

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE
MINISTERE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR ET DE LA RECHERCHE
SCIENTIFIQUE

UNIVERSITE MOHAMED BOUDIAF - M'SILA

FACULTE DE TECHNOLOGIE
DEPARTEMENT GENIE ELECTRIQUE
N° D'ORDRE: RE-12



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

Mémoire présenté pour l'obtention
Du diplôme de Master Académique

Par : Nouredine SALMI

Oqba BELABBAS

Intitulé

Analyse et prédiction de la tension de claquage d'un
système d'électrodes à champ non uniforme polluée
sous Minitab

Soutenu devant le jury composé de :

Dr. Salim DJERIOU	Université Mohamed Boudiaf - M'sila	Président
Dr. Hani BENGUESMIA	Université Mohamed Boudiaf - M'sila	Encadreur
Dr. Abderrzak LAIB	Université Mohamed Boudiaf - M'sila	Examineur

Année Universitaire: 2021/2022

Dédicace

Tous les mots ne sauraient exprimer la gratitude, l'amour, le respect, la reconnaissance, c'est tous simplement que : Je dédie ce modeste travail

*A Ma tendre Mère **Zineb** : Tu représente pour moi la source de tendresse et l'exemple de dévouement qui n'a pas cessé de m'encourager. Tu as fait plus qu'une mère puisse faire pour que ses enfants suivent le bon chemin dans leur vie et leurs études.*

*A Mon très cher Père **Ahmed** : Aucune dédicace ne saurait exprimer l'amour, l'estime, le dévouement et le respect que j'ai toujours pour vous. Rien au monde ne vaut les efforts fournis jour et nuit pour mon éducation et mon bien être. Ce travail et le fruit de tes sacrifices que tu as consentis pour mon éducation et ma formation le long de ces années.*

*A mon cher frère et sœur : **Khaled** et **Meriem**.*

A mes très chers amis,

A tous les membres de ma promotion.

A tous mes enseignants depuis mes premières années d'études.

A tous ceux qui me sens chers et que j'ai omis de citer.

Salmi Noureddine

Dédicas

Je dédie ce mémoire à :

Mes parents :

- Ma mère (**Zahiya**), qui a œuvré pour ma réussite, de par son amour, son soutien, tous les sacrifices consentis et ses précieux conseils, pour toute son assistance et sa présence dans ma vie, reçois à travers ce travail aussi modeste soit-il, l'expression de mes sentiments et de mon éternelle gratitude.

- Mon père (**Sedik**), qui peut être fier et trouver ici le résultat de longues années de sacrifices et de privations pour m'aider à avancer dans la vie. Puisse Dieu faire en sorte que ce travail porte son fruit ; Merci pour les valeurs nobles, l'éducation et le soutien permanent venu de toi.

Mes frères (**Islam** et **Sourour** et **baraa**) qui n'ont cessé d'être pour moi des exemples de persévérance, de courage et de générosité.

A toute ma famille (**Belabbas**), dont je témoigne toute ma reconnaissance pour m'avoir transmis des valeurs et l'idéologie selon laquelle il faut toujours mener à bien ce qu'on entreprend.

Tous mes amis et frères d'armes unis par le même combat que les initiés connaissent.

Mes professeurs qui doivent voir dans ce travail la fierté d'un savoir bien acquis

Belabbas Oqba

Remerciement

On remercie dieu le tout puissant de nous avoir donné la santé et la volonté d'entamer et de terminer ce mémoire.

Tout d'abord, ce travail ne serait pas aussi riche et n'aurait pas pu avoir le jour sans l'aide et l'encadrement de Dr. Hani BENGUESMIA, on le remercie pour la qualité de son encadrement exceptionnel, pour sa patience, sa rigueur et sa disponibilité durant notre préparation de ce mémoire.

Aux membres de jury pour avoir sacrifié de leur temps, accepter d'examiner ce mémoire et d'honorer par leur présence le jury de soutenance.

Nos sincères remerciements aussi à tous les étudiants master 2 de génie électrique. Comme nous tenons à remercier les personnes qui ont contribués de près ou de loin à la réalisation de ce travail.

ملخص:

يرتكز العمل المقدم في هذه المذكرة على تطبيق أسلوب تصميم التجارب من أجل التحليل و التنبؤ بتوتر الانهيار الكهربائي في المجال قطب حاد - حاجز - مسطح ملوث اصطناعيا باستعمال برنامج Minitab. تظهر النتائج التي تم الحصول عليها أن هذه الطريقة تم تطبيقها بنجاح. هناك اتفاق جيد بين النتائج المتنبأ بها (المحسوبة) والنتائج التجريبية. بالإضافة إلى أن النتائج ميمونة وواعدة.

الكلمات المفتاحية: قطب حاد-حاجز-سطح، تلوث، التصميمات التجريبية، التنبؤ، توتر الانهيار.

Résumé

Les travaux présentés dans ce mémoire portent sur l'application de la Méthode des Plans d'Expériences (MPE) pour analyse et prédiction de la tension de claquage d'une configuration pointe-barrière-plan artificiellement polluée sous l'environnement minitab.

Les résultats obtenus montrent que cette méthode a été appliquée avec succès. Il y a un bon accord entre les résultats calculés et les résultats expérimental. De plus, les résultats sont auspicious et prometteurs.

Mots clés : pointe-barrière-plan, pollution, méthode plan d'expérience (MPE), prédiction, tension de claquage.

Abstract

The work presented in this memoir focuses on the application of the Design of Experiments Method (DOE) for analyzing and predicting the breakdown voltage of an artificially polluted Point-Barrier-Plane configuration under the minitab environment.

The results obtained show that this method has been applied successfully. There is good agreement between the calculated and experimental results. In addition, The results are auspicious and promising.

Key words: Point-barrier-plane, pollution, design of experiment (DOE), prediction, breakdown voltage.



Sommaire

Sommaire

Sommaire	i
Liste des figures & tableaux	iv
Introduction Générale	1

Chapitre I: Etat de L'art "Décharge Électrique"

I.1 Introduction	3
I.2 Décharges électriques	3
I.3 Rigidité diélectrique	3
I.4 Influence de divers paramètre sur la rigidité diélectrique	4
I.4.1 Tension appliquée	4
I.4.2 Épaisseur et homogénéité de l'éprouvette	5
I.4.3 Caractéristiques électriques et thermiques du milieu ambiant	5
I.5. Processus de décharges électriques dans l'intervalle d'air	5
I.6 Type des intervalle d'air	5
I.6.1 Intervalle d'air pointe-pointe	5
I.6.2 Intervalle d'air plan-plan	6
I.6.3 Intervalle d'air pointe-barriere-plan	6
I.7 Influence de la tension alternative sinuoidale	7
I.8 Influence de la barrière isolante sur la tension de décharge	8
I.8.1 Influence de la position de la barrière dans I intervalle d'air	8
I.8.2 Influence de l'épaisseur et de la permittivité	8
I.8.3 Influence de la largeur de la barrière	8
I.8.4 Influence de la polarité de l'électrode pointe	9
I.8.5 Influence du matériau de la barrière:	9
I.8.6 Influence de l'accumulation de la charge d'espace	9
I.8.7 Influence de la pollution	10
I.9 Formes de décharge	10
I.9.1 Décharge directe	10
I.9.2. Décharges glissantes aux interfaces air/solide	11
I.9.2.1 Décharge perfore la barrière	11
I.9.2.2 Décharge contourne la barrière	11
I.9.3 Décharge par étape	12
I.10 Conclusion	12

Chapitre II: " plan d'expérience "

II.1 Introduction	15
II.2 Historique des plans d'expérience	15
II.3 Généralités sur les plans d'expérience	16
II.3.1 Plans d'expérience	16
II.3.2. Définition d'un facteur	18
II.3.2.1. Facteur quantitatif	18

II.3.2.2. Facteur qualitatif	18
II.3.3. Définition des réponses	19
II.4 Objectif et principe des plans d'expérience	19
II.5 Conditions d'application des plans d'expérience	20
II.6 Méthodologie expérimentales	21
II.6.1. Identification de l'objectif à atteindre	21
II.6.2. Choix de la ou des réponses	21
II.6.2. Choix de la ou des réponses	21
II.6.4. Construction de la série d'essais	22
II.6.5. Réalisation des essais	22
II.6.6. Analyse des résultats d'essais	22
II.6.7. Confirmation des conclusions	23
II.7. Différents type des plans d'expérience	23
II.7.1. Plans de mélanges	23
II.7.2. Plans de criblage	23
II.7.3. Plans factoriel	23
II.7.4. Plans de taguchi	23
II.7.5. Plans de surfaces de réponses	24
II.8. Avantages des plans d'expérience	24
II.9. Logiciels des plans d'expérience	24
II.10. Présentation de logiciel « Minitab »	25
II.10 Conclusion	25

Chapitre III: "Résultats et Validation"

III.1 Introduction	27
III.2 Méthodologie Des Surfaces De Réponse (MSR)	27
III.3 Présentation du Arrangement "pointe-barrière-plan"	28
III.4 Processus d'acquisition des connaissances	29
III.5 Prédiction de la tension de claquage en utilisant la MSR	31
III.5.1 Conception la MSR	31
III.5.2 Détermination des entrées/sorties du MSR	31
III.6. Utilisation du logiciel Minitab	31
III.7 Résultats et discussion	34
III.7.1 Diagramme de Pareto	34
III.7.2 Diagramme des effets principaux	35
III.7.3 Equation du modèle mathématique	35
III.7.4 Effet des interactions d'entrées (P, E et δ) sur la réponse (V (kV))	36
III.8 Analyse	37
III.8.1 Essais sans barrière	40
III.8.2 Effet de la distance inter-électrodes	41
III.8.3 Effet de l'insertion de la barrière	41
III.8.4 Influence des conductivités superficielles	42
III.8.5 Influence des épaisseurs de la barrière	43

III.9. Conclusion	45
Conclusion Générale	47
Références bibliographique	49



"Liste des Figures & Tableaux"

