électrique associés à V , d et r indépendamment

La variation du courant maximum de décharge I_0 par rapport à la distance inter-électrodes d obtenue expérimentalement et avec le modèle mathématique polynomial mono-variable (équation IV.6) pour les trois matériaux est présentée sur la figure IV.1. d a été varié entre 1.9 et 3.9 cm pour une tension appliquée $V = 12$ kV et un rayon de courbure de la pointe $r = 0.15$ mm.

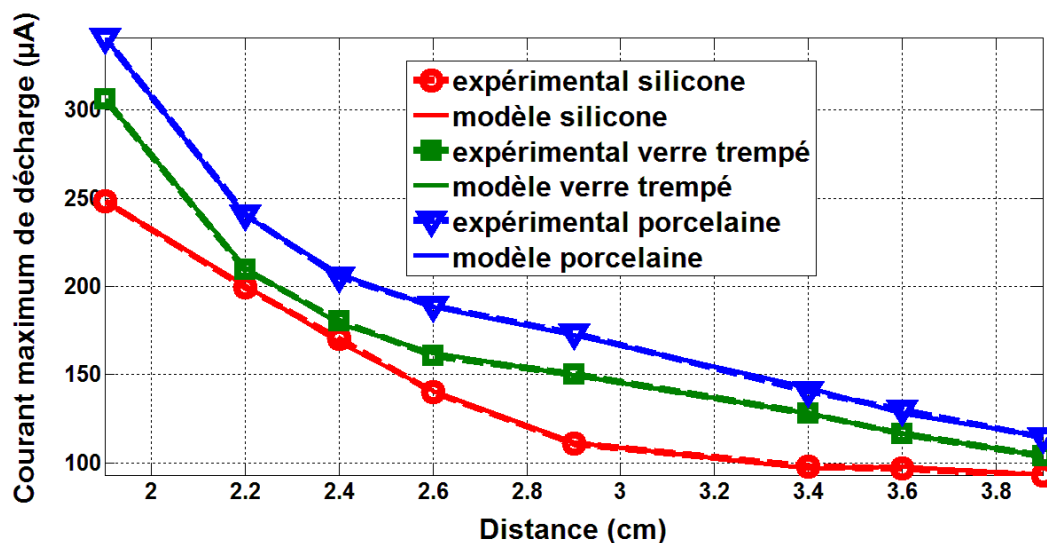
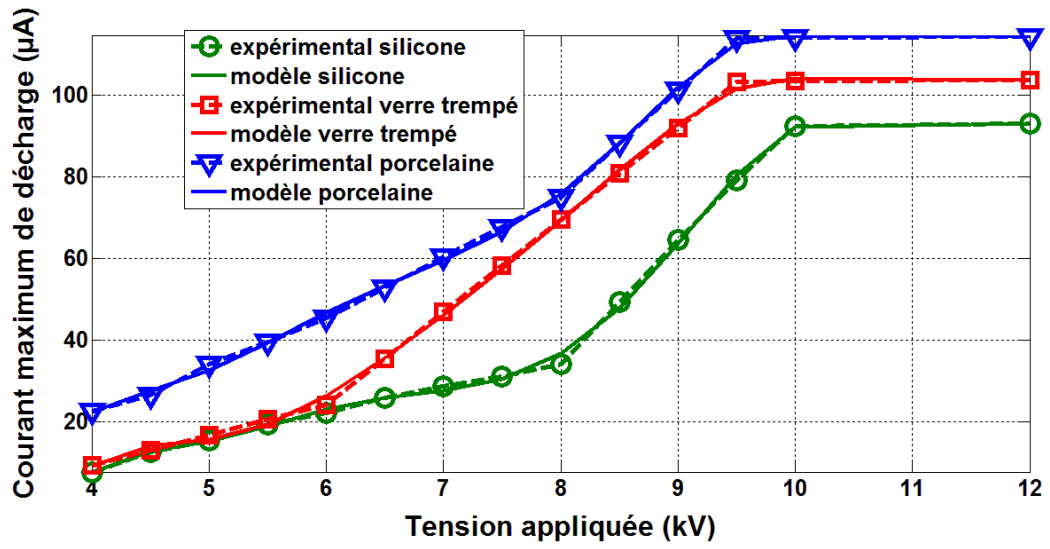


Figure IV.1. Variation du courant maximum de décharge I_0 en fonction de la distance inter-électrode obtenue expérimentalement et avec le modèle mathématique polynomial mono variable pour les trois matériaux.

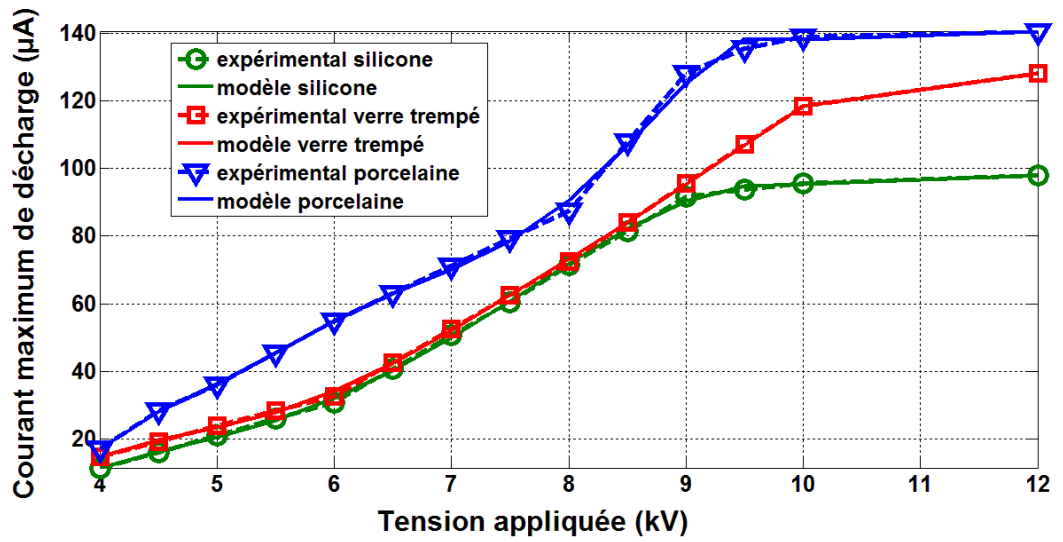
Rayon de courbure de la pointe $r = 0.15$ mm.

Tension appliquée $V = 12$ kV.

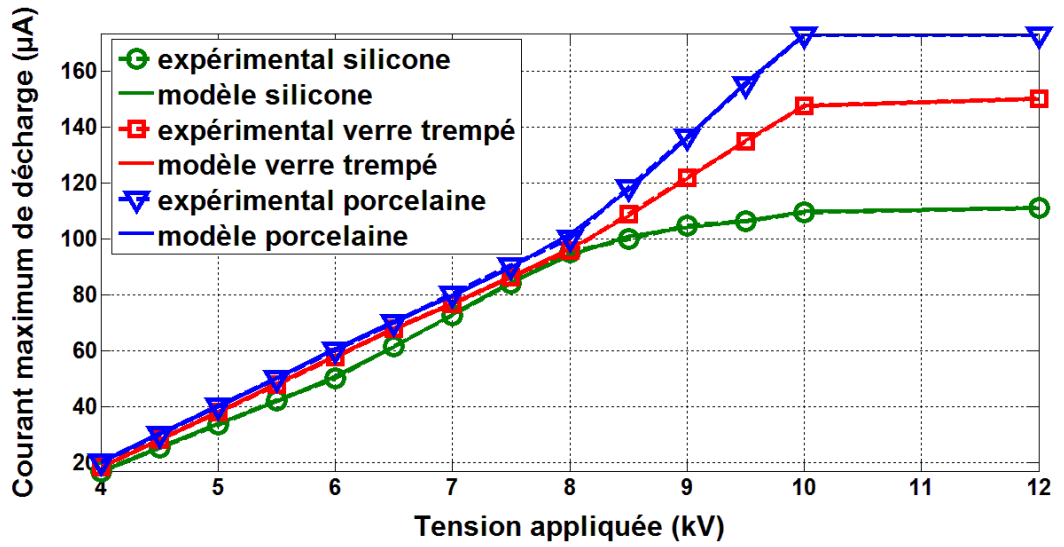
La variation du courant maximum de décharge I_0 en fonction de la tension appliquée V obtenue expérimentalement et avec le modèle polynomial mathématique mono-variable (équation IV.6) pour les trois matériaux sélectionnés est présentée sur la figure IV.2. La distance inter-électrodes d a été varié entre 1.9 et 3.9 cm pour V variant entre 4 et 12 kV et un rayon de courbure de la pointe $r = 0.15$ mm.



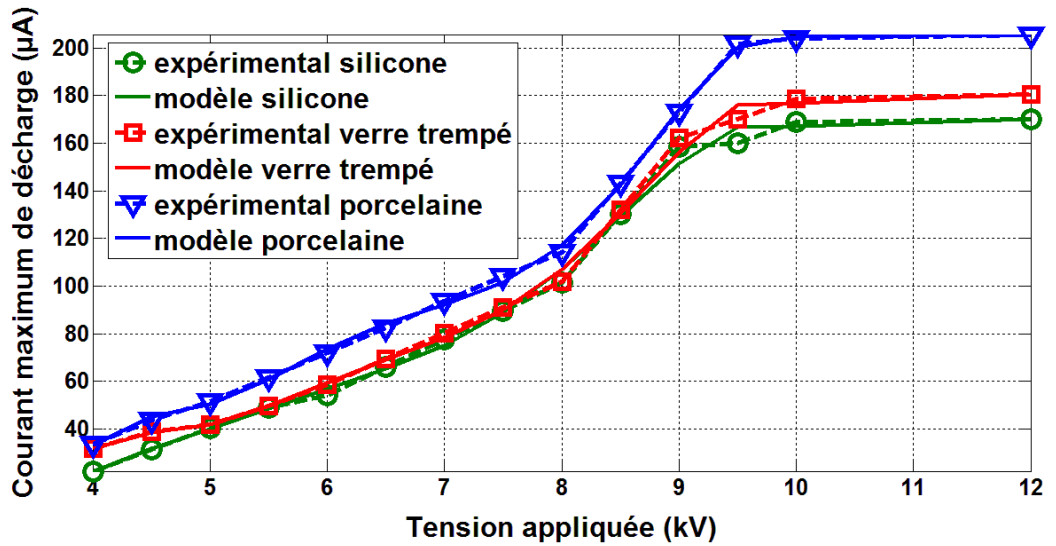
a) $d = 3.9$ cm



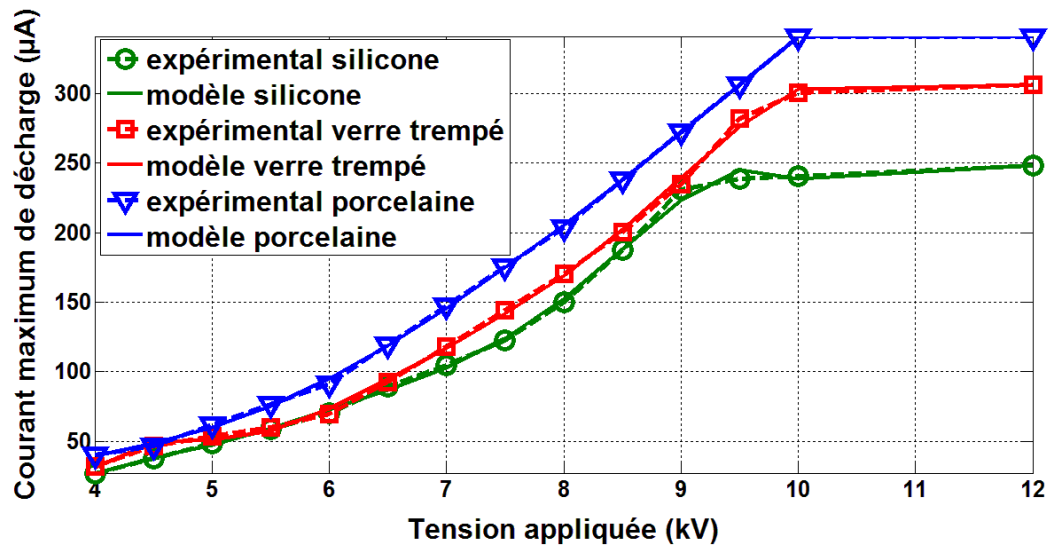
b) $d = 3.4$ cm



c) $d = 2.9$ cm



d) $d = 2.4$ cm



e) $d = 1.9 \text{ cm}$

Figure IV.2. Variation du courant maximum de décharge I_0 en fonction de la tension appliquée obtenue expérimentalement et avec modèle mathématique monovariable pour les trois matériaux sélectionnés.