Liste des figures et tableaux

N°	Figures	Page
<u>Chapitre I : Etat de L'art "Décharge Électrique"</u>		
Figure I.1	Rigidité diélectrique.	4
Figure I.2	Electrode de décharge à barrière diélectrique (DBD).	6
Figure I.3	Arrangement (a) pointe-plan, (b) pointe-barrière-plan.	7
Figure I.4	Décharge directe sans barrière. Laboratoire de haute tension (HT) de l'université de Biskra.	10
Figure I.5	Décharge glissante. Laboratoire de HT de l'université de Biskra.	11
Figure I.6	Décharge par étape.	12
<u>Chapitre II : " Plan D'expérience "</u>		
Figure II.1	Aperçu historique.	16
Figure II.2	Système de la boite noire.	17
Figure II.3	Les différents types de facteur.	18
Figure II.4	Le domaine et les niveaux d'un facteur.	19
Figure II.5	Les étapes d'un plan d'expériences.	21
<u>Chapitre III : "Résultats et Validation"</u>		
Figure III.1	Organigramme méthodologie expérimentales.	30
Figure III.2	Variables d'entrées et sortie.	31
Figure III.3	Logiciel statistique minitab.	32
Figure III.4	Menu permettant de créer un plan composite centré.	32
Figure III.5	Menu permettant d'introduire le nombre de facteurs.	33
Figure III.6	Menu permettant d'introduire la prédiction.	33
Figure III.7	Menu permettant d'introduire la prédiction.	34
Figure III.8	Diagramme de Pareto des effets normalisés.	35
Figure III.9	Diagramme des effets principaux sur la tension.	35
Figure III.10	Contour plot 2D de la tension de claquage, avec épaisseur fixe de la barrière.	37
	(a) Vs la conductivité, position de la barrière,	
	(b) Vs la position de la barrière, la conductivité,	
Figure III.11	Contour plot 2D de la tension de claquage, avec position fixe de la barrière.	37
	(a) Vs la conductivité, épaisseur de la barrière,	
	(b) Vs épaisseur la barrière, la conductivité,	
Figure III.12	Contour plot 2D de la tension de claquage, avec conductivité fixe de la barrière.	38
	(a) Vs épaisseur, position de la barrière	
	(b) Vs position la barrière, la conductivité,	
Figure III.13	Tension prédites vs Tension expérimentales.	40
Figure III.14	Comparaison entre tension prédites et tension expérimentales.	40

Figure III.15	Influence de la position de la barrière sur la tension de claquage pour une différente épaisseur et différente conductivité.	42
Figure III.16	Influence de la conductivité de la barrière sur la tension de claquage pour une déférente position et déférente épaisseurs.	43
Figure III.17	Influence de l'épaisseur de la barrière sur la tension de claquage pour une déférente position et déférente conductivité.	45

N°	Tableaux	Page
<u>Chapitre II</u> : " Plan D'expérience "		
Tableau II.1	Principaux logiciels de plans d'expériences.	25
<u>Chapitre III</u> : "Résultats et Validation"		
Tableau III.1	Différents arrangements avec et sans barrière.	29
Tableau III.2	Données expérimentales collectées et résultats de prédiction.	39

A decorative horizontal border with a scroll-like appearance, featuring a vertical line on the left side and a small circular flourish at the top right corner.

Introduction générale

Introduction générale

Les matériaux isolants solides sont fréquemment utilisés dans les entrefers en raison de la rigidité diélectrique accrue. Dans ce cas, l'un des moyens utilisés pour réduire les distances d'isolement et augmenter la tension est l'insertion de barrières diélectriques dans l'espace inter-électrodes. [1]

L'étude des phénomènes de claquages diélectriques dans les grands intervalles de l'air a de l'intérêt dans plusieurs secteurs de l'industrie tel l'installation et la protection des réseaux de transport d'énergie (lignes HT, transformateurs, générateurs...). [2]

Dans la technique de haute tension HT, on utilise souvent l'air pour parvenir à une isolation entre électrodes. Ces dernières peuvent être des parties métalliques sous tension de différents appareillages, des conducteurs de lignes aériennes ou des bornes à haute tension dans les laboratoires d'essais. La géométrie et la nature des électrodes sont très diverses. [3]

Lorsque le champ électrique appliqué à un système isolant dépasse la rigidité diélectrique du milieu considéré, une rupture se produit dans l'échantillon, autrement dit au moins un chemin conducteur s'établit entre les deux électrodes. [4]

Ce chemin conducteur s'appelle "arc électrique" qui se forme quand un courant électrique passe entre deux électrodes séparées par une faible distance l'une de l'autre, par exemple l'arc de soudage, la décharge électrique dans un transformateur, l'arc libre dans le disjoncteur, etc. ... [5,6].

L'introduction d'une barrière isolante modifie considérablement la tension de claquage [7-8], et améliorer la rigidité d'un système sans augmenter la distance inter-électrodes, on insère une barrière isolante. [9,10]

L'effet des barrières dans les intervalles d'air pointe-plan a fait l'objet de plusieurs investigations, celles-ci ont montré que l'influence de la barrière est surtout liée à l'accumulation des charges sur sa surface du côté de l'électrode active. La barrière constitue un obstacle mécanique et électrostatique au développement de la décharge électrique. [11]

Le champ d'exploitation des barrières isolantes est très large et touche à de nombreux domaines industriels. Les petits intervalles d'air compris entre les parties actives et métalliques de ces équipements sont équivalents électriquement aux configurations à champ électrique non uniforme, à savoir, pointe-pointe et pointe-plan. [12]

Donc à ce jour plusieurs investigations ont été menées dans le sens d'une modélisation, simulation du phénomène de disruption d'un intervalle d'air à champ électrique non uniforme sous la protection de barrières isolantes polluées. [13]

Différentes techniques de composition se sont développées ces dernières années pour étudier les décharges électriques. Parmi ces techniques, il y a la méthode des plans d'expériences qui est utilisée. L'utilisation de la méthode des plans d'expériences est intéressante.

Le but visé à travers ce présent travail consiste à prédire la tension de claquage en fonction de la variation de la conductivité, la position et l'épaisseur de la barrière à l'aide de la méthode "plans d'expériences" par l'intermédiaire le logiciel MiniTab dans sa version 19.

Ceci explique la structuration de notre présent mémoire comme suit :

Une introduction générale qui inclut le but de notre mémoire de master et qui encouragé cette recherche.

Dans le premier chapitre, donne un aperçu bibliographique sur la décharge électrique, (influence de divers paramètre sur la rigidité diélectrique, processus de décharges électriques dans l'intervalle d'air...etc.).

Dans le deuxième chapitre nous présenterons les définitions et différents types de la plan d'expérience et la Méthodologie expérimentales. Nous donnons aussi les avantages de la méthode des plans d'expériences (MPE).

Dans la troisième chapitre, Nous modélisons le plan d'expérience par **MiniTab** pour prédire la tension de claquage d'une configuration point-barrière-plan polluée d'une part, et sera consacré à la présentation et à la discussion des résultats obtenus, et nous terminons notre mémoire par une conclusion générale.



Chapitre I
Etat de L'art
"Décharge Électrique"

I.1. Introduction

La décharge dans l'air suppose toujours la présence d'une décharge libre et d'un champ électrique, qui peut être continu, alternatif ou pulsé, uniforme ou non.

L'existence d'une barrière isolante dans le système pointe-plan présente un facteur très important pour déterminer les caractéristiques de la décharge électrique dans plusieurs des contraintes (pollué ou propre), et son influence est principalement liée à l'accumulation des charges à sa surface dans la partie active de l'électrode. Ainsi, la barrière représente un obstacle géométrique au développement de la décharge.

L'objectif de ce premier chapitre, nous exposerons un état de l'art global et bref fondamentaux dans l'initiation et le développement d'une décharge électrique.

I.2. Décharges électriques

Le terme décharge électrique désigne des phénomènes variés. Un élément ou composant électrique chargé (batterie d'accumulateurs, condensateur...) perd sa charge plus ou moins lentement, en transférant sa charge électrique à un consommateur d'électricité (lampe, moteur...). [14]

Les décharges d'origine électrostatique font toujours suite à une situation d'accumulation excessive de charges électrostatiques.

Elles ont lieu lorsque l'intensité du champ électrique au voisinage d'un objet chargé excède le champ disruptif du gaz environnant, qui est de l'air dans la plupart des situations industrielles.

Elles se manifestent de différentes façons et prennent différentes formes selon la situation qui dépend à la fois de la géométrie des équipements, de la conductivité des milieux séparant les surfaces chargées, mais aussi de la conductivité des surfaces elles-mêmes et du processus des opérations [15]

I.3. Rigidité diélectrique

La rigidité diélectrique d'un matériau est la valeur maximale du champ électrique que l'on peut lui appliquer sans qu'il se produise une dégradation irréversible nommée claquage ou perforation diélectrique rendant impossible une nouvelle application de la tension. En pratique, la rigidité diélectrique est le rapport entre la tension de claquage et la distance entre les électrodes auxquelles cette tension est appliquée dans des conditions d'essai spécifiées. Pour que cela soit tout à fait exact, il conviendrait que le champ soit uniforme, c'est-à-dire

que les électrodes soient planes et parallèles avec des bords tels qu'ils ne provoquent en aucun point de renforcement du champ.

Suivant les positions relatives des électrodes et des facteurs comme la température, la présence d'humidité ou de contaminants, la géométrie, le volume d'isolant...etc.

On distingue : [16]

✚ Rigidité diélectrique transversale : Pour laquelle le champ électrique appliqué est perpendiculaire à la surface principale du matériau (figure.1a). Dans les conditions pratiques cette rigidité est fonction de nombreux paramètres expérimentaux et particulièrement des phénomènes qui prennent naissance dans le milieu extérieur au solide. [17]

✚ Rigidité diélectrique longitudinale : La rigidité diélectrique longitudinale dépende peu de la nature de l'isolant, mais beaucoup plus de son état de sécheresse et de propreté. En effet, dans la plupart des cas, l'amorçage de l'espace entre les deux conducteurs, se produit d'abord dans le milieu ambiant au voisinage de la surface du solide (figure.1b). ce n'est que dans certains cas, par exemple celui de matériaux ayant subi une immersion prolongée dans l'eau ou essayés à température élevée que l'amorçage intéresse réellement l'isolant et provoque une destruction réelle de sa surface (Carbonisation) le rendant inapte à supporter de nouvelles contraintes. [17]

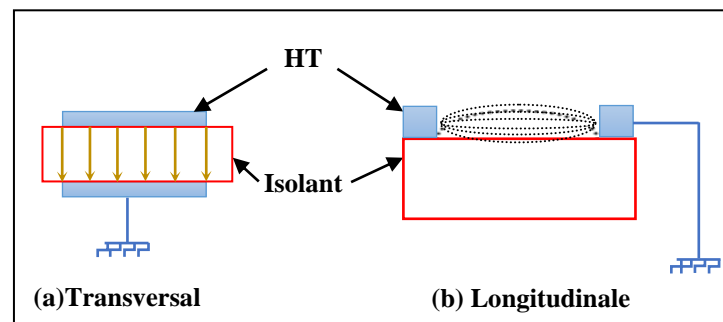


Figure I.1. Rigidité diélectrique.

I.4. Influence de divers paramètres sur la rigidité diélectrique

I.4.1. Tension appliquée

La rigidité diélectrique en tension continue est souvent proche de celle en tension alternative (valeur efficace) multipliée par 2. Dans la littérature, les chercheurs remarque que le rapport entre la rigidité diélectrique en onde de choc de foudre (1,2/50 μ s) et celle mesurée en tension continue est de l'ordre de 2. Certains références explique l'augmentation de la vitesse d'application de la tension augmente la tension de claquage expérimentalement. [16]

I.4.2. Epaisseur et homogénéité de l'éprouvette

Toujours, d'après la référence [16], l'augmentation de l'épaisseur de l'éprouvette réduit la valeur de la rigidité diélectrique. L'auteur qui fait l'expérience a constaté que la tension de claquage est proportionnelle à l'épaisseur. Il est donc indispensable de donner, avec toute valeur de rigidité diélectrique, l'épaisseur des éprouvettes d'essai.

I.4.3. Caractéristiques électriques et thermiques du milieu ambiant

Ces caractéristiques interviennent par le biais des décharges superficielles qui peuvent se produire dans ce milieu, et en particulier dans l'air, et réduisent la tension de claquage. La permittivité et la résistivité du milieu ambiant ont également une très grande influence en modifiant la répartition du champ électrique. Une augmentation de la permittivité et/ou une diminution de la résistivité du milieu ambiant augmentent généralement la tension de claquage de l'éprouvette. [16]

I.5. Processus de décharges électriques dans l'intervalle d'air

L'air est l'isolant le plus utilisé en Technique de la Haute Tension (lignes et postes). En l'absence de champ électrique, les molécules de gaz sont soumises à l'agitation thermique, et subissent une multitude de chocs.

Ces chocs peuvent être élastiques, sans transfert d'énergie de la particule bombardant vers la particule bombardée, ou parfois non élastiques, avec transfert total ou partiel d'énergie.

Ces chocs ont pour cause des agents extérieurs tels que la radio activité terrestre et atmosphérique, ainsi que les différents rayonnements cosmiques.

En présence d'un champ électrique, les molécules de gaz se mettent en mouvement dans la direction du champ. Leur vitesse variera en fonction de la distribution et de l'intensité du champ, ainsi que d'autres paramètres tels que la pression, la température et l'humidité du gaz. Les mécanismes de décharge disruptive dans l'air sont principalement : [18]

- ✚ Le mécanisme de Townsend,
- ✚ Le mécanisme des canaux (streamers).

I.6. Type de l'intervalle d'air

Les caractéristiques électriques des décharges dépendent fortement de la géométrie des électrodes. On classe celle-ci en trois familles qui induisent des comportements électriques et des applications différentes.[19]

I.6.1. Intervalle d'air pointe-pointe

L'utilisation de pointes métalliques pour l'étude des décharges est assez courante. Cela est dû à l'effet de pointe, qui permet d'obtenir localement un champ intense (au niveau des

pointes et des angles métalliques). Ce champ intense favorise le claquage électrique des gaz, C'est pour cela que l'on utilise des pointes comme paratonnerre et que la machine de Watson était équipée d'une pointe.

L'utilisation de pointes a l'avantage de stabiliser le lieu de la décharge puisqu'on est sûr du point de départ et du point d'arrivée de celle-ci (mais rien n'impose que le trajet entre ces deux points soit une ligne droite). Ce sont souvent des décharges entre deux électrodes métalliques, on n'utilise que rarement cette configuration avec des décharges à barrière diélectrique. [19]

I.6.2. Intervalle d'air plan-plan

Les décharges plan-plan sont rarement des décharges entre électrodes métalliques. En effet, dans le cas d'une utilisation d'électrodes métalliques planes, on ne connaît ni le point de départ de la décharge, ni le point d'arrivée et, sans traitement particulier sur ces électrodes, on n'obtient pas un arc homogène, réparti sur toute la surface des électrodes : on observe un arc unique se déplaçant dans l'espace inter électrodes, ou parfois, plusieurs arcs apparaissant et disparaissant dans ce même espace.

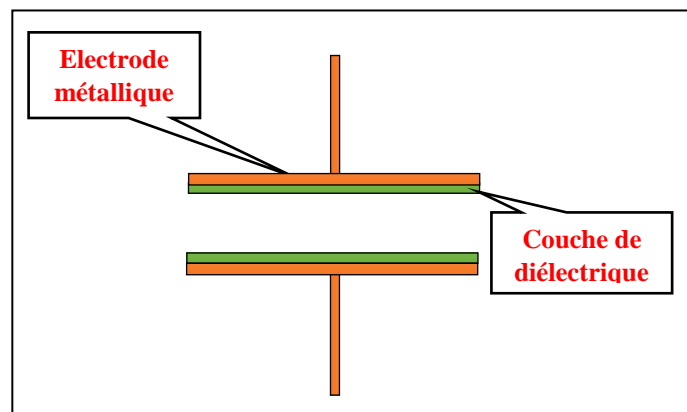


Figure I.2. Electrode de décharge à barrière diélectrique (DBD).

Dans la plupart des cas, on utilise des électrodes qui sont recouvertes d'une couche de diélectrique côté décharge. Avec ce type de dispositif, il est beaucoup plus facile d'obtenir une décharge homogène sur tout le plan. Ce type de décharge met en jeu des tensions importantes (dizaine(s) de kV) et des courants relativement faibles (quelques centaines de mA pour des sections de l'ordre de 10 cm^2). On utilise ces décharges à barrière diélectrique, entre autre, pour la production d'ozone. [20]

I.6.3. Intervalle d'air pointe-barrière-plan

L'air sous forme de diélectrique est généralement rencontré comme la seule isolation entre les électrodes dans la technique à haute tension. Ces électrodes peuvent être soit les parties

métalliques de différents appareillages sous tension, soit des conducteurs de lignes aériennes ou des bornes à haute tension dans les laboratoires d'essais.

Dans les systèmes d'isolation il est possible d'améliorer la rigidité diélectrique d'un intervalle d'air pointe-plan, par l'introduction convenable d'une barrière isolante horizontale.

Les ions positifs créant la charge spatiale sont alors freinés par la barrière et se répartissent sur sa surface. La répartition du champ électrique subit alors une déformation en provoquant une augmentation importante de la tension disruptive du système et une amélioration notable quand l'écran est placé près de la pointe (figure I.3).

L'intervalle barrière-plan est caractérisé par une répartition quasi uniforme du champ électrique, dépendant essentiellement de paramètres de la barrière tel que sa largeur et sa position. [21]

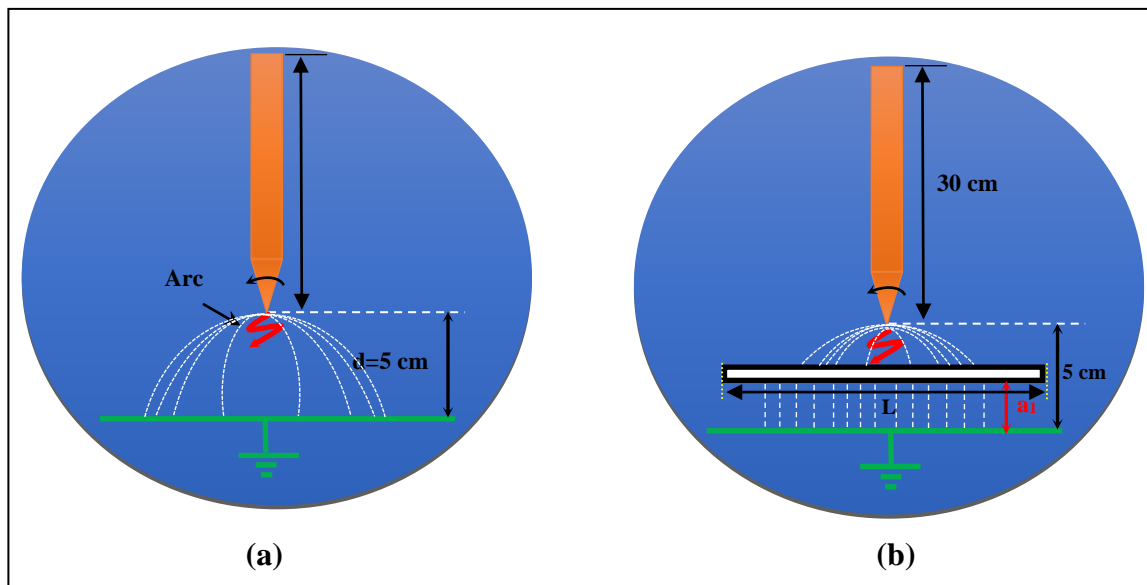


Figure I.3. Arrangement (a) pointe-plan, (b) pointe-barrière-plan.

I.7. Influence de la tension alternative sinusoïdale

La rigidité diélectrique dépend de l'amplitude et de la forme de la tension appliquée aux électrodes.

Dans le cas des petits intervalles d'air (inférieurs à 1m), beaucoup de travaux de recherche sont été effectués aussi bien sous tension continue, que sous tension alternative ou de choc de foudre. En ce qui concerne les longs intervalles d'air, les travaux ont été surtout effectués sous la contrainte de tension la plus défavorable, représentée par les chocs positifs de manœuvres à durée de front relativement longue.[22]

Sous tension alternative, les mécanismes conduisant au claquage sont plus complexes qu'en continue ou en impulsion par suite de l'influence des charges d'espace créées dans une alternance donnée sur l'alternance suivante.

En général, aux pressions intermédiaires, la tension disruptive la plus basse est celle correspondant au développement de la décharge générée pendant l'alternance positive.

Dans l'air à pression atmosphérique et pour une pointe de 5 mm de rayon de courbure, des impulsions de Trichel peuvent apparaître pendant l'alternance négative. L'influence de l'humidité n'est pas très importante durant l'alternance positive.

Dans l'hexafluorure de soufre sous tension alternative, l'humidité joue un rôle extrêmement important en favorisant le processus de stabilisation par effet couronne. [22]

I.8. Influence de la barrière isolante sur la tension de décharge

Dans le but d'étudier l'influence de la barrière sur la décharge prenant comme exemple différentes position de la barrière.