Rayon de courbure de la pointe $r = 0.15 \text{ mm}$.

La variation du courant maximum de décharge I_0 en fonction du rayon de courbure de la pointe r obtenue expérimentalement et avec le modèle mathématique polynomial mono-variable (équation IV. 6) pour les trois matériaux sélectionnés est présentée dans la figure suivante. Le rayon r a été varié entre 0.15 et 1 mm, pour une tension appliquée V de 12 kV et une distance inter-électrode d de 2.9 cm.

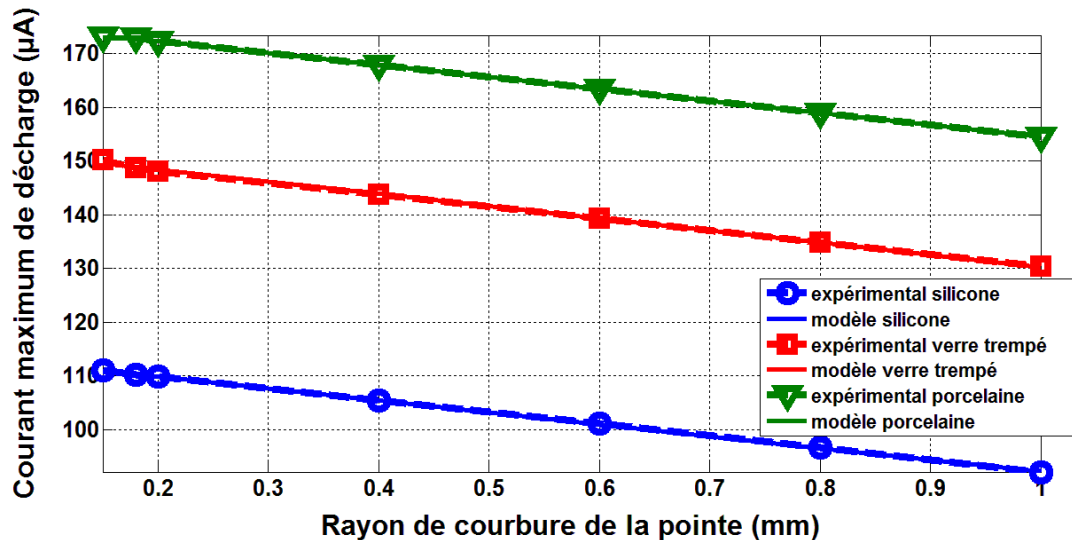


Figure IV.3. Variation du courant maximum de décharge I_0 en fonction du rayon de courbure de la pointe obtenue expérimentalement et avec modèle mathématique polynomial monovariable pour les trois matériaux sélectionnés.

Distance inter-électrodes $d = 2.9$ cm.

Tension appliquée $V = 12$ kV.

IV.3.1.2. Modèles polynomiaux quadratiques à deux variables du courant maximum de décharge électrique associés à V et d

La variation du courant maximum de décharge I_0 par rapport à la distance inter-électrodes d et la tension appliquée V obtenue expérimentalement et avec le modèle polynomial quadratique à deux variables (équation IV. 7) pour les trois matériaux est présentée sur la figure IV.4. La tension V varie entre 4 et 12 kV et d entre 1.9 et 3.9 cm pour un rayon de courbure de la pointe $r = 0.15$ mm.

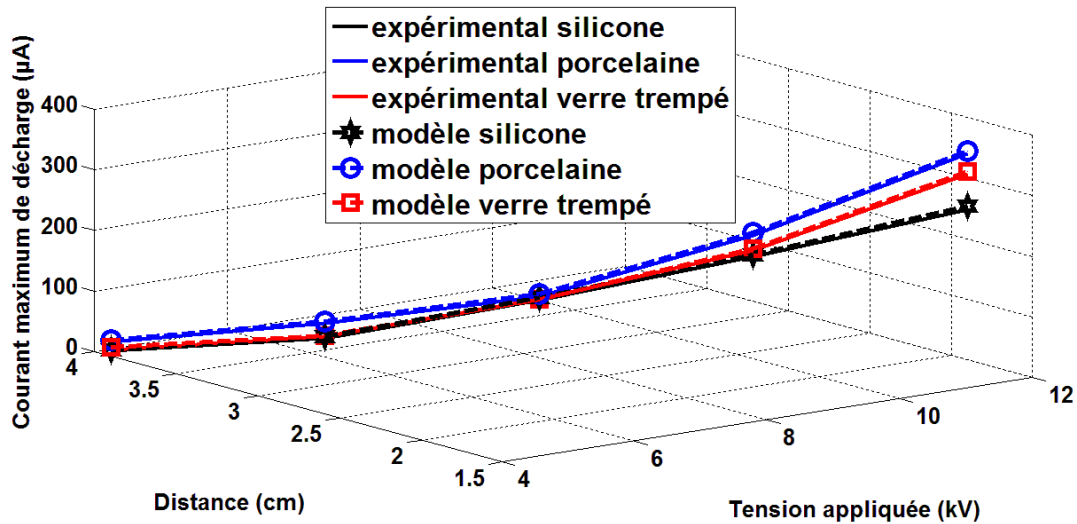


Figure IV.4. Variation du courant maximum de décharge I_0 en fonction de la distance inter-électrode et la tension appliquée obtenue expérimentalement et avec le modèle mathématique polynomial quadratique à deux variables pour les trois matériaux sélectionnés.

Rayon de courbure de la pointe $r = 0.15$ mm.

On observe une parfaite concordance entre les résultats expérimentaux et ceux du modèle mathématique polynomial monovarié et quadratique à deux variables, avec un très petit écart (Figures IV.1, IV.2, IV.3 et IV.4).

IV.3.1.2.1. Comparaison entre le modèle polynomial du courant maximum de décharge électrique mono et le double variable associé à V et d

Nous calculons l'erreur quadratique moyenne (RMSE), l'erreur en pourcentage absolue moyenne (MAPE) et le coefficient de détermination ajusté (R^2 adj) pour les deux types de modèle (polynomial monovarié associé à la tension appliquée V et à la distance inter-électrodes d indépendamment et polynomial double variable associé à V et à d au même temps). R^2 adj mesure l'adéquation d'un modèle produit par une régression et les données qui ont été utilisées pour le concevoir [82]. Les métriques suivantes sont calculées et représentées dans le tableau IV.1 et IV.2 pour chaque variable, matériau et modèle obtenus (polynomiaux mono et double variable pour $x = d$ et $x = V$), pour une meilleure compréhension et caractérisation du modèle de prédiction développé [83]. (SI, G, P et Para sont respectivement la silicone, le verre

trempe, la porcelaine et paramètre).

- Le coefficient de détermination R^2 adj

R^2_{adj} est donné par l'équation suivante:

$$R^2_{adj} = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (y_i - \hat{y}_i)^2}{\sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2} \quad (\text{IV.13})$$

Plus R^2 adj est proche de 1, meilleur est l'ajustement de régression de l'ensemble de données.

- Le pourcentage d'erreur absolu moyen MAPE (%):

MAPE (%) est donné par l'équation suivante.

$$MAPE = \frac{\sum_{i=1}^n |\hat{y}_i - y_i|}{n} \quad (\text{IV.14})$$

MAPE donne de meilleures informations sur la qualité de la prédiction. Plus les valeurs sont basses, meilleur est l'ajustement.

- L'erreur quadratique moyenne RMSE

RMSE est donné par l'équation suivante:

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (\hat{y}_i - y_i)^2}{n}} \quad (\text{IV.15})$$

RMSE nous renseigne sur la dispersion ou l'instabilité de la qualité de la prédiction.

Où: n est le nombre de données, y_i est la valeur de la i ème donnée, \bar{y} est la moyenne des valeurs de données et \hat{y}_i est la valeur de la i ème prédiction.

Tableau IV.1. Statistiques sur les coefficients de détermination et les erreurs du modèle d'estimation polynomial monovarié.

Para	Valeur																	
	x = d			x = V														
	SI	G	P	d = 3.9 cm			d = 3.4 cm			d = 2.9 cm			d = 2.4 cm			d = 1.9 cm		
				SI	G	P	SI	G	P	SI	G	P	SI	G	P	SI	G	P
RMSE (μA)	0.93	0.93	1.2	0.066	0.31	0.14	0.75	0.57	1.5	0.45	0.3	0.70	3.4	2.9	1.6	3.3	3.0	1.5
MAPE (%)	0.50	0.31	0.5	0.044	0.13	0.04	1.28	1.12	0.9	0.37	0.2	0.55	2.0	1.4	1.5	1.6	2.3	1.1
R^2 adj (-)	0.99	0.99	0.9	0.999	0.99	0.99	0.99	0.99	0.9	0.99	0.9	0.99	0.9	0.9	0.9	0.9	0.9	0.9

Tableau IV.2. Statistiques sur les coefficients de détermination et les erreurs du modèle d'estimation polynomial quadratique à deux variables.

Paramètre	Valeur		
	SI	G	P
RMSE (μA)	5.7227	5.3764	6.0101
MAPE (%)	9.7516	12.1945	5.8287
R^2 adj (-)	0.9967	0.9980	0.9978

D'après les tableaux IV.1 et IV.2, nous pouvons affirmer que l'erreur quadratique moyenne RMSE et l'erreur en pourcentage absolue moyenne MAPE (%) sont petites pour les deux modèles polynomiaux, encore plus petits pour le modèle monovarié. Les valeurs supérieures dans le cas monovarié (pour $x =$ distance inter-électrodes d et $x =$ tension appliquée V) sont $\text{RMSE} = 3.4441 \mu\text{A}$ et $\text{MAPE} (\%) = 2.3229\%$. Quant au modèle à deux variables, le RMSE varie entre 5.3764 et 6.0101 μA , et MAPE (%) varie entre 5.8287 et 12.1945%. En outre, le coefficient de détermination ajusté R^2 adj est presque de la même valeur pour les deux modèles, à savoir près de 0.99.