I.8.1. Influence de la position de la barrière dans l'intervalle d'air

La tension de décharge passe par un maximum pour une position de la barrière à 20% de l'intervalle à partir de la pointe pour des largeurs définies. Cette augmentation est due à l'allongement du canal de la décharge. L'amélioration de la rigidité diélectrique des intervalles d'air pointe-plan est due au fait que la barrière forme un obstacle géométrique à la décharge directe.[23]

A partir des observations photographiques et de l'analyse des résultats expérimentaux, établit que la tension disruptive correspond à la longueur du canal de la décharge. Elle est approximativement égale à la tension disruptive de l'arrangement pointe-plan sans barrière ayant une distance entre électrodes égale à la longueur de la décharge dans l'intervalle avec barrière.[23]

I.8.2. Influence de l'épaisseur et de la permittivité

Ces deux paramètres ont une influence sur la distribution des porteurs de charges positifs et sur la chute de tension sur la surface de la barrière.

Quand ces deux paramètres auront des valeurs importantes, le champ entre la barrière et le plan devient de plus en plus uniforme, mais l'influence de ces paramètres est beaucoup moins importante par comparaison à l'effet de la largeur et de la position.[23]

I.8.3. Influence de la largeur de la barrière

Quand la largeur de la barrière n'est pas aussi grande que la distance inter-électrodes, la rigidité de l'arrangement pointe-barrière-plan dépend de la longueur du canal de la décharge.

Cette longueur est approximativement égale à la distance pointe-bord de la barrière et barrière-plan.

Pour des petites largeurs, la décharge pourrait se faire de manière directe, par contre pour de grandes largeurs de la barrière devant la longueur de l'intervalle pointe-plan, la décharge se fait par étapes. [23]

I.8.4. Influence de la polarité de l'électrode pointe

Avec la polarité négative, la décharge se déroule par étapes pour toutes les positions de la barrière et aucune augmentation de la tension disruptive n'a été obtenue. Pour ce cas, les décharges apparaissent des deux côtés de la barrière isolante. L'amélioration n'a été mentionnée que pour une polarité positive de la pointe. Pour la pointe sous tension alternative l'amélioration de la rigidité du système est réalisée pour des positions de la barrière entre 20% et 60 % de l'intervalle. Sous des impulsions de choc l'amélioration de la rigidité est visible à une position de la barrière de 60% de la longueur de l'intervalle, mais pour des positions proches de l'une des électrodes la rigidité diminue.[23]

I.8.5. Influence du matériau de la barrière

Dans un travail, a effectué des mesures des courants de décharges pour des intervalles d'air avec différents matériaux de la barrière.

L'analyse des oscillogrammes a montré que chaque impulsion de courant a une structure complexe avec un caractère irrégulier. Ceci reflète le processus de décharge, c.à.d. que la décharge se fait sous forme de séries de micro impulsions consécutives en utilise la matière Plexiglas (C'est une matière transparente et rigide qui utilise dans le domaine d'électricité).[24]

I.8.6. Influence de l'accumulation de la charge d'espace

L'accumulation de la charge sur un isolant modifie la distribution du champ et les niveaux de tension de décharge. La modification du champ sur la surface peut mener aux décharges glissantes. Il est incontestablement important de comprendre l'influence de cette accumulation sur la distribution du champ dans les systèmes stratifiés (gaz-solide), comme étant un paramètre fondamental pour établir une isolation meilleure. Les techniques optiques sont capables de visualiser et quantifier la charge déposée sur le diélectrique.[23]

a utilisé la méthode de simulation de charge pour le calcul de champ et de la tension disruptive, les résultats sont comparés à une base de données expérimentale obtenue, par Nakanishi et Al. [23]

I.8.7. Influence de la pollution

Les couches semi-conductrices sur la barrière correspondent aux cas pratiques de l'emploi de la barrière dans l'air pollué. La pollution s'accumule sur la surface de la barrière et dès que la conductivité superficielle des couches semi-conductrices dépasse $1,6 \mu\text{S}$, on aura pratiquement les mêmes résultats que la barrière métallique.[25]

Avec une barrière à surface semi-conductrice, il a été constaté que la tension disruptive des intervalles d'air pointe-plan varie entre les valeurs obtenues avec la barrière isolante à surfaces propres et celles obtenues avec une barrière métallique de même forme.

Les cas extrêmes ont été observés dans le cas de barrières isolantes recouvertes de couches conductrices de diamètre variable.[25]

I.9. Formes de décharge

La forme de décharge dépend essentiellement du rapport $(2L/a_1)$, où $2L$ est la largeur de la barrière, et a_1 est la distance pointe-barrière. (voir figure I.5 et I.6).

Si $2L/a_1 < 4$ La charge se fait de manière directe. Par contre pour $2L > 4$ la décharge s'effectue par étape.

I.9.1. Décharge directe

La décharge directe est une décharge qui suit le chemin le plus court entre la pointe et le plan en passant par le bord de la barrière.[26]

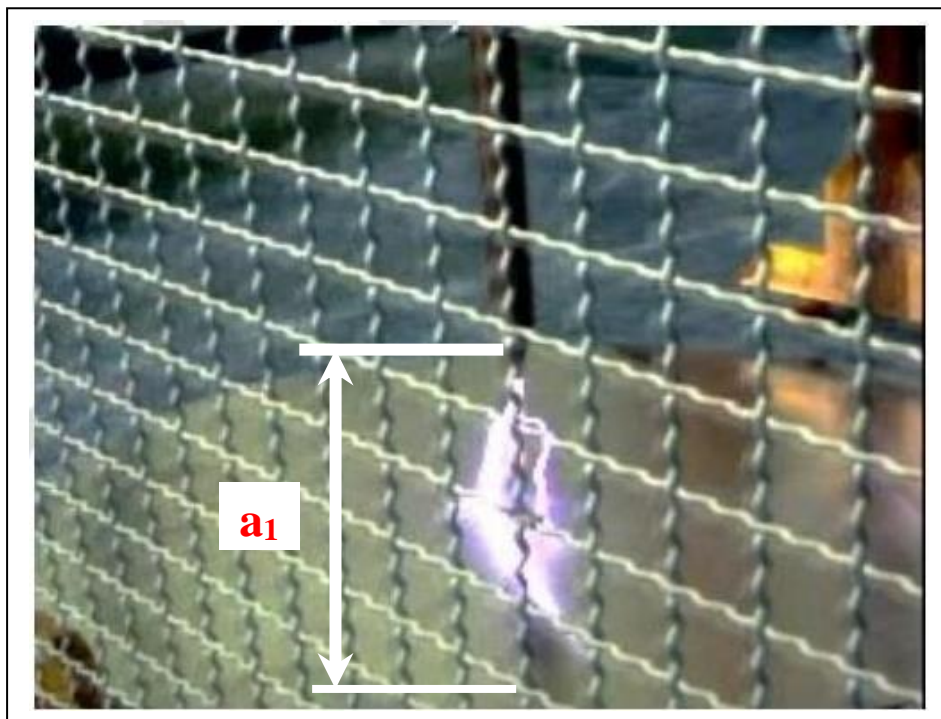


Figure I.4. Décharge directe sans barrière. Laboratoire de haute tension (HT) de l'université de Biskra.

L'amorçage se fait en une seule étape : de la pointe vers le plan. On distingue deux cas:

I.9.2. Décharges glissantes aux interfaces air/solide

Lorsque l'épaisseur du solide est assez grande pour empêcher une perforation en volume ou lorsque ce dernier est utilisé comme barrière dans un intervalle d'air, des décharges peuvent se propager sur la surface du diélectrique solide et le contourner (figure I.5). En se propageant, ces décharges peuvent creuser la surface du solide et laisser des traces telles des canaux ramifiés de faible diamètre appelées dans la forme globale. [27]

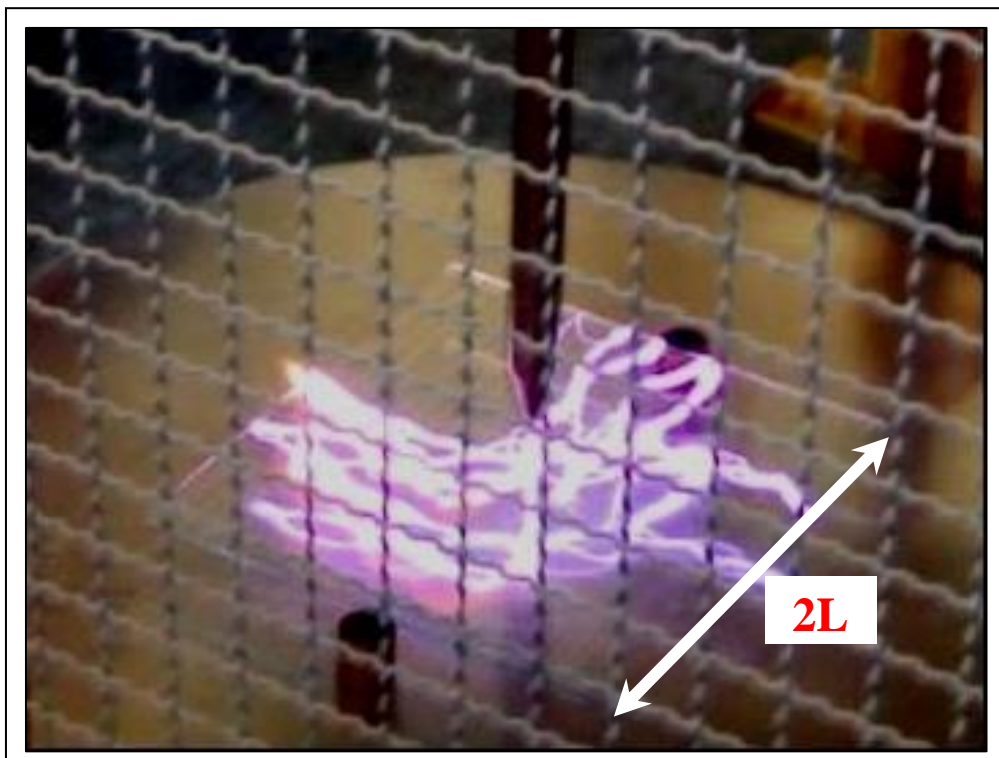


Figure I.5. Décharge glissante. Laboratoire de HT de l'université de Biskra.

I.9.2.1. Décharge perfore la barrière

La barrière est perforée lorsqu'elle est très large et assez mince proche de la pointe. Dans ce cas la décharge se prolonge comme dans le système sans barrière.[26]

I.9.2.2. Décharge contourne la barrière

Pour un système pointe -plan avec barrière, la décharge parte de la pointe suivant le trajet « pointe-bord de la barrière-plan » quand l'écran n'est pas suffisamment large. La décharge se voit dévié vers le bord de l'écran à cause de l'existence de force électrique répulsive. L'existence d'une décharge directe pour des barrières relativement larges est liée sur tout à la polarité de la pointe aussi qu'à la présence de forces électrostatiques à la surface de séparation des deux diélectriques (air-barrière).[26]

I.9.2.3. Décharge par étape

L'amorçage des systèmes pointe-barrière-plan avec une barrière très large s'effectue en trois étapes :

- ✚ L'effet couronne suivi de la décharge pointe-barrière qui constitue la première étape de décharge.
- ✚ La deuxième étape est le contournement de la barrière par les décharges glissantes pour des tensions élevées.

Finalement, la décharge s'effectue du bord de la barrière vers le plan. C'est la troisième étape.

[13]

La figure I.6 présente des photographies de décharges par étape, sous tension alternative (Laboratoire HT de l'université de Biskra).



Figure I.6. Décharge par étape, sous tension alternative (Laboratoire HT de l'université de Biskra).

I.10. Conclusion

Dans ce chapitre introductif, l'insertion d'une barrière isolante engendre une variation de la tension disruptive des intervalles d'air pointe-plan.

A partir de ce dernier, nous pouvons conclure que l'introduction d'une barrière isolante dans un intervalle pointe plan augmente la rigidité diélectrique du système, en modifiant la distribution du champ électrique dans l'intervalle d'air, cette variation est influencée par des

paramètres concernant la barrière (son matériaux, le dépôt de pollution sur sa surface, sa forme, ses dimensions,...).

L'implémentation de la technique de plans d'expérience pour la prédiction de la tension de décharge reste un objectif essentiel de notre travail. Le chapitre suivant donne une brève présentation théorique sur la technique de plans d'expérience appliquées à la fin de ce travail.



Chapitre II

"Plan D'expérience"

II.1. Introduction

Dans le langage scientifique, expérience signifie, fait attendu ou provoqué de manière à vérifier une hypothèse, une loi, un modèle et parvenir ainsi à une connaissance théorique de la façon dont se déroulent des phénomènes. Lors d'études expérimentales multiparamétriques, le nombre de variables peut être élevé. Les stratégies couramment employées pour mener à bien ces expérimentations sont souvent informelles, parfois quelque peu inutiles, et elles peuvent conduire à un nombre de résultats difficile à exploiter. Pour optimiser l'organisation des expériences et exploiter efficacement les résultats obtenus, le scientifique peut avoir intérêt à recourir à des méthodes telles que les Plans d'Expérience (PE). Le principe général des PE consiste à n'étudier que certains points du domaine expérimental sous investigation, tout en réussissant pourtant à appréhender le phénomène physique étudié sur l'ensemble du domaine considéré. En s'inspirant de la norme ISO 3534-3,[28] un PE peut être défini comme une organisation raisonnée d'essais, Une difficulté importante de la méthodologie réside alors dans la manière de choisir les points d'études de façon optimale. Dans l'industrie, la connaissance de la méthode des PE apparaît aujourd'hui comme un préalable d'une part à l'amélioration de la qualité des produits et des procédés, et d'autre part à la réduction des temps de développement. La méthode des PE permet en effet d'obtenir un maximum d'informations un cout minimal. Les avantages les plus reconnus des PE sont :

- ✚ L'efficacité, car seules les expériences indispensables sont réalisées.
- ✚ L'exactitude, pour un effort expérimental donné, la plus grande exactitude possible sera atteinte.
- ✚ Les interactions, les synergies existant entre les différents paramètres étudiés sont identifiées et mieux comprises. [29]

Ce chapitre présente une synthèse bibliographique sur les connaissances nécessaires pour aborder le sujet de la méthodologie des plans d'expériences.

II.2. Historique des plans d'expérience

Les plans d'expériences ne sont pas une découverte récente. La chronologie ci-après (Figure II.1) le rappelle en indiquant quelques points de repères généraux. La construction industrielle du Japon a permis aux méthodes statistiques développées entre le 18^{ème} et le 20^{ème} siècle, de jouer un rôle essentiel dans l'étude et l'optimisation de produits ou procédés. Les brillants succès des Japonais ont incité les entreprises européennes et américaines à considérer l'application des statistiques dans leurs activités de production. Ces outils polyvalents permettent des interventions rapides et structurées sur les processus. On peut désormais

améliorer produits et procédés sans connaître toutes les lois physiques et chimiques du phénomène étudié.

Depuis quelques années, on s'est aperçu que la qualité d'un produit (notion essentielle dans le monde de l'industrie et dans le monde en général) dépendait principalement de la conception de ce produit ou plus précisément de la connaissance parfaite de cette conception, plutôt que du produit fini lui-même. En effet, connaître sur le bout des doigts l'élaboration d'un produit permet de prévoir son évolution au cours du temps en fonction des paramètres influents, qu'ils soient internes ou externes. Or, ces paramètres sont généralement nombreux et difficilement modélisables par les méthodes classiques de la physique. Le concepteur a donc besoin d'une méthode expérimentale, peu coûteuse en expériences, qui lui permettra de mesurer et de connaître l'influence de tous les paramètres et d'en déduire les plus influents. Un plan d'expériences représente l'outil adéquat qui permettra de répondre à l'ensemble de ces questions. [30]

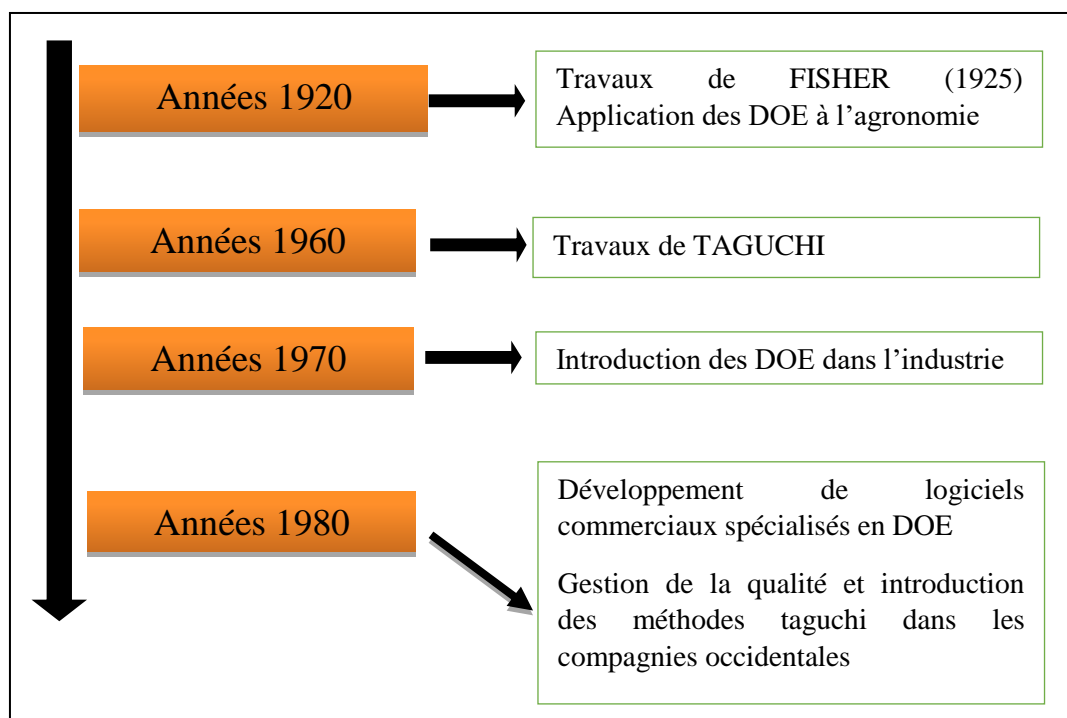


Figure II.1. Aperçu historique.

II.3. Généralités sur les plans d'expérience

Ces plans d'expériences ont un vocabulaire et une terminologie qu'il est nécessaire de définir :

II.3.1. Plans d'expériences

Un plan d'expériences est une stratégie optimale permettant d'organiser au mieux les essais qui accompagnent une recherche scientifique ou des études industrielles et de fournir le meilleur protocole expérimental pour modéliser ou prédire une réponse en fonction des facteurs de variabilités, selon un modèle présumé. [31]

L'utilisation des plans d'expériences dans des systèmes simples ou complexes ayant des fonctions d'étude de types :

$$y = f(x_i) \quad (\text{II.1})$$

Avec :

y : réponse du système

x_i : facteurs ou variables d'entrées du système, ils peuvent être continus ou discrets, qualitatifs ou quantitatifs.

permet d'éclaircir et de comprendre le fonctionnement de ces derniers en les simulant à une «boite noire» (Figure II.2), dont le contexte d'utilisation consiste à imposer aux facteurs d'entrées des variations particulières, à mesurer les variations induites des réponses et à en déduire les relations entre facteurs et réponse sans avoir une connaissance maximale du phénomène étudié. [32]

D'une manière générale, un plan d'expérience consiste à évaluer et à quantifier l'influence existant entre deux types de variables :

✚ *Le facteur*

✚ *La réponse*

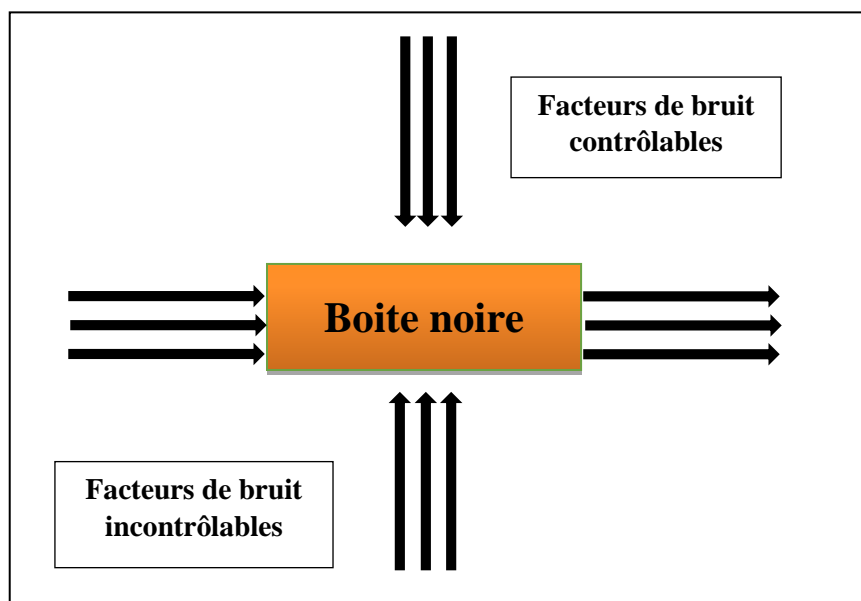


Figure II.2. Système de la boîte noire.