RMSE, MAPE et R^2 adj donnent des informations sur la précision et les performances des modèles [84]. Par conséquent, les résultats obtenus montrent que les deux modèles étudiés sont précis et performants. De plus le modèle quadratique à deux variables permet d'évaluer simultanément et avec succès l'influence de V et d sur la décharge électrique. Ceci nous amène à appliquer ce dernier sur des gammes V et d de 10 à 50 kV et de 1.9 à 8 cm respectivement.

IV. 3.1.2.2. Application du modèle polynomial du courant maximum de décharge électrique quadratique à deux variables pour les gammes V et d de 10 à 50 kV et de 1.9 à 8 cm respectivement

Le modèle obtenu ne peut être utilisé que dans le domaine d'étude, toute extrapolation est très risquée, car elle pourrait apporter des résultats très différents de ceux attendus.

Une étape obligatoire avant d'utiliser le modèle en élaboration sera de tester par une expérience au centre du domaine dans lequel nous souhaitons appliquer notre modèle

afin de voir si la valeur prédite par ce modèle est proche de la valeur expérimentale. Dans le cas favorable, il est donc jugé utile d'adapter l'expression du modèle.

A. Test du modèle polynomial quadratique à deux variables du courant maximum de décharge électrique au centre des gammes V et d de 10 à 50 kV et 1.9 à 8 cm respectivement

La variation du courant maximum de décharge I_0 par rapport à la distance inter-électrodes d et à la tension appliquée V a été examinée au centre des gammes V et d de 10 à 50 kV et 1.9 à 8 cm respectivement pour une variable V comprise entre 18 et 34 kV, d entre 2 et 4 cm et un rayon de courbure de la pointe $r = 0.15$ mm. Les résultats obtenus expérimentalement et avec le modèle mathématique polynomial quadratique à deux variables (équation IV.7) pour les trois matériaux sont présentés sur la figure IV.5.

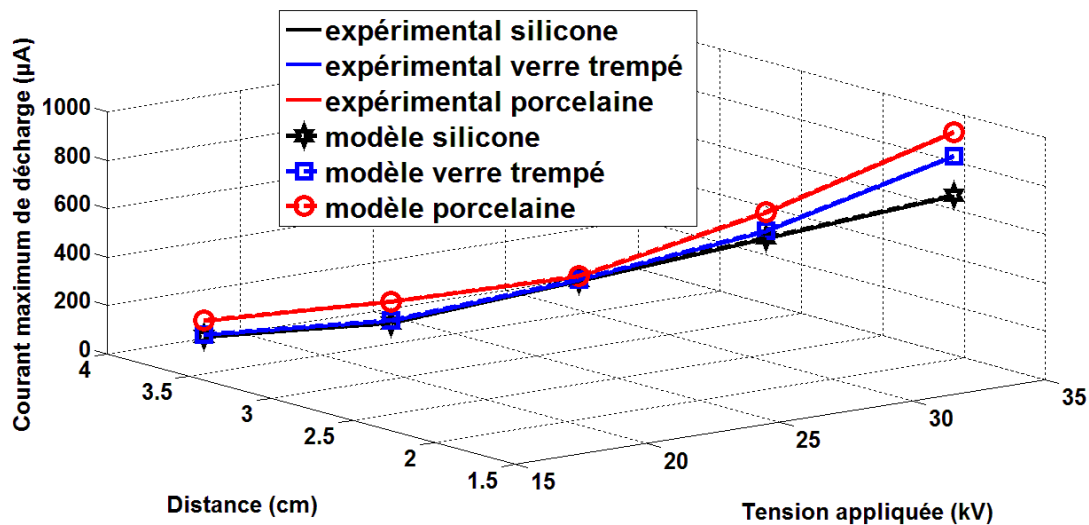


Figure IV.5. Variation du courant maximum de décharge I_0 en fonction de la distance inter-électrode et la tension appliquée obtenue expérimentalement et avec le modèle mathématique polynomial quadratique à deux variables pour les trois matériaux sélectionnés.

Rayon de courbure de la pointe $r = 0.15$ mm.

Les résultats de la modélisation sont en plein accord avec les données expérimentales, avec une très petite marge d'erreur. Cela nous permet d'utiliser ce modèle dans les gammes de la tension appliquée V et de la distance inter-électrodes d de 10 à 50 kV et

de 1.9 à 8 cm respectivement.

De plus, la validation du modèle quadratique à deux variables a été réalisée, ainsi sa précision et sa faisabilité sont démontrées.

B. Modèle quadratique à deux variables du courant maximum de décharge électrique sur les gammes V et d de 10 à 50 kV et 1.9 à 8 cm respectivement

La variation du courant maximum de décharge I_0 par rapport à la distance inter-électrodes d et à la tension appliquée V obtenue à partir du modèle mathématique polynomial quadratique à deux variables (équation IV.7) pour les trois matériaux est présentée dans le tableau IV.3. d varie entre 1.9 et 8 cm et V entre 10 et 50 kV. Le rayon de courbure de la pointe r a été fixé à 0.15 mm.

Tableau IV.3. Variation du courant maximum de décharge I_0 par rapport à la distance inter-électrodes d et la tension appliquée V pour les gammes V et d de 10 à 50 kV et 1.9 à 8 cm respectivement, pour les trois matériaux obtenus à partir du modèle mathématique polynomial quadratique à deux variables.

Paramètre	Valeur										
V (kV)	10	15	20	30	38	40	42	44	46	48	50
d (cm)	1.9	2	3	4	4.5	5	5.5	6	6.5	7	8
I_0 de la silicone : I_{0SI} (μ A)	211.08	235.34	305.1	467.32	520.76	610.55	689.62	721.18	770.56	805.09	868.45
I_0 de la porcelaine: I_{0P} (μ A)	286.67	310.27	322.03	543.55	595.45	681.88	766.21	795.35	841.57	876.69	948.58
I_0 du verre trempé: I_{0G} (μ A)	258.78	286.42	310.70	515.19	569.73	657.34	730.20	766.81	813.96	848.58	914.12

Du tableau IV.3, nous notons que pour un rayon de courbure de la pointe $r = 0.15$ mm et pour les trois matériaux étudiés (silicone, porcelaine et verre trempé) dans des gammes de la tension appliquée V et de la distance inter-électrodes d de 10 à 50 kV et 1.9 à 8 cm respectivement, les isolateurs en silicone ont le plus petit courant de décharge I_{0SI} (les décharges électriques sont faibles) et ce, quel que soit V et son d correspondant.

IV.3.1.3. Modèles polynomiaux monovariables du courant maximum de décharge électrique associés à t , t' et t''

Les figures. IV.6, IV.7 et IV.8 permettent de comparer le courant maximum de décharge I_0 obtenu à partir des expériences réalisées et les modèles polynomiaux pour $x =$ temps d'application de la tension t , $x =$ état de surface nette t' et $x =$ état de surface usée t'' dans l'ordre.

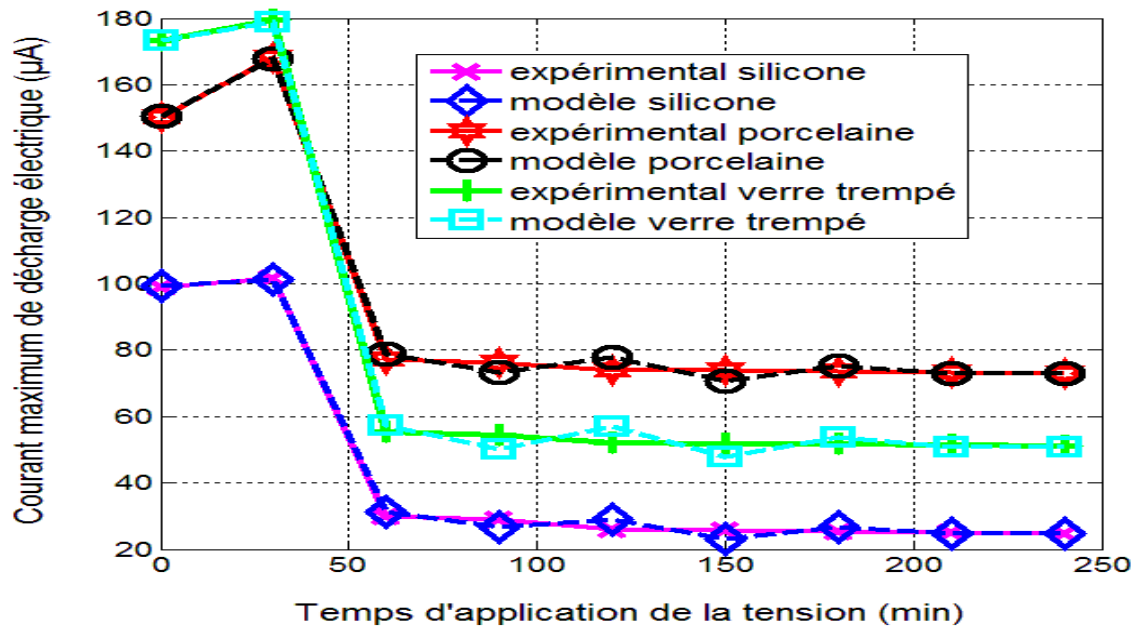


Figure IV.6. Influence du temps d'application de la tension t sur courant maximum de décharge I_0 mesurée expérimentalement et calculée à partir du modèle polynomial pour les matériaux sélectionnés.

Electrode active sans défaut.

Rayon de courbure de la pointe $r = 0.15$ mm.

Surface isolante nette.

Tension appliquée $V = 12$ kV.

Distance inter-électrodes $d = 2.9$ cm.

($x =$ temps d'application de la tension t).

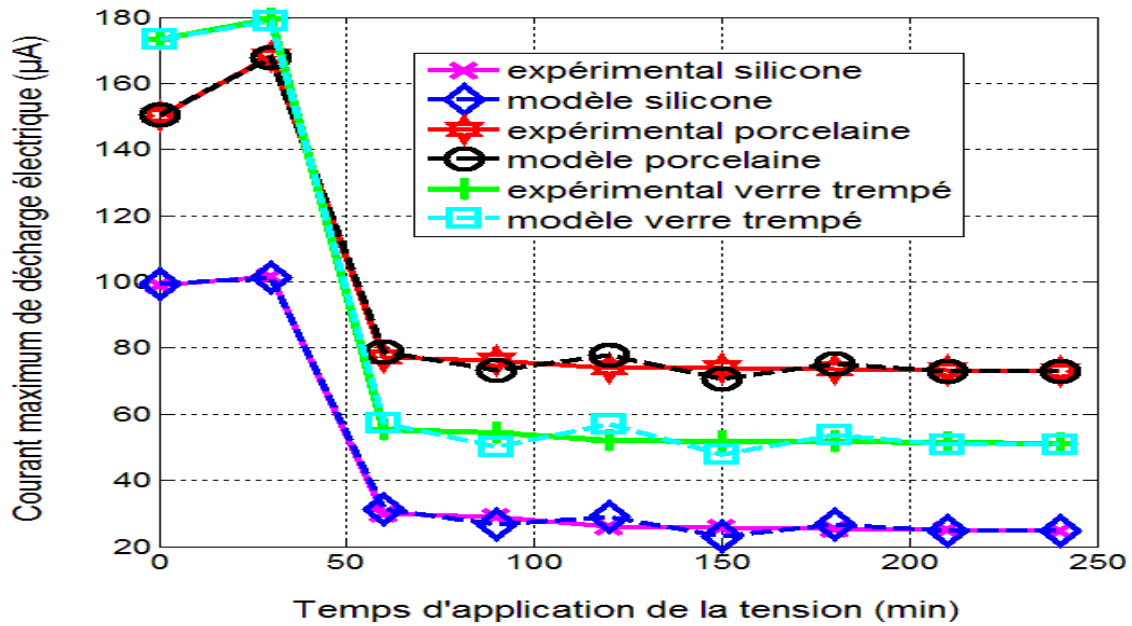


Figure IV.7. Influence du temps d'application de la tension t sur le courant maximum de décharge I_0 mesurée expérimentalement et calculée à partir du modèle polynomial pour les matériaux sélectionnés.

Surface isolante nette.

Electrode active sans défaut.

Rayon de courbure de la pointe $r = 0.15$ mm.

Tension appliquée $V = 12$ kV.

Distance inter-électrodes $d = 2.9$ cm.

($x = \text{état de surface nette } t'$).

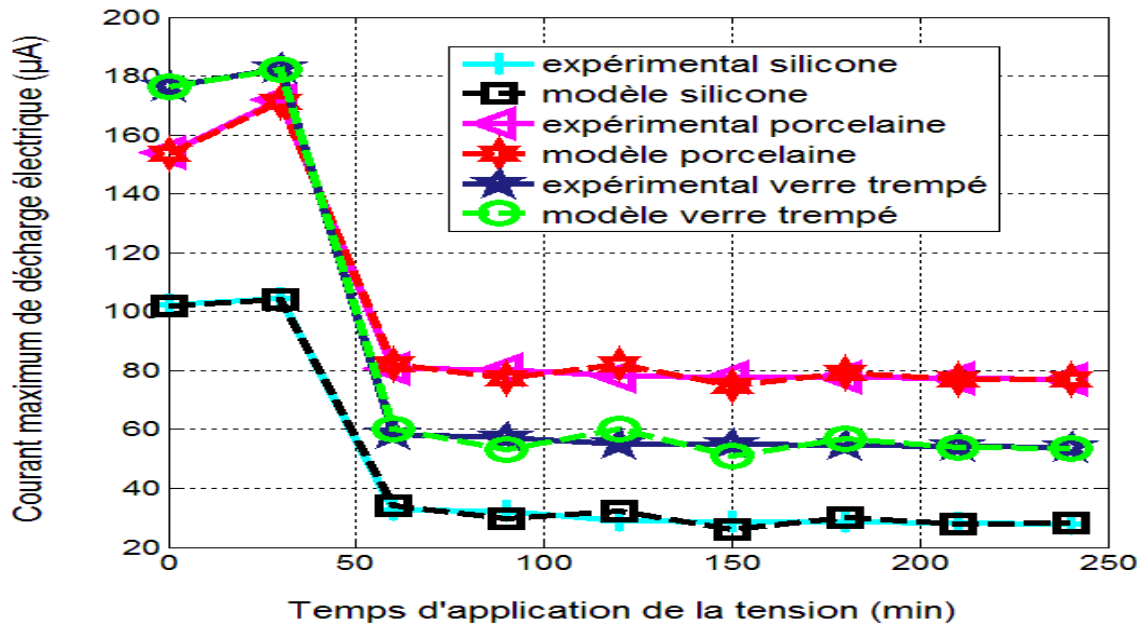


Figure IV.8. Influence du temps d'application de la tension t sur le courant maximum de décharge I_0 mesurée expérimentalement et calculée à partir du modèle polynomial pour les matériaux sélectionnés.

Surface isolante frottée et usée avec du papier de verre.

Electrode active sans défaut.

Rayon de courbure de la pointe $r = 0.15$ mm.

Tension appliquée $V = 12$ kV.

Distance inter-électrodes $d = 2.9$ cm.

($x = \text{état de surface usée } t''$).

IV.3.2. Modèle gaussien

IV.3.2.1. Modèles gaussiens du courant maximum de décharge électrique associés à t , t' et t''

Les figures. IV.9, IV.10 et IV.11 permettent de comparer le courant maximum de décharge I_0 obtenu à partir des expériences réalisées et les modèles gaussiens pour la variable $x = \text{temps d'application de la tension } t$, $x = \text{état de surface nette } t'$ et $x = \text{état de surface usée } t''$ dans l'ordre.

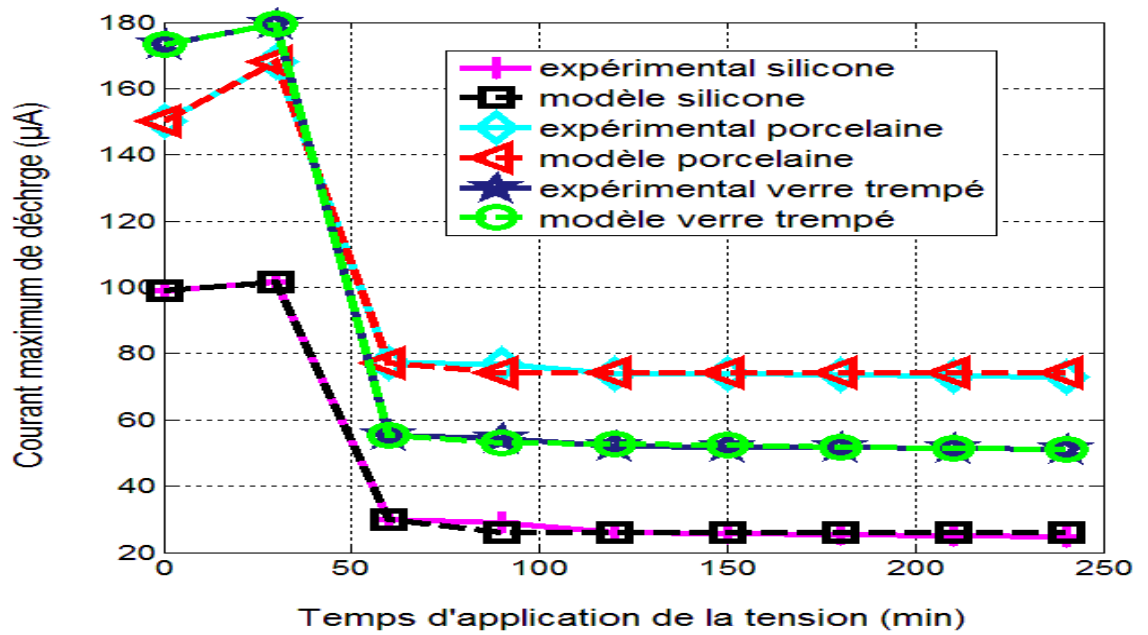


Figure IV.9. Influence du temps d'application de la tension t sur le courant maximum de décharge I_0 mesurée expérimentalement et calculée à partir du modèle gaussien pour les matériaux sélectionnés.

Electrode active sans défaut.

Rayon de courbure de la pointe $r = 0.15$ mm.

Surface isolante nette.

Tension appliquée $V = 12$ kV.

Distance inter-électrodes $d = 2.9$ cm.

(x = temps d'application de la tension t).

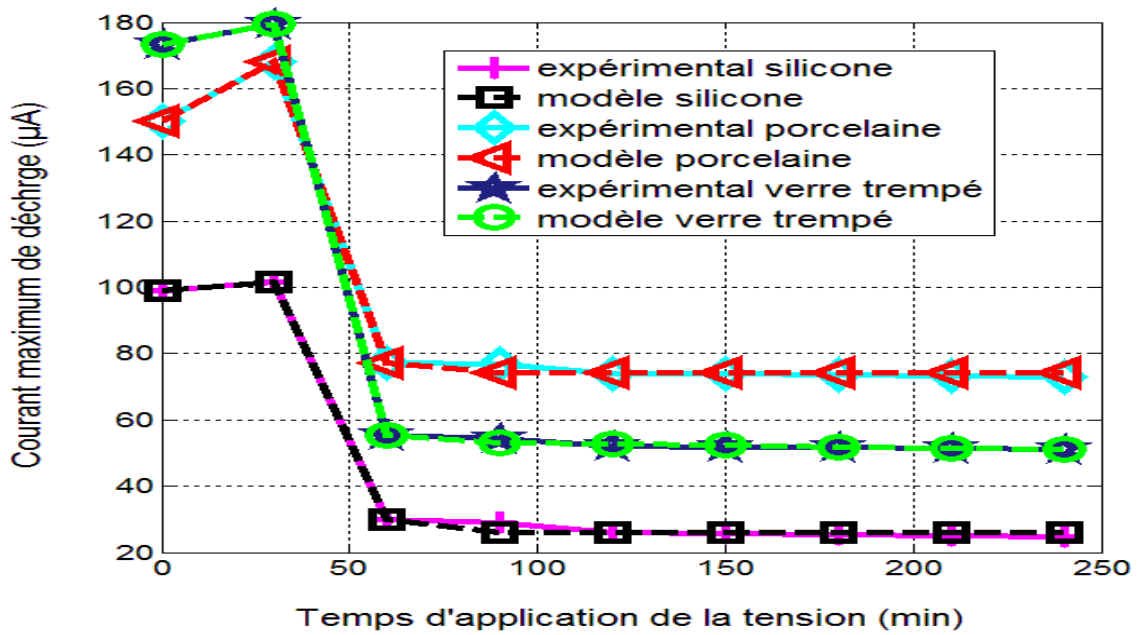


Figure IV.10. Influence du temps d'application de la tension t sur le courant maximum de décharge I_0 mesurée expérimentalement et calculée à partir du modèle gaussien pour des matériaux sélectionnés.

Surface isolante nette.

Electrode active sans défaut.

Rayon de courbure de la pointe $r = 0.15$ mm.

Tension appliquée $V = 12$ kV.

Distance inter-électrodes $d = 2.9$ cm.

($x = \text{état de surface nette } t'$).

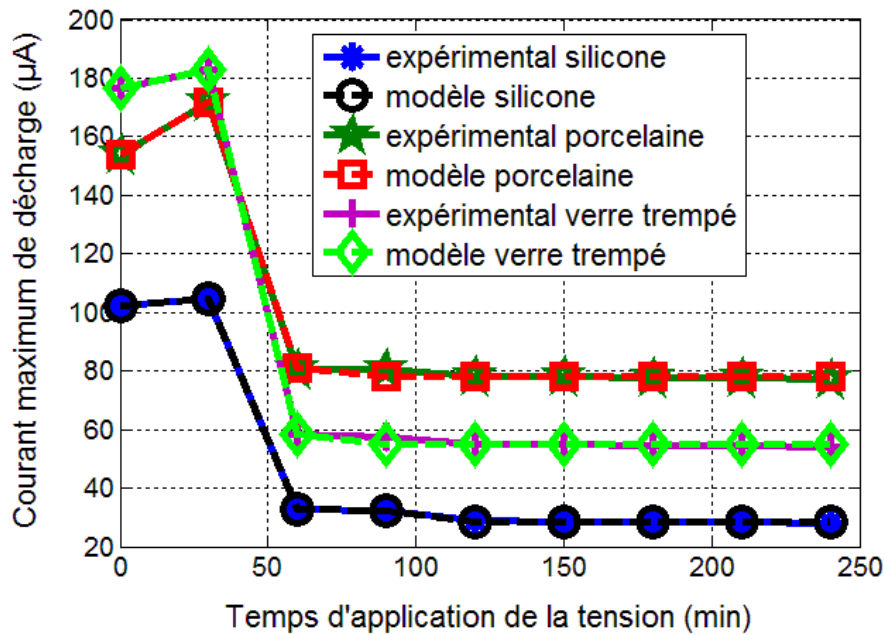


Figure IV.11. Influence du temps d'application de la tension t sur le courant maximum de décharge I_0 mesurée expérimentalement et calculée à partir du modèle gaussien pour les matériaux sélectionnés.