II.3.2. Définition d'un facteur

Les facteurs sont les grandeurs supposées influencer sur les variations des réponses, Parmi un ensemble de facteurs donné par l'expérimentateur, tous ne sont pas obligatoirement réellement « influents » sur les variations de la réponse. C'est la technique du screening qui permettra de déterminer lesquels le sont véritablement.

Les facteurs et les réponses sont les seules variables à intervenir dans l'écriture des plans d'expériences. La MPE est en effet un outil permettant d'établir des relations mathématiques entre les réponses et les facteurs (uniquement).[33]

Chaque facteur peut être :

II.3.2.1. Facteur quantitatif

Un facteur quantitatif est un facteur mesurable, souvent à variation continue ou discrète.

✚ Variable continue : il peut adopter toutes les valeurs numériques réelles dans l'intervalle [binf, bsup]

En l'occurrence, les dimensions géométriques de construction des machines électriques sont des facteurs continus (Épaisseur de culasse, hauteur de dent, etc.)

✚ Variable discrète : l'ensemble des valeurs que le facteur peut prendre est fini ; ces valeurs sont comprises dans un intervalle déterminé ;

Par exemple : le nombre d'encoches d'une machine électrique constitue un facteur discret. [5]

II.3.2.2. Facteur qualitatif

Un facteur qualitatif est un facteur non mesurable, on distingue des variables qualitatives ordinales et nominales.

✚ Variable ordinale : sont des variables qui contiennent un ordre.

✚ Variable nominale : sont des variables qui correspondent à des noms, il n'y a aucun ordre précis. [34]

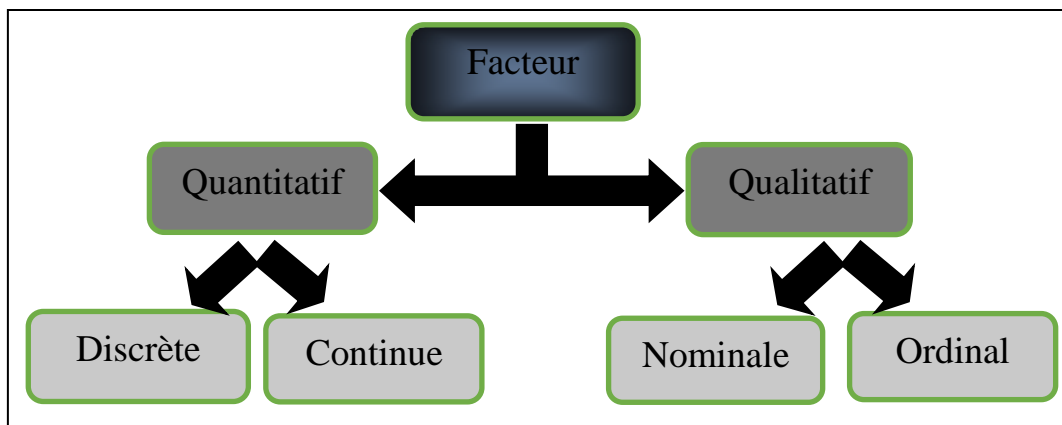


Figure II.3. Les différents types de facteur.

✚ Niveau d'un facteur :

Les facteurs sont pleinement caractérisés par les valeurs suivantes :

- Borne inférieure (*binf*) : limite basse (ou *niveau bas*) des valeurs que le facteur peut prendre
- Borne supérieure (*bsup*) : limite haute (ou *niveau haut*) des valeurs que le facteur peut prendre.[33]

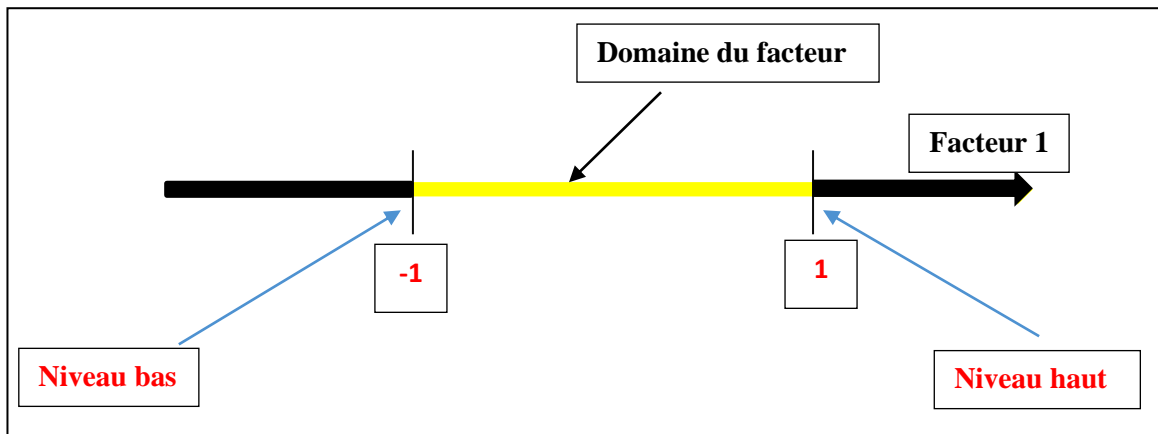


Figure II.4. Le domaine et les niveaux d'un facteur.

II.3.3. Définition des réponses

On qualifie de réponse la grandeur qui est observée pour chaque expérience réalisée, En d'autres termes, c'est le résultat mesuré d'une étude. Sachant qu'à chaque point du domaine d'étude correspond une réponse. L'ensemble de ces dernières, forme la surface de réponse. La valeur d'une réponse ne peut être modifiée que de manière indirecte en faisant varier les facteurs. [35]

II.4. Objectif et principe des plans d'expérience

L'intérêt majeur des plans d'expérience réside dans le fait qu'ils permettent d'optimiser le nombre d'expérimentations à réaliser lors de la phase d'essais, en déterminant au préalable les réels facteurs ou combinaisons de facteurs influents sur la réponse du système à étudier [36].

L'objectif des plans d'expériences consiste à ne pas étudier tous les points expérimentaux possibles, mais seulement certains points choisis vis-à-vis du type du plan d'expériences adapté et de ses propriétés d'orthogonalité. Cependant leur principe repose sur le fait de varier simultanément les niveaux d'un ou plusieurs facteurs à chaque essai. Ceci permettra d'une part, de diminuer fortement le nombre d'expériences à réaliser tout en augmentant le nombre de facteurs étudiés et d'autres part, de détecter les interactions entre les facteurs et de déterminer leur réglage dit optimal par rapport à la réponse prédite.

Deuxième objectif et le principe des plans d'expériences mettent l'accent sur le fait de programmer une méthodologie bien précise, articulée sur une succession d'étapes pour accomplir l'étude entamée. Cette succession d'étapes débute par une formalisation du problème qui consiste à recueillir toutes les informations concernant le processus étudié, puis vient l'étape de la planification qui a pour but d'élaborer la liste des essais expérimentaux et de fixer l'ordre de leur réalisation selon le plan adapté afin de passer à l'étape de l'expérimentation via laquelle une collecte de résultats est obtenue. Au final, ces derniers sont analysés, modélisés puis optimisés. [32]

II.5. Conditions d'application des plans d'expérience

Les plans d'expériences sont un instrument bien adapté à la recherche à chaque fois qu'intervient un grand nombre de paramètres. Ils permettent de réduire fortement le nombre d'essais, de gagner du temps et de l'argent, tout en parvenant à un meilleur résultat. Leurs applications s'imposent chaque fois que l'on veut concilier au mieux de nombreuses exigences différentes. [34]

Trois éléments sont indispensables pour réussir cette démarche : la planification des essais, la qualité de l'expérience, ensuite, la maîtrise d'outils mathématiques tels que la régression linéaire multiple, enfin, l'apport des statistiques pour la validation globale des modèles et la détermination des effets significatifs. Pour appliquer la méthode des plans d'expériences et, en particulier, les méthodes s'appuyant sur les régressions linéaires multiples, il faut que les deux conditions suivantes soient réalisées :

- **Condition 1**

La valeur que prend chaque variable doit être connue sans erreur, or dans un travail d'expérimentation on ne peut nier la présence d'erreur. Donc pour satisfaire cette condition on doit s'assurer que l'erreur induite sur la valeur de la variable soit très petite, voire négligeable devant la variation de cette même variable lorsqu'elle change de valeur.

- **Condition 2**

La réponse doit être homoscedastique pour cela il appartient à l'expérimentateur de garder les mêmes gestes, le même matériel et la même cadence lors de toute la campagne d'expérimentation. [37]

II.6. Méthodologie expérimentales

L'acquisition de l'information par la méthodologie des plans d'expérience se fait selon la démarche suivante :

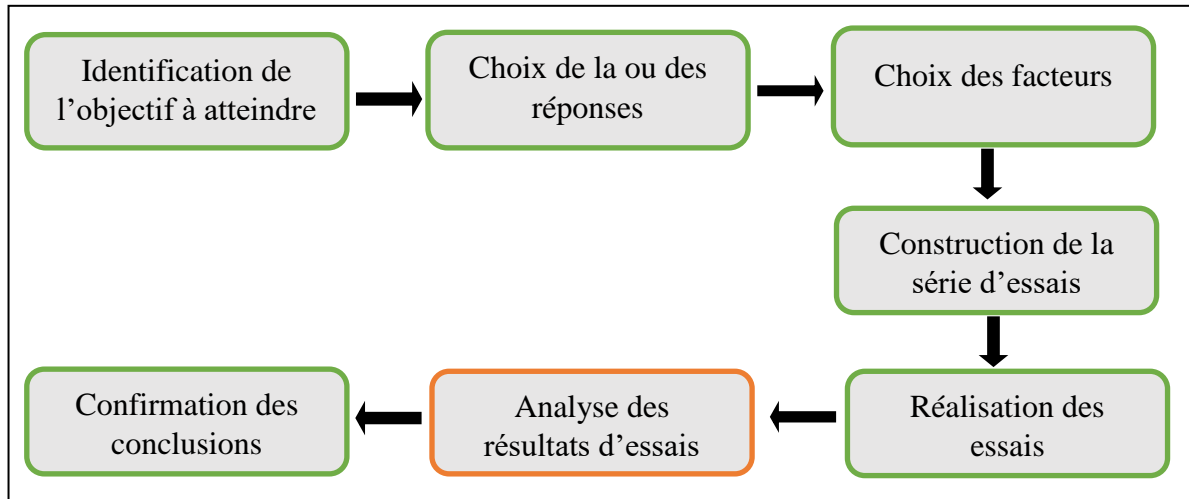


Figure II.5. Les étapes d'un plan d'expériences.