Surface isolante utilisée et frottée avec du papier de verre.

Electrode active sans défaut.

Rayon de courbure de la pointe $r = 0.15$ mm.

Tension appliquée $V = 12$ kV.

Distance inter-électrodes $d = 2.9$ cm.

($x = \text{état de surface usée } t''$).

A. Comparaison entre le modèle polynomial et gaussien pour les variables indépendantes t , t' et t''

Les statistiques d'erreurs des modèles de régression gaussiens et polynomiaux associées aux variables : temps d'application de la tension t , état de surface nette t' et état de surface usée t'' obtenus dans cette étude sont données dans le tableau IV.4.

Tableau IV.4. Statistiques d'erreurs des modèles de régression gaussiens et polynomiaux obtenus dans l'étude.

Paramètre	Valeur											
	modèle Polynomial						modèle Gaussien					
	x = t et x = t'			x = t''			x = t et x = t'			x = t''		
	Si	G	Po	Si	G	Po	Si	G	Po	Si	G	Po
RMSE (μ A)	5.20 6	6.25 7	8.22	5.3 47	6.3 92	8.24 8	2.43 8	1.87 3	1.83 7	0.46 33	1.77 1	1.89 4
MAPE (%)	27.1 1	39.1 5	67.5 6	28. 59	40. 85	68.0 2	11.8 9	7.01 3	6.74 6	0.42 92	6.27 2	7.17 2
R ² adj (-)	0.97 44	0.97 24	0.97 74	0.9 73	0.9 71	0.97 73	0.99 44	0.99 75	0.99 89	0.99 98	0.99 78	0.99 88

Où: Si, G, Po sont respectivement : silicone, verre trempé et porcelaine.

D'après le tableau IV.4, pour $x =$ temps d'application de la tension t , $x =$ état de surface nette t' et $x =$ état de surface usée t'' , on voit que le pourcentage d'erreur absolu moyen MAPE (%) est acceptable pour les deux modèles (polynomial et gaussien) mais encore plus adapté pour le gaussien : un pourcentage d'erreur absolu moyen inférieur à 12% a été observé pour ce dernier, de plus le modèle polynomial présente des valeurs aberrantes (67.56 et 68.02%) qui sont généralement dues à des erreurs de mesure.

Les figures IV.6 à IV.11 et le tableau IV.4 montrent que les résultats des modèles de prédiction développés (polynomial et gaussien) sont précis. En d'autres termes, les valeurs prédites par les modèles sont assez proches des vraies valeurs. Néanmoins, la précision, la robustesse et la rigueur du modèle gaussien (cas où $x = t$, $x = t'$ et $x = t''$) sont vraiment meilleures. Ceci nous a conduit à tester et valider le modèle gaussien

obtenu (modèle gaussien obtenu pour $x = t$, $x = t'$ et $x = t''$ à partir de l'équation générale (IV.8)) pour $x = t$, $x = t'$ et $x = t''$.

B. Validation du modèle gaussien pour t , t' et t''

Les métriques mentionnées et calculées ci-dessus ne sont malheureusement pas suffisantes pour la précision de la prédiction. La validation du modèle à mettre en place est une phase essentielle pour montrer que le modèle est fiable et pertinent. SB. Bai et al. ont validé des modèles de régression logistiques pour des cartes de susceptibilité aux glissement de terrain [85], tandis que Emil Turkedjiev et al. ont validé dans leurs travaux le modèle du réseau de neurone artificiel pour le secteur bancaire britannique [86]. Pour se faire, l'ensemble de données a été divisé en deux groupes, l'un pour créer le modèle de régression, tandis que l'autre est utilisé pour valider le modèle en le testant. Les valeurs des variables d'entrée utilisées pour tester et valider le modèle gaussien obtenu dans l'étude (modèle gaussien obtenu pour $x =$ temps d'application de la tension t , $x =$ état de surface nette t' et $x =$ état de surface usée t'' à partir de l'équation générale (IV.8)) pour $x = t$, $x = t'$ et $x = t''$ sont donnés dans le tableau IV.5.

Tableau IV.5. Variables d'entrée pour la validation des modèles de régression Gaussien.

Modèle à être valider	Variable explicative	Gamme des valeurs
Gaussien	$x = t$ (min)	[270 300 330 360 390 420 450 480 510 540 570 600]
	$x = t'$ (min)	[270 300 330 360 390 420 450 480 510 540 570 600]
	$x = t''$ (min)	[270 300 330 360 390 420 450 480 510 540 570 600]

Les figures IV.12, IV.13 et IV.14 comparent le courant maximum de décharge I_0 mesuré expérimentalement et calculé à partir du modèle afin de tester et valider le

modèle gaussien obtenu dans l'étude (modèle gaussien obtenu pour $x =$ temps d'application de la tension t , $x =$ état de surface nette t' et $x =$ état de surface usée t'' à partir de l'équation générale (IV.8)) pour $x = t$, $x = t'$ et $x = t''$ respectivement.

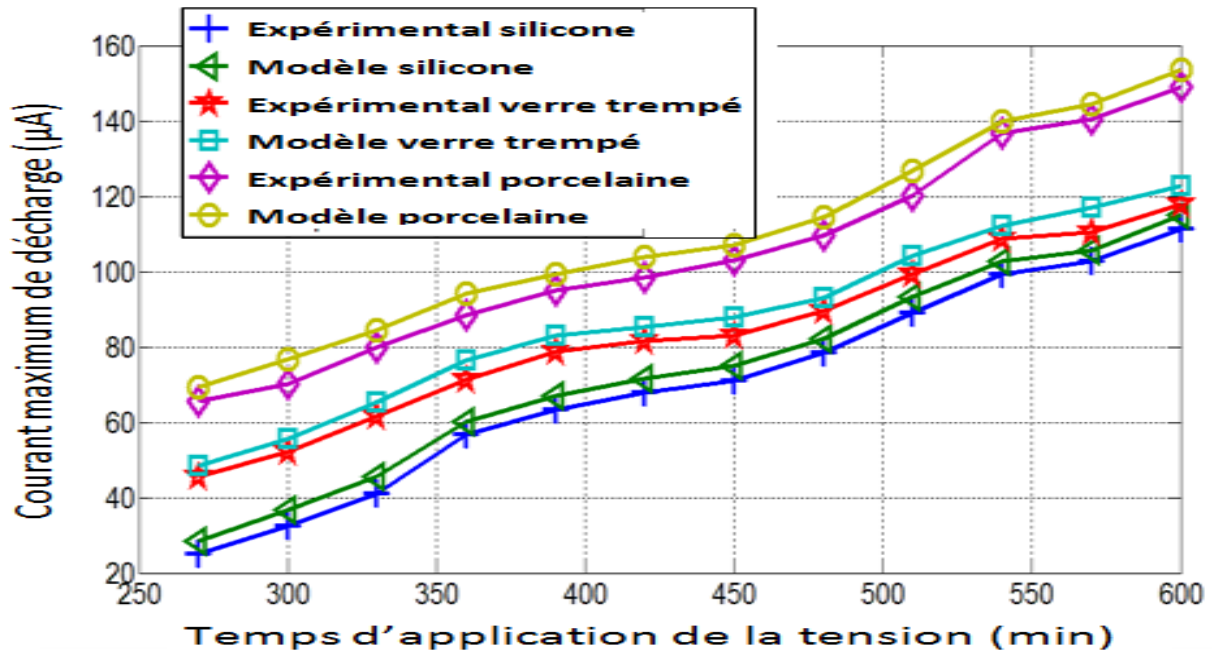


Figure IV.12. Influence du temps d'application de la tension t sur le courant maximum de décharge I_0 mesurée expérimentalement et avec le modèle gaussien pour les matériaux sélectionnés.

Electrode active sans défaut.

Rayon de courbure de la pointe $r = 0.15$ mm.

Surface isolante nette.

Tension appliquée $V = 12$ kV.

Distance inter-électrodes $d = 2.9$ cm.

($x =$ temps d'application de la tension t).

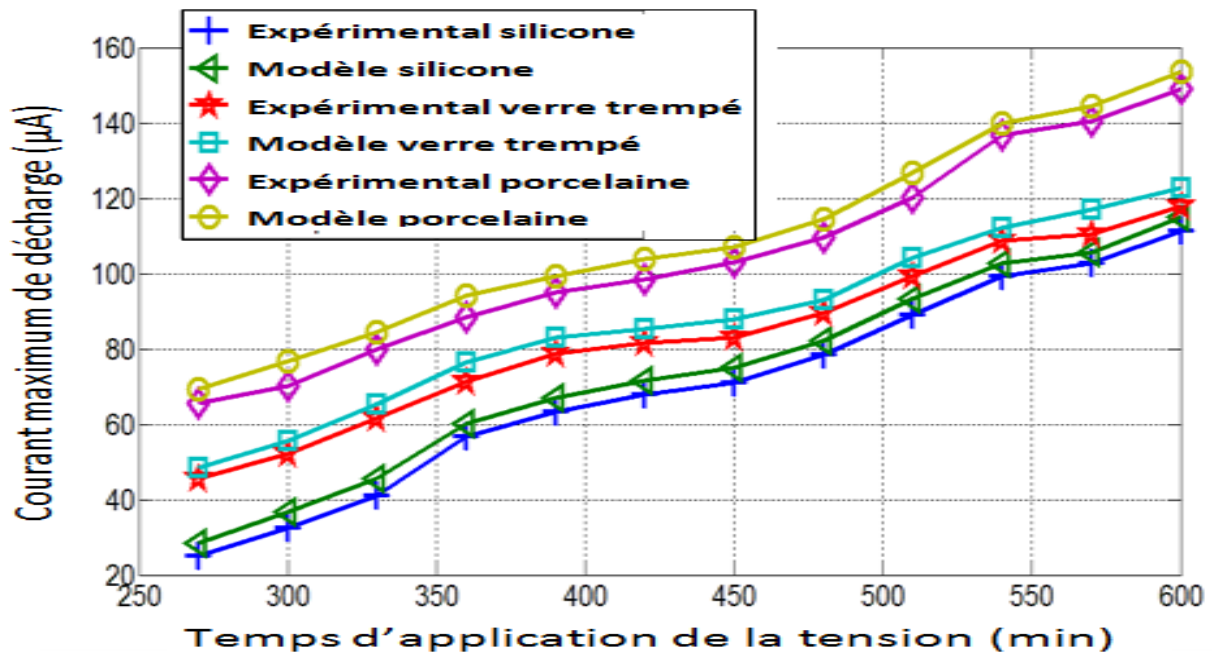


Figure IV.13. Influence du temps d'application de la tension t sur le courant maximum de décharge I_0 mesurée expérimentalement et avec le modèle gaussien pour les matériaux sélectionnés.

Isolant solide à surface nette.

Electrode active sans défaut.

Rayon de courbure de la pointe $r = 0.15$ mm.

Tension appliquée $V = 12$ kV.

Distance inter-électrodes $d = 2.9$ cm.

($x = \text{état de surface nette } t'$).