II.6.1. Identification de l'objectif à atteindre

Il est nécessaire de définir l'objectif de l'expérimentation ainsi que les contraintes liées à sa réalisation.

II.6.2. Choix de la ou des réponses

Quel que soit l'objet du plan d'expériences envisagé, il est nécessaire de définir une ou plusieurs grandeurs permettant de caractériser le fonctionnement du système. Cette (ou ces) grandeur(s) sont désignée(s) sous le nom de réponse(s).

Il est très important d'apporter le plus grand soin aux choix de la ou des réponses, un choix inapproprié peut conduire à une analyse inutilement compliquée des résultats de l'expérimentation ou à une expérimentation inutilement longue.

Il est souhaitable qu'une réponse ait les qualités suivantes :

- ✚ Traduire le mieux possible le fonctionnement du système.
- ✚ Avoir un écart type de répétabilité satisfaisant.
- ✚ Être facilement et rapidement mesurable ou évaluable.
- ✚ Être de nature continue. [38]

II.6.3. Choix des facteurs

Cette étape consiste à identifier le paramètre appelés facteurs Les facteurs peuvent être qualitatifs ou quantitatifs. La manière de procéder est la suivante :

- ✚ Recenser tous les facteurs susceptibles d'avoir une influence sur la réponse.
- ✚ Si des informations sont disponibles, sélectionner les facteurs a priori les plus importants pour l'étude. En cas d'absence d'information, les conserver tous
- ✚ Choisir le nombre de valeurs que prendra chaque facteur au cours de l'essai ; ces valeurs sont appelées modalités pour les facteurs qualitatifs et niveaux pour les facteurs quantitatifs
- ✚ Sélectionner les interactions entre facteurs a priori importantes pour la réponse, si la connaissance du système le permet.

Le nombre de facteurs, le nombre de modalités, ou niveaux de chaque facteur et les interactions éventuelles sont des critères déterminants pour la sélection du plan. [38]

II.6.4. Construction de la série d'essais

La série d'essais est construite, après le choix d'un modèle, en utilisant des matrices d'expériences issues de la théorie des plans d'expériences, plans factoriels complets ou fractionnaires, etc...

Certaines combinaisons de modalités peuvent être parfois impossibles à réaliser expérimentalement, il faut alors redéfinir certains facteurs ou s'engager vers des plans nécessitant l'utilisation de logiciels spécifiques pour la construction des matrices d'expériences

Pour confirmer la dispersion expérimentale et évaluer une dérive éventuelle, il est utile de répéter un essai, choisi si possible au centre du domaine expérimental pour les variables quantitatives. Il est préférable de répartir ces répétitions sur l'ensemble de la durée de l'expérimentation. [38]

II.6.5. Réalisation des essais

Les expériences prévues sont réalisées en faisant varier les facteurs selon les interactions fournies par la matrice d'expériences choisie. Cette matrice se présente sous la forme d'un tableau dont chaque ligne est une expérience et chaque colonne est un facteur. [38]

II.6.6. Analyse des résultats d'essais

L'analyse de la variance et la régression sont des méthodes d'analyse couramment utilisées.

Les résultats obtenus à l'issue des essais permettent de calculer les coefficients d'un modèle quantifiant l'effet de chacun des facteurs et des interactions retenues, sur chacune des réponses étudiées. [38]

II.6.7. Confirmation des conclusions

Des essais supplémentaires sont le plus souvent nécessaires pour valider les conclusions du plan. [38]

II.7. Différents type des plans d'expérience

Il existe cinq grandes familles de plans d'expériences, plans de mélanges, plans de criblage et plans de modélisation (surfaces de réponses) , plans factoriel et plans de criblage

II.7.1. Plans de mélanges

Les plans de mélange sont des plans particuliers adaptés aux facteurs dépendants, ils traitent les cas où certaines propriétés que l'on cherche à modéliser sont dépendantes des proportions des composants intervenant dans le mélange. [39]

Suivant l'emplacement des points représentatifs des compositions, on distingue trois principaux types de plans de mélanges :

- ✚ Les plans en réseaux.
- ✚ Les plans de mélanges centrés.
- ✚ Les plans de mélanges centrés augmentés

II.7.2. Plans de criblage

Ils sont ainsi nommés car, ils permettent de cribler un grand nombre de facteurs en un nombre minime d'essais. C'est le type le plus simple. L'objectif est de découvrir les facteurs les plus influents sur une réponse donnée en un minimum d'expériences pour avoir une optimisation qui fournit plus de détails sur les relations entre les facteurs les plus importants et la réponse. [40]

II.7.3. Plans factoriel

En statistiques, un plan factoriel est une expérience qui consiste à choisir des valeurs pour chacun des facteurs en faisant varier simultanément tous les facteurs, de façon exhaustive ou non. Le nombre d'essais peut alors devenir très grand, i.e. on a une explosion combinatoire. Une telle expérience permet l'étude de l'effet de chaque variable sur le processus, ainsi que l'étude de la dépendance entre les variables. [14]

II.7.4. Plans de taguchi

La méthode Taguchi, inventée par Genichi Taguchi, est une méthode statistique pour réaliser des plans d'expériences. Cette méthode se concentre avant tout à minimiser les

variations autour de la valeur de consigne. L'objectif est d'obtenir des produits, processus et systèmes aussi robustes et insensibles aux perturbations externes que possible. [41]

II.7.5. Plans de surfaces de réponses

La méthodologie de surface de réponse est définie comme un ensemble de techniques mathématiques et statistiques qui sert à l'optimisation et à la compréhension du système à étudier.

Dans le cas général, la surface de réponse représente la géométrie de la surface par rapport à un ou plusieurs facteurs du système afin de chercher une meilleure précision sur la surface de réponse. [42]

II.8. Avantages des plans d'expérience

La méthode des plans d'expériences définit par le principe « tous les facteurs à chaque moment », représente un nombre important d'avantage comparée à la méthode classique définit par « un facteur à un moment donné ». Ces avantages résident dans la: [43]

- + Diminution du nombre d'essais.
- + Possibilité d'étudier un grand nombre de facteurs.
- + Détection des interactions entre les facteurs.
- + Modélisation des réponses étudiées (conception d'un modèle mathématique).
- + Précision optimale des résultats.

II.9. Logiciels des plans d'expérience

Les logiciels des plans d'expériences possèdent des bibliothèques de plans classiques et ils permettent aussi de construire les plans particuliers. On peut réaliser le calcul des coefficients les plans d'expériences avec un tableur, mais cela nécessite de la programmation et du temps. Il est donc préférable d'utiliser un logiciel adapté qui effectue non seulement le calcul des coefficients mais aussi les calculs statistiques permettant d'évaluer la qualité du modèle mathématique. Les logiciels des plans d'expériences sont aussi programmés pour calculer des réponses dans tous les domaines d'étude, pour effectuer les analyses de variance, pour tracer des courbes d'iso réponses, pour construire les surfaces de réponses et pour déterminer les zones d'intérêt. Cet ensemble de possibilités permet d'effectuer de multiples analyses et de regarder ces données sous tous les angles. On arrive ainsi à extraire, en peu de temps, toute l'information présente dans les résultats d'un plan d'expériences. [44]

Nous indiquons ci-dessous les principaux logiciels des plans d'expériences et les sites internet correspondants. Quelques-uns d'entre eux mettent à disposition des personnes

intéressées des versions de démonstration et certains des versions complètes simplement limitées dans le temps. [45]

Tableau II.1. Principaux logiciels de plans d'expériences.

Logiciels	Sites internet
JMP	http://www.jmpdiscovery.com
Minitab	http://www.minitab.fr
Statistica	http://www.intesoft.com/produits/tech/statistica
Statgraphics	http://www.sigmaplus.fr
Unscrambler	http://www.camo.no
Pirouette	http://www.infometrix.com
Modde	http://www.umetrics.com

II.10. Présentation de logiciel « Minitab »

Minitab est un logiciel propriétaire commercial de statistiques. Il est développé par Minitab, Inc. pour le système d'exploitation Windows uniquement. Il est largement utilisé par les universités pour enseigner les statistiques, et les développeurs le dirigent particulièrement aux entreprises en affichant leur intention de les rendre plus performantes selon la méthode « Six Sigma ». Logiciel développé depuis 1972 et disponible en 8 langues. [46]

II.11. Conclusion

Nous avons présenté dans ce chapitre des éléments bibliographiques essentiels relatifs à la Méthodologie des Plans d'Expériences (MPE). En tout premier lieu, les différents types de variables ont été recensés et présentés.

Les plans d'expériences offrent un simple et efficace de réduire le cout et d'augmenter la robustesse des études expérimentales effectuées lors de la conception ou de la variation d'un produit. Ils permettent d'utiliser toute la connaissance du produit dont le concepteur peut disposer a priori, offrent un cadre de modélisation rigoureux, et leur mise en œuvre ne nécessite que des connaissances mathématiques élémentaires. La modélisation par application de la méthode des plans d'expériences pour l'étude de surface de réponse présentée dans le dernier chapitre dans un code de calcul sous l'environnement Minitab.

Chapitre III

"Résultats et Validation"

III.1. Introduction

La rigidité diélectrique d'un milieu isolant représente la valeur maximum du champ électrique que le milieu peut supporter avant le déclenchement d'un arc électrique (donc d'un court-circuit), donc, il est définie comme la résistance électrique d'un matériau isolant.

La rigidité diélectrique est mesurée comme la tension maximale nécessaire pour produire un claquage diélectrique à travers un matériau.