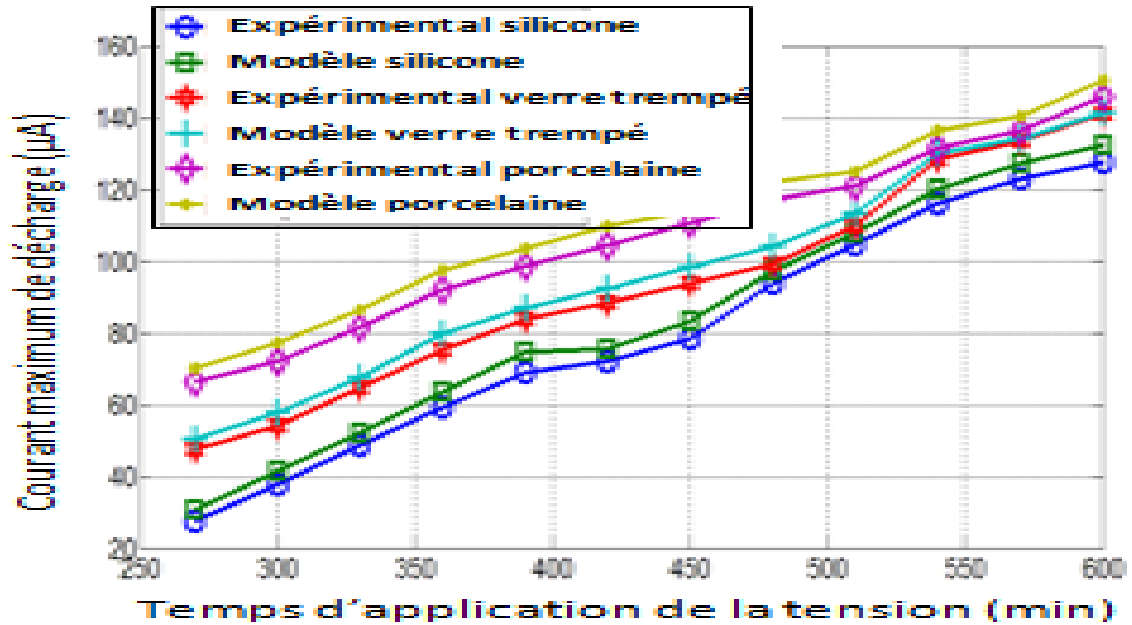


Figure IV.14. Influence du temps d'application de la tension t sur le courant maximum de décharge I_0 mesurée expérimentalement et avec un modèle gaussien pour les matériaux sélectionnés.

Isolant solide avec une surface usée et frottée avec du papier de verre.

Electrode active sans défaut.

Rayon de courbure de la pointe $r = 0.15$ mm.

Tension appliquée $V = 12$ kV.

Distance inter-électrodes $d = 2.9$ cm.

($x = \text{état de surface usée } t''$).

On peut noter que les courbes du courant maximum de décharge I_0 (figures IV.12 à IV.14) selon les modèles de régression développés (gaussiens) et les tests expérimentaux sont très proches quelle que soit la variable explicative et le matériau étudié.

Les résultats obtenus montrent que les modèles développés: gaussiens (modèle gaussien obtenu pour $x = \text{temps d'application de la tension } t$, $x = \text{état de surface nette } t'$ et $x = \text{état de surface usée } t''$ à partir de l'équation générale (IV.8)) sont validées. Par conséquent, ces modèles sont en effet capables de prédire les valeurs de variable à expliquer avec précision.

IV.4. Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons montré à partir de nos résultats de modélisation des courants maximums de décharge électrique que le mécanisme de la décharge de surface entre deux électrodes (pointe et plane) sur des échantillons d'isolateurs (silicone, porcelaine et verre trempé) à la triple jonction est régi par la distance inter-électrodes, la tension appliquée, le rayon de courbure de la pointe de l'électrode active, le temps d'application de la tension ainsi que l'état de surface de l'isolant solide.

En effet, en haute tension de précision, et pour prédire les valeurs de la variable à expliquer (plus que souvent cette variable est coûteuse ou prend du temps à acquérir), nous avons développé des modèles de régression polynomiaux et gaussiens qui estiment correctement cette variable et décrivent les phénomènes de décharge étudiés expérimentalement dans le deuxième chapitre.

Pour cela, six variables explicatives (distance inter-électrodes, tension appliquée, rayon de courbure de la pointe, temps d'application de la tension, état de surface nette et état de surface usée avec du papier de verre de l'isolant solide) ont été assimilées en tant qu'entrées des modèles de régression polynomiaux monovariables du courant maximum de décharge électrique. De plus, des modèles polynomiaux quadratiques à deux variables : distance et tension appliquée sont développés prédisant avec précision la décharge électrique. D'autre part, des modèles gaussiens de la décharge sont donnés pour les trois variables : temps d'application de la tension, état de surface nette et état de surface frotté usé avec du papier de verre de l'isolant solide.

Les modèles polynomiaux doubles variables peuvent simuler la décharge électrique simultanément en fonction de deux variables: tension appliquée V et distance inter-électrodes d , ceci avec un coefficient de détermination ajusté R^2 adj près de 0.99. Ces derniers (modèles polynomiaux quadratiques à double variables) ont de meilleures prédictions. La raison pour laquelle nous les avons mis en place les avons testés et validés ensuite adaptés aux gammes de tension et distance de 10 à 50 kV et de 1.9 à 8 cm respectivement.

D'autre part, concernant les trois variables : temps d'application de la tension, état de surface nette et état de surface usée avec du papier de verre, le coefficient de détermination R^2 adj est limité à 0.9774, 0.9773 et 0.994 pour le modèle polynomial.

Alors que cette limite R^2_{adj} est de 0.9989 et 0.9998 pour le modèle gaussien, cela démontre que 97.74, 97.73, 99.4, 99.89 et 99.98% de la variation de décharge électrique est justifiée par la variation de trois variables explicatives pour le modèle polynomial ainsi que pour le gaussien.

Concernant les modèles gaussiens pour les variables indépendantes, le temps et l'état de surface nette / usée ont de meilleures prédictions. C'est la raison pour laquelle nous les avons mis en place les avons testés et validés.

Les modèles proposés sont très fiables, basés sur un nombre réduit d'expériences dont l'objectif principal est l'optimisation des décharges électriques. Ces modèles sont une forme d'économie d'énergie et de financement. Ils fournissent à l'industrie des informations et des conseils pour faire le bon choix en matière de technologie d'isolant, tout en apportant une attention particulière à sa conception présentant le meilleur rapport coût / temps / performances attendues.

Dans ce travail, le courant de décharge au niveau de la triple jonction métal/ air/ solide isolant a été étudié expérimentalement pour trois types de matériaux isolants, à savoir la silicone, la porcelaine et le verre trempé. Le courant de décharge est fortement influencé par la permittivité de l'isolant solide. En effet, le courant de décharge est plus élevé pour l'isolant à haute permittivité (porcelaine et verre trempé). Selon nos résultats expérimentaux et nos tentatives d'interprétation en utilisant la littérature scientifique, les décharges de surface seraient encore plus courtes et moins ramifiées lorsque la permittivité diélectrique est plus faible. Ceci pourrait s'expliquer par le fait que l'isolant en silicone présente de meilleures performances diélectriques que la porcelaine et le verre trempé.

De plus, les courants de décharge sont plus élevés lorsque la tension appliquée est plus élevée et lorsque la distance inter-électrodes est plus petite. Par ailleurs, les décharges sont fortement dépendantes du rayon de courbure de la pointe, augmentant avec la diminution du rayon. En outre, le vieillissement électrique impacte fortement l'isolation. Cette dégradation de la surface diélectrique se caractérise par une augmentation du courant de décharge pendant la première période de vieillissement et une diminution du courant pendant la deuxième période. De plus, l'état de surface de l'isolant solide semble avoir une grande influence sur les courants de décharge. C'est ainsi que le courant sur les surfaces polies est plus faible que sur les surfaces rugueuses.

L'intérêt de modéliser le courant par un polynôme est de pouvoir calculer toutes les réponses du domaine d'étude sans être obligé de réaliser les expériences. Cependant, les modèles de régression polynomiaux du courant de décharge électrique proposés (mono variable et quadratique à deux variables) fournissent une estimation précise et raisonnable des courants par rapport aux six variables considérées, à savoir la tension, la distance inter-électrode, le rayon de courbure de la pointe, le temps d'application de la tension, état de surface nette et dégradée de l'isolant solide.

En outre, le modèle polynomial quadratique à deux variables peut donner des informations sur l'influence des deux variables, tension et distance, sur la décharge électrique à la fois. Le coefficient de détermination R^2_{adj} est d'environ 0.99, ce qui révèle que 99 % de la variation maximale du courant de décharge peut être justifiée

par un changement de deux variables. La raison pour laquelle nous avons validé le modèle polynomial quadratique à deux variables et appliqué pour les plages de tension et de distance de 10 à 50 kV et de 1.9 à 8 cm respectivement. D'autre part, cette étude a mis en place des modèles gaussiens rigoureux avec R^2_{adj} égal à 0.9989 pour le temps d'application de la tension et état de surface nette, 0.9998 pour l'état de surface dégradée.

Enfin, cette étude nous apporte de nouvelles connaissances applicables sur l'effet de triple jonction sur l'isolation électrique avec des recommandations pour optimiser la conception de l'isolation pour des performances supérieures.

Comme perspective ouverte par ce travail, nous proposons une caractérisation de la surface des isolants suite aux décharges électriques au niveau de la jonction triple.

Références Bibliographiques

- [1] Nicolas NAUDE, «Étude électrique de la physique d'une décharge de Townsend à la pression atmosphérique et de son interaction avec un générateur : Modèle et Expérience», Thèse de doctorat (Université de Toulouse III – Paul Sabatier), Octobre 2005.
- [2] Guo Huiping , Deng Fuwei, Zhou Chunlin, “Investigation on Natural Radioactivity Level of Fly Ash in Xi'an DaTang Thermolectricity Group”, 2007 8th International Conference on Electronic Measurement and Instruments , Xi'an, Chine , pp. 340-343, 2007.
- [3] Haruaki Akashi , Akinori Oda , Yosuke Sakai , «Development of Streamers in Dielectric-Barrier-Discharge Excimer Lamp», IEEE Transactions on Plasma Science, vol. 36, no. 4, pp. 1336-1337, 2008.
- [4] Yuan Li, Jia Ye Wen, Yu Liang, Jiang Wu, Shaorui Qin, Guan-Jun Zhang, «Streamer discharge propagation and branching characteristics in transformer oil under AC voltage: Partial discharge and light emission», 2017 IEEE 19th International Conference on Dielectric Liquids (ICDL), Manchester, Royaume-Uni, pp . 1-4, 2017.
- [5] Ruma, Hamid Hosano, Takashi Sakugawa, Hidenori Akiyama, « Performance Comparison of Streamer Discharge Generated in Different Reactors by High Voltage», 2018 International Conference on Advancement in Electrical and Electronic Engineering (ICAEEE), Gazipur, Bangladesh, Bangladesh, 2018.
- [6] Zhiyu Cao, Yewen Zhang , Cong Guo, Feihu Zheng , Zhenlian An, Stéphane Holé, Enke Yu, Xinlong Zheng , Zhien Zhu , Liming Yang , «Space Charge Measurement System Based on Laser PWP Method for the Full -size Long HVDC Cable », 2018 Condition Monitoring and Diagnosis (CMD), Perth, WA, Australie, 2018.
- [7] Virginie Griseri, Philippe Molinié, «Space charge buildup and dissipation in charged polyimide films exposed to visible light », 2016 IEEE International Conference on Dielectrics (ICD), vol. 1, Montpellier, France, 2016.
- [8] Xialin Su, Siyu Zhang, Peng Wei, Zongliang Xie, Peng Wu, Liangliang Pan, Peng Liu , Zongren Peng, Shiling Zhang, «Influence of Silicone Oil and Gold Coating during the Space Charge Measurements on Epoxy Resin Specimens », 2019 IEEE Conference on Electrical Insulation and Dielectric Phenomena (CEIDP), Richland, WA, USA, USA, pp. 3245-3254, 2019.

- [9] D. Wu, L. Arevalo, M. Lundmark, J. Karlsson, M. Larsson, "A. laboratory study on the dielectric strength of air gaps with lower oxygen constituent under switching impulse voltage», 2015 IEEE 11th International Conference on the Properties and Applications of Dielectric Materials (ICPADM), Sydney, NSW, Australie, pp. 156-159, 2015.
- [10] R. A. Fouracre, F. A. Twema, S. J. MacGregor and M. J. Given, "The influence of charge on surface flashover", 11th Int. Symp. on High Voltage Engineering., vol. 3, 1999.
- [11] Ghaleb Fatiha, Benstâali Wafa, Belasri Ahmed, "MODELISATION DE LA COURBE DE PASCHEN ET CALCUL DE LA TENSION DE CLAQUAGE POUR UN ECRAN A PLASMA», Revue Synthèse, no. 16, pp. 96-101, 2007.
- [12] Yu Shoji, Hitoshi Araki, Yutaro Koyama, Yuki Masuda, Keika Hashimoto, Kimio Isobe, Ryoji Okuda, Masao Tomikawa, «Higher reliability for low-temperature curable positive-tone photosensitive dielectric materials», 2017 IEEE CPMT Symposium Japan (ICSJ), Kyoto, Japon, pp. 103-106, 2017.
- [13] Junhao Li, Wenrong Si, Xiu Yao, Yanming Li, "Partial discharge characteristics over differently aged oil/pressboard interfaces», IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, vo. 16, no. 6, pp. 1640-1647, 2009.
- [14] Meng Song, Kun Nan Cao, Da Da Wang, Xin Yang, Bin Wei, «AC and Impulse Dielectric Strength of Polymer Materials Under Tensile Stress at 77 K», IEEE Transactions on Applied Superconductivity, vol. 24, no. 5, 2014.
- [15] B. Techumnat, S. Hamada, T. Takuma, "Effect of conductivity in triple-junction problems," Journal of Electrostatics, vol. 56, no. 1, pp. 67-76, 2002.
- [16] F. H. Kreuger, Partial Discharge Detection in High Voltage Equipment, illustrated edition ed. Butterworth-Heinemann, 3 1990. Disponible sur : <http://amazon.com/o/ASIN/0408020636/>
- [17] Lazhar Kebbabi, «caractérisation des décharges électriques glissantes se propageant aux interfaces liquide/solide sous différents formes de tension-relation entre propriétés des matériaux et dimensions fractales» (école centrale de Lyon), Mars 2006.
- [18] lavian Koliatene, «contribution a l'étude de l'existence des décharges dans les

systèmes de l'avionique», Thèse de doctorat (Université de Toulouse III – Paul Sabatier), Janvier 2009.

[19] M. Hara, T. Kurihara, S. Kozuru, J. Suehiro, and N. Hayashi, “Estimation of partial discharge onset characteristics in gases around a triple junction”, *Electrical Engineering in Japan*, vol. 144, no. 1, pp. 1-11, 2003.

[20] A. Pedersen, I. W McAllister, G. C Crichton, S. Vibholm, “Formulation of the streamer breakdown criterion and its application to strongly electronegative gases and gas mixtures”, *Electrical Engineering (Archiv fur Elektrotechnik)*, vol. 67, no. 6, pp. 395-402, 1984.

[21] L. Caliap, O. Lesaint, A. Denat, N. Bonifaci, G. Blanchet, A. Girodet, B. Gelloz, «Influence of a metallic particle at a metal/insulator/gas triple junction in air and SF₆», 2009 IEEE Conference on Electrical Insulation and Dielectric Phenomena, Virginia Beach, VA, USA, pp. 364-367, 2009.

[22] Y. Yamano, S. Ito, K. Kato, H. Okubo, Y. Hakamata, «Charging characteristics and electric field distribution on alumina as affected by triple junctions in vacuum», *IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation*, vol. 9, no. 2, pp. 173-177, 2002.

[23] B. X. Du, H. C. Liang, J. Li, Z. Y. Ran, «Electrical field distribution along SG6/N₂ filled DC-GIS/GIL epoxy spacer», *IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation*, vol. 25, no. 4, pp. 1202-1210, 2018.

[24] M. Bouhaouche, A. Mekhaldi, M. Tegar, «Improvement of electric field distribution by integrating composite insulators in a 400 kV AC double circuit line in Algeria», *IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation*, vol. 24, no. 6, pp. 3549-3558, 2017.

[25] Ik-Soo Kwon, Jin-Yong Na, Ho-Young Lee, Bang-Wook Lee, «Determination of Threshold Electric Field for PPLP Specimen in Liquid Nitrogen Based on the Measurement of Electrical Conductivity», *IEEE Transactions on Applied Superconductivity*, vol. 28, no. 3, 2018.

[26] B. B. Mandelbrot, “Fractals, Form, Chance and Dimension”, San Francisco, Freeman, 1977.

[27] Y. Sawada, S. Ohta, M. Yamazaki and 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.

[28] L. Niemeyer, L. Pietronero, and H. J. Wiesmann, "Fractal dimension of dielectric breakdown", Phys. Rev. Lett., vol. 33, p. 1033-6, 1984.

[29] H. J. Wiesmann and H. R. A. Zeller, "A fractal model of dielectric breakdown and prebreakdown in solid dielectrics", J. Appl. Phys., vol. 60, pp. 1770, 1773, 1986.

[30] L. Niemeyer, L. Pietronero, and H. J. Wiesmann, "Scaling properties of growing zone and capacity of Laplacian fractal", Amsterdam, Elsevier, 1986.

[31] T.A. Witten and L.M. Sander, "Diffusion-limited aggregation a kinetic critical phenomenon" Phys. Rev. Lett., vol. 47, no. 19, pp. 1400-1403, 1981.

[32] J. L. Vicente, A. C. Razzitte, and E. E. Mola, "Fractal characteristics of dielectric breakdown" presented at IEEE Annual Report Proceeding (CEIDP) Arlington, TX, USA.

[33] Malek IZITOUNENE, Ouramdane BEN ALI AMER, "Etude des décharges électriques au niveau d'un point triple métal/gaz/solide isolant", Mémoire de Fin d'Etudes de MASTER ACADEMIQUE Spécialité : Réseaux Electriques proposé par Mr M.A. HANDALA et dirigé par Melle N. SAIM, Université Mouloud Mammeri de Tizi-Ouzou, 29 sep 2014.

[34] T. Nishi, R. Hanaoka, S. Takata, T. Miyamoto, "Characteristics of Creeping Discharge along Aerial Insulated Wire under Impulse Voltages with Various Wave Front Durations", Electrical Engineering, Japan, vol. 158, no. 3, 2007.

[35] M.A. Handala, O. Lamrous, "Study of pre-breakdown current in air-solid interface", IEEE 9th International Conf. On the Properties and Applications of Dielectric Materials (ICPADM 2009), 2009.

[36] Laure Trémas, Olivier Lesaint, Nelly Bonifaci, B Ohl, François Gentils, "Streamers dans l'air en presence d'isolants solides et critères de claquage", SFE 2018, 2018.

[37] L. Gao, V. Cooray, T.G. Gustavsson, S.M. Gubanski and A. Larsson, "Positive streamer discharges along insulating surfaces" IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, vol. 8, no. 6, pp. 902-910, 2021.

[38] T. Tokunaga, S. Nishikawa, T. Sakoda, T. Fukano, "Influence of triple-junction

on sparkover voltage for a series gap of arrester”, 2013 IEEE Electrical Insulation Conference (EIC), Ottawa, ON, Canada, pp. 110-113, 2013.

[39] E. R. Shaaban, F. Diab, G. M. El-Kashef, K. M. Ahmed, M. E. Abdel-kader, W. H. Gaber, “Effect of inter-electrode distances of glow discharge on structural and optical properties of Zn Se”, *Journal of Nanotechnology & Advanced Materials*, vol. 4, no. 2, pp. 45-51, 2016.

[40] V. Gagliardo, “Discharges in Very-short Air Gaps in Plane-parallel Electrodes and under ac Voltage”, *IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation*, vol. 1, no. 6, pp. 1156-1166, 1944.

[41] Y. Murooka, T. Kakada and K. Hidaka, "Nanosecond Surface Discharge and Charge Density Evaluation", Part: Review and Experiments *IEEE Electr. Insul. Magazine*, vol 17, no. 2, pp. 6-16, 2001.

[42] M. E. Slama, A. Beroul, “Behavior of AC High Voltage Polyamide Insulators : Evolution of Leakage Current in Different Surface Conditions”, *Power Engineering and Electrical Engineering*, vol. 13, no. 6, pp. 74-80, 2015.

[43] N. Jordan, Y. Y. Lau, D. M. French, R. M. Gilgenbach, P. Pengvanich, “Electric field and electron orbits near a triple point”, *Journal of Applied Physics*, vol. 102, no. 3, pp. 1-10, 2007.

[44] H. Javadiz, M. Farzaneh, H. Hemmatjou, I. Fofana, “An analytic model to simulate leakage current of a snow-covered insulator”, *European Transactions on Electrical Power*, vol. 18, no. 4, pp. 403-422, 2008.

[45] K. V. Kozlov, R. Brandenburg, H. E. Wagner, A. M. Morozov, P. Miche, “Investigation of the filamentary and diffuse mode of barrier discharges in N₂/O₂ mixtures at atmospheric pressure by cross-correlation spectroscopy”, *Journal of Physics D: Applied Physics*, vol. 38, no. 4, pp. 518-529, 2005.

[46] O. Eichwald, O. Ducasse, D. Dubois, A. Abahazem, N. Merbahi, M. Benhenni, M. Yousfi, “Experimental analysis and modelling of positive streamer in air: towards an estimation of O and N radical production”, *Journal of Physics D: Applied Physics*, vol. 41, no. 23, pp. 1-11, 2008.

[47] M. Rezinkina, O. Rezinkin, F. D'Alessandro, A. Danyliuk, A. Guchenko, S. Lytvynenko, “Experimental and modeling study of the dependence of corona

discharge on electrode geometry and ambient electric field”, *Journal of Electrostatics*, vol. 87, pp. 79-85, 2017.

[48] E. Durant, «Electrostatic», Tome II, Massons and Cie Editors, 1966.

[49] G. Hartmann, “Theoretical evaluation of Peek’s law”, *IEEE Transactions on Industry Applications*, vol. IA-20, no. 6, pp. 1647-1651, 1984.

[50] Duo Hu, Chengyan Ren, Fei Kong, Cheng Zhang, Tao Shao, Ping Yan, «Aging characteristics of polymeric materials by repeated surface flashovers in vacuum under microsecond pulse”, *IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation*, vol. 26, no. 1, pp. 171-178, 2019.

[51] Churui Zhou, George Chen, «Space charge and AC electrical breakdown strength in polyethylene», *IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation*, vol. 24, no. 1, pp. 559-566, 2017.

[52] Giovanni Mazzanti, Massimo Marzinotto, Antonio Battaglia, «A first step towards predicting the life of HVDC cables subjected to load cycles and voltage polarity reversal», 2015 IEEE Conference on Electrical Insulation and Dielectric Phenomena (CEIDP), Ann Arbor, MI, USA, pp. 783-786, 2015.

[53] Yunqi Zhang, Wei Cong, Liangliang Hu, Liqiang Zhang, «On-line Discrimination Method of Current Transformer’s Polarity Using Line No-load Closing Impulse Current», 2019 IEEE 8th International Conference on Advanced Power System Automation and Protection (APAP), Xi'an, China, pp. 533-537, 2019.

[54] T. Hakamada, Y. Kashiwamura, S. Amagi, “Analysis and Experiments for Thermal Stress of Totally Impregnated Stator Windings”, vol. EI-18, no. 4, Août 1983, pp. 449-454, 1983

[55] J. Lewis, T.S. Sudarshan, J.E. Tompson, D. Lee and R.A. Dougal, “Pre-breakdown and breakdown phenomena of electric surface in vacuum and nitrogen gas stressed by 60 Hz voltage”, IEEE. Conference record-international phenomena in practical systems. Gaithersburg, MD, USA, 19-20, 1988.

[56] L. Yang, H. Xu-Dong, F. Yu-Jun, H. Xu-Dong, «Controlling Factors of the Electric Field at the Triple Junction”, *Chinese Physics Letters*, vol. 31, no. 2, pp. 1-5, 2015.

[57] T. W. Dakin, H. M. Philofsky, W. C. Divens, “Effect of electric discharges on the

breakdown of solid insulation”, Transaction of the American Institute of Electrical Engineers, Part I: Communication and Electronics, vol. 73, no. 2, pp. 155-162, 1954.

[58] M. C. Halleck, “Calculation of corona starting voltage in air-solid dielectric systems”, Transactions of the American Institute of Electrical Engineers, Part III: Power Apparatus and Systems, vol. 75, no. 3, pp. 211-216, 1956.

[59] Mingqiang Geng ; Jialin Cai ; Chao Yu ; Jiangtao Su ; Jun Liu, « Piecewise Small Signal Behavioral Model for GaN HEMTs based on Support Vector Regression », 2020 IEEE MTT-S International Conference on Numerical Electromagnetic and Multiphysics Modeling and Optimization (NEMO), Hangzhou, China, 2021.

[60] Mohan S Acharya, Asfia Armaan, Aneeta S Antony, «A Comparison of Regression Models for Prediction of Graduate Admissions», 2019 International Conference on Computational Intelligence in Data Science (ICCIDS), Chennai, India, 2019.

[61] Guozhu Dong, Vahid Taslimitehrani, «Pattern-Aided Regression Modeling and Prediction Model Analysis», IEEE Transactions on Knowledge and Data Engineering, vol. 27, no. 9, pp. 2452-2465, 2015.

[62] Yanming Yang, “Prediction and analysis of aero-material consumption based on multivariate linear regression model», 2018 IEEE 3rd International Conference on Cloud Computing and Big Data Analysis (ICCCBDA), pp. 628-632, Chengdu, China, 2018.

[63] Xiaonan Zou, Yong Hu, Zhewen Tian, Kaiyuan Shen, “Logistic Regression Model Optimization and Case Analysis”, 2019 IEEE 7th International Conference on Computer Science and Network Technology (ICCSNT), pp. 135-139, Dalian, China, 2019.

[64] Ethan C. Jackson, James Alexander Hughes, Mark Daley, «On the generalizability of linear and non-linear region of interest-based multivariate regression models for fMRI data», 2018 IEEE Conference on Computational Intelligence in Bioinformatics and Computational Biology (CIBCB), St.Louis, MO, USA, 2018.

[65] Sung-Bum Park, Sang-Uk Lee, Hyeokho Choi, “Multiscale surface representation

and rendering for point clouds”, 2004 International Conference on Image Processing, 2004. ICIP '04, Singapour, pp. 1939-1942, 2004

[66] Gen Li, Yiyong Pan, Zhen Yang, Jianxiao Ma, “Modeling Vehicle Merging Position Selection Behaviors Based on a Finite Mixture of Linear Regression Models», vol. 7, pp. 158445-158458, 2019.

[67] Chien-Ho Wu, Jung-Bin Li, Tsair-Yuan Chang, «SLinRA2S: A Simple Linear Regression Analysis Assisting System», 2013 IEEE 10th International Conference on e-Business Engineering, Coventry, United Kingdom, pp. 219-223, 2013.

[68] Abbas Mahmoudabadi, «Comparison of Weighted and Simple Linear Regression and Artificial Neural Network Models in Freeway Accidents Prediction», 2010 Second International Conference on Computer and Network Technology, pp. 392-396, Bangkok, Thaïlande, 2010.

[69] M. Bekara;G. Fleury , «Estimation of polynomial order via cross validation Bayesian predictive densities”, IEEE International Symposium on Intelligent Signal Processing, 2003, Budapest, Hongrie, pp. 133-136

[70] [Shiqin Liu](#), “Leave- p -Out Cross-Validation Test for Uncertain Verhulst-Pearl Model With Imprecise Observations”, [IEEE Access](#), vol. 7, pp. 131705-131709, 2019.

[71] Guozhu Dong, Vahid Taslimitehrani, «Pattern-Aided Regression Modeling and Prediction Model Analysis», IEEE Transactions on Knowledge and Data Engineering, vol. 27, no. 9, pp. 2452-2465, 2015.

[72] <https://www.aspexit.com/comment-valider-un-modele-de-prediction/>

[73] Sanjay Yadav, Sanyam Shukla, «Analysis of k-Fold Cross-Validation over Hold-Out Validation on Colossal Datasets for Quality Classification», 2016 IEEE 6th International Conference on Advanced Computing (IACC), pp. 78-83, Bhimavaram, India, 2016.

[74] A. Jain, A. K. Pandey, “Multiple Quality Optimizations in Electrical Discharge Drilling of Mild Steel Sheet”, Materials Today: Proceedings, vol. 4, no. 8, pp. 7252-7261, 2017.

[75] S. P. Arikatla, K. T. Mannan, A. Krishnaiah, “Parametric Optimization in Wire Electrical Discharge Machining of Titanium Alloy Using Response Surface Methodology”, Materials Today: Proceedings, vol. 4, no. 2, pp. 1434-1441, 2017.

- [76] A. Hafeez, S. A. A. Taqvi, T. Fazal, F. Javed, Z. Khan, U. S. Amjad, A. Bokhari, N. Shehzad, N. Rashid, S. Rehman, F. Rehman, “Optimization on cleaner intensification of ozone production using Artificial Neural Network and Response Surface Methodology: Parametric and comparative study”, *Journal of Cleaner Production*, vol. 252, pp. 1-11, 2020.
- [77] M. H. Dehghani, K. Yetilmezsoy, M. Salari, Z. Heidarinejad, M. Yousefi, M. Sillanpaa, “Adsorptive removal of cobalt (II) from aqueous solutions using multi-walled carbon nanotubes and γ -alumina as novel adsorbents: Modelling and optimization based on response surface methodology and artificial neural network”, *Journal of Molecular Liquids*, vol. 299, pp. 1-47, 2020.
- [78] D. D. Gawali, A. Zidna, P. S. V. Nataraj, “Algorithms for unconstrained global optimization of nonlinear (polynomial) programming problems: the single and multi-segment polynomial B-spline approach”, *Computers and Operations Research*, vol. 87, pp. 205-220, 2017.
- [79] Çagatay Candan, “On Higher Order Approximations for Hermite–Gaussian Functions and Discrete Fractional Fourier Transforms», *IEEE Signal Processing Letters*, vo. 14, no. 10, pp. 699-702, 2007.
- [80] Balu Santhanam, Thalanayar S. Santhanam, “Discrete Gauss-Hermite Functions and Eigenvectors of the Centered Discrete Fourier Transform”, 2007 IEEE International Conference on Acoustics, Speech and Signal Processing - ICASSP '07, vo. 3, pp. 1385-1388, 2007.
- [81] Furong Song, Wei Sun, Juntao Wei, Mingshun Jiang, Lei Zhang, Faye Zhang, Qingmei Sui, Yuan Tian, «The optimization study of FBG Gaussian fitting peak-detection based on Levenberg-Marquardt algorithm», 2017 Chinese Automation Congress (CAC), pp. 3723-3727, 2017.
- [82] S. Kilic, “Linear regression analysis”, *Journal of Mood Disorders*, 2013.
- [83] Akira Tanaka, Hideyuki Imai, «Kernel Ridge Regression with Autocorrelation Prior: Optimal Model and Cross-Validation», ICASSP 2020 - 2020 IEEE International Conference on Acoustics, Speech and Signal Processing (ICASSP), Barcelone, Espagne, pp. 3872-3876, 2020.
- [84] A. Capozzoli, D. Grassi, F. Causone, «Estimation models of heating energy

consumption in schools for local authorities planning”, *Energy Build*, vol. 105, no. 15, pp. 302-313, 2015.

[85] S.B.Bai, J.Wang, A.Pozdnoukhov, M.Kanevski, “ValidationValidation of Logistic Regression Models for Landslide Susceptibility Maps”, vol. 2, Los Angeles, Californie, États-Unis, pp. 355-358, 2009.

[86] Emil Turkedjiev, Maia Angelova, Krishna Busawon, “Validation of Artificial Neural Network Model for Share Price UK Banking Sector Short-Term Trading», 2013 UKSim 15th International Conference on Computer Modelling and Simulation, Cambridge, Royaume-Uni, pp. 6-11, 2013.

Résumé

Cette étude porte sur les isolateurs électriques utilisés dans le domaine de la haute tension sous pression gazeuse. Pour des raisons de coût, réduire la taille du matériel afin de réaliser une optimisation diélectrique est une nécessité. Les points que l'on peut considérer comme particulièrement préoccupants sont la région du point triple : la jonction entre les isolants, les gaz et les métaux, les zones sensibles aux décharges électriques et les particules qui peuvent s'y accumuler. Les particules métalliques ainsi que l'accumulation de charge à la surface isolante peuvent réduire la rigidité diélectrique de cette dernière lorsqu'une surtension est appliquée. A la lumière des points évoqués plus haut, cette étude caractérise expérimentalement et mathématiquement la multitude de phénomènes complexes qui apparaissent en présence de haute tension.

Mots clés : Triple jonction, isolant solide, champ électrique, courant de décharges électriques, optimisation, régression, modélisation.

Abstract

This study relates to electrical insulators used in the high voltage domain under gas pressure. For cost reasons, reducing the size of equipment in order to achieve dielectric optimization is a necessity. The points that can be considered of particular concern are the region of the triple point: the junction between insulators, gases and metals, the zones sensitive to electric discharges and the particles which can accumulate there. Metallic particles as well as the accumulation of charge on the insulating surface can reduce the electric strength of the latter when an over-voltage is applied. In the light of what has just been said, this study characterizes experimentally and mathematically the multitude of complex phenomena that appear in the presence of high voltage.

Key words: Triple junction, solid insulator, electric field, electric discharge current, optimization, regression, modeling.