Dans un champ électrique suffisamment fort, les propriétés isolantes d'un isolant se détériorent, ce qui permet un écoulement de charge.

Le claquage de l'air a été le sujet de nombreuses études expérimentales, théoriques et de simulation.

Parmi les outils mathématiques qui peuvent répondre à nos besoin on peut citer la méthode de plan d'expérience (MPE).

Le plan d'expériences peut d'abord apparaître comme une stratégie de planification d'expériences utilisée afin d'arriver à des conclusions solides et adéquates, de manière efficace et économique, basée sur le fait qu'une série d'expériences bien organisée conduit fréquemment.

La méthode des plans d'expériences, de par les outils statistiques qui lui sont associés, est également un moyen à privilégier pour exploiter et analyser des séries d'essais qui ont été plus classiquement conduites, en utilisant initialement des méthodes moins formelles.[47]

Le travail présenté ici vise à démontrer que la méthode PE peut être utilisée comme méthode de prédiction de la tension de claquage d'une configuration point-barrière-plan, en utilisant le logiciel Minitab version 19 et en visualisant les résultats obtenus pour les deux configurations, (Avec et sans barrières). Les résultats expérimentaux sont comparés aux résultats de la simulation numérique. Nous introduisons d'abord le principe du modèle puis l'appliquons à l'étude des effets barrières.

III.2. Méthodologie Des Surfaces De Réponse (MSR)

Dans le cas général, on appelle surface de réponse, la représentation géométrique de la réponse d'un processus physique spatio-temporel aléatoire à des variables stimuli. La propriété étudiée, ou réponse Y, résulte alors du transfert par une fonction de réponse explicite, ou fonction de transfert, des variables d'entrée du système, le changement de valeurs de ces variables entraînant un changement de la valeur de la fonction de réponse. Les modèles expérimentaux des surfaces de réponse Prennent en considération le choix des variables stimuli, la définition des périodes d'observation et le calcul d'erreur. Les variables

d'entrée, stimuli représentatifs du phénomène, sont notées X_i ($i= 1..... n$), et sont appelées aussi variables de base du phénomène.[48]

Elle permet aussi de faire une interprétation rapide et sans équivoque en fournissant un modèle expérimental précis du système étudié. Le déroulement de l'analyse par cette méthode passe par les étapes suivantes :

- ✚ La définition du système ainsi que de la réponse du système à connaître ou modéliser, ainsi que les facteurs susceptibles de modifier cette réponse.
- ✚ Ensuite, le nombre de facteurs pour l'étude, ainsi que le nombre de niveaux est défini. Dans le cadre de cette étude.
- ✚ Le nombre de facteur permet ensuite de choisir le niveau de précision du plan d'expériences en fonction de la réduction choisie.[47]

III.3. Présentation du Arrangement "pointe-barrière-plan"

Pour l'arrangement pointe-barrière-plan nous avons utilisé une pointe en cuivre de 30 cm de longueur, 2,8 cm de diamètre et à bout conique à 30° , et d'une barrière en verre de 3,5 et 6 mm d'épaisseur avec une largeur de $L=10$ cm. Le tout est présenté dans la figure I.3 du premier chapitre. Un plan en aluminium mis à la terre. [49][50][51][52][53]

a_1 : distance pointe-barrière (cm).

d : distance pointe plan qui est fixée à 5 cm.

Les streamers qui prennent naissance au voisinage immédiat de la pointe, se propagent radialement sur la surface du solide et s'arrêtent à une certaine distance de la pointe qu'on appelle longueur final L_f . Cette dernière dépend de l'amplitude de la tension appliquée, de l'épaisseur et de la nature du solide isolant. L'évaluation de L_f des décharges glissantes est effectuée par la mesure de la distance entre la pointe et le contour circulaire formé par l'extrémité des branches formant la décharge.

L'introduction d'un solide diélectrique dans l'espace inter électrode permet, dans le cas d'un champ divergent, d'améliorer la tenue diélectrique du système. La barrière est d'autant plus efficace qu'elle est proche de l'électrode acérée (c'est-à-dire celle dont le rayon de courbure est le plus faible).[54]

On prend comme notation des différentes positions de la barrière de la pointe (a_1) en % qui prend les valeurs suivantes : 0%(0cm), 20%(1cm), 40%(2cm), 60%(3cm), 80%(4cm), 100% (5cm). Pour mieux comprendre le système voir tableau III.1.

Tableau III.1. Différents arrangements avec et sans barrière.

Avec barrière						Sans barrière	
5cm (100%)	4cm(80%)	3cm(60%)	2cm(40%)	1cm(20%)	0cm(0%)		Positon de la barrière "a ₁ "
							Arrangement pointe-plan & pointe-barrière-plan

III.4. Processus d'acquisition des connaissances

Augmenter ses connaissances, c'est trouver la réponse à une question posée. On commence donc par se poser une ou plusieurs questions (figure III.1). [55]

Par exemple, si l'on désire connaître l'influence d'une barrière propre ou polluée sur le comportement d'une configuration pointe plan, on pourra se poser quelques questions.

Ces questions délimitent le problème à résoudre et fixent les travaux à exécuter.

Il est donc important de se poser les questions qui correspondent réellement au problème. Bien sûr, avant d'entreprendre des expériences, il est prudent de vérifier que l'information cherchée n'existe pas déjà ailleurs.

Dans ce but, on effectue un inventaire des connaissances, soit une bibliographie, soit une consultation d'experts, soit un calcul théorique, soit toute autre démarche ayant pour but de répondre, aux questions posées. Après cette phase d'enquête, les questions initiales peuvent être entièrement résolues et il n'y a plus de problème.

Dans le cas contraire, certaines questions restent entières ou elles sont modifiées : il est alors nécessaire d'entreprendre des expériences pour obtenir les réponses complètes que l'on souhaite. Ce travail préalable fait partie du métier d'expérimentateur et nous n'insisterons pas. Ce n'est pas sur cette phase du processus que nous voulons faire porter notre effort de réflexion et d'amélioration.

N'ayant plus que les questions sans réponse immédiate, il faut faire des expériences. Comment peut-on choisir ces expériences pour :

- + Arriver rapidement aux meilleurs résultats possibles,
- + Eviter de réaliser des expériences inutiles,
- + Obtenir la meilleure précision possible sur les résultats,
- + Permettre d'avancer à coup sûr,
- + Etablir la modélisation du phénomène étudié,
- + Découvrir la solution optimale

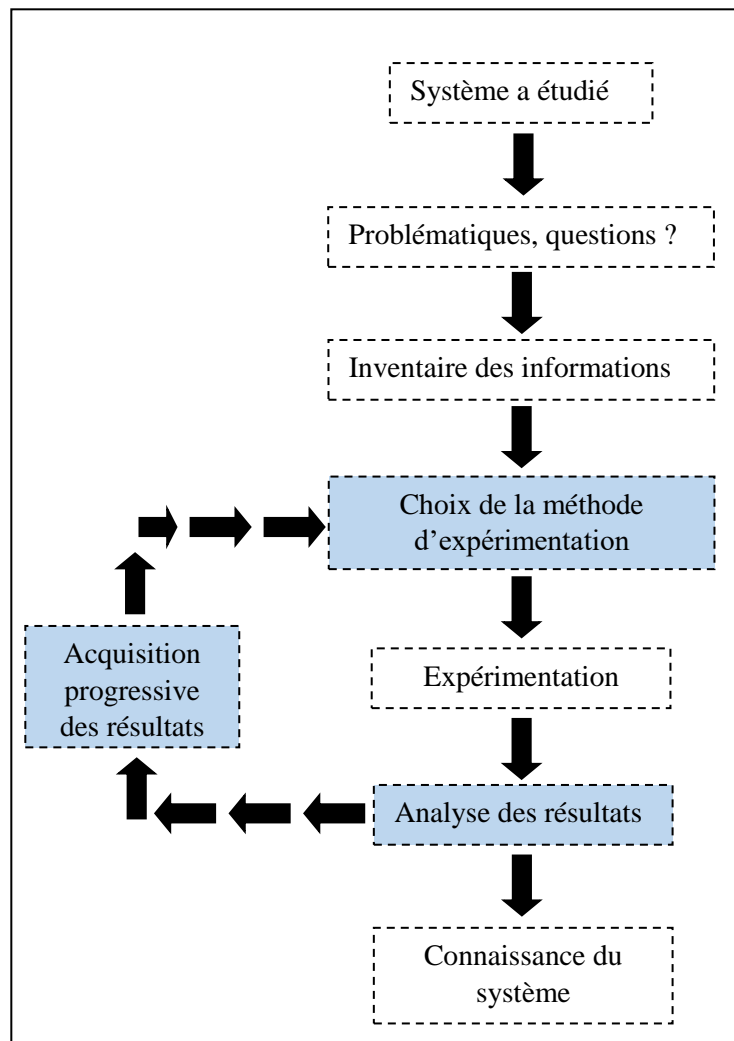


Figure III.1. Organigramme Méthodologie expérimentales.

Donc ➡ Les plans d'expériences optimisent les trois parties encadrées du processus d'acquisition des connaissances.

Les plans d'expériences permettent d'organiser au mieux les essais qui accompagnent une recherche scientifique ou des études industrielles.

III.5. Prédiction de la tension de claquage en utilisant la MSR

Il existe plusieurs approches de conception dans la méthode plan d'expérience, chacune étant différente des autres. D'après nos recherches, nous avons constaté que la méthode de surface de réponse (MSR) était la plus proche de notre étude.

III.5.1. Conception la MSR

La mise en œuvre d'un MSR nécessite :

- ✚ La détermination des entrées et des sorties pertinentes, c'est à dire les grandeurs qui ont une influence significative sur le phénomène que l'on cherche à modéliser.
- ✚ Définissez le modèle avec : les facteurs et les niveaux
- ✚ Réalisation le plan par saisir le résultat des essais
- ✚ Analyser et interpréter les résultats

III.5.2. Détermination des entrées/sorties du MSR

Avant de créer un plan, il faut d'abord introduire les entrées qui sont dans notre cas la conductivité (δ), la position (P) et l'épaisseur de la barrière (E), (tableau III.2), les valeurs de la tension de claquage "V" seront considérées comme seule sortie de notre MSR.

La méthodologie suivie pour les déterminer est la suivante :

- ✚ En se référant à la base de données pratique collectée de la littérature, nous avons fait correspondre à chaque étape atteinte de la décharge, pour chaque triplet(P, δ , E), une valeur de sortie "V".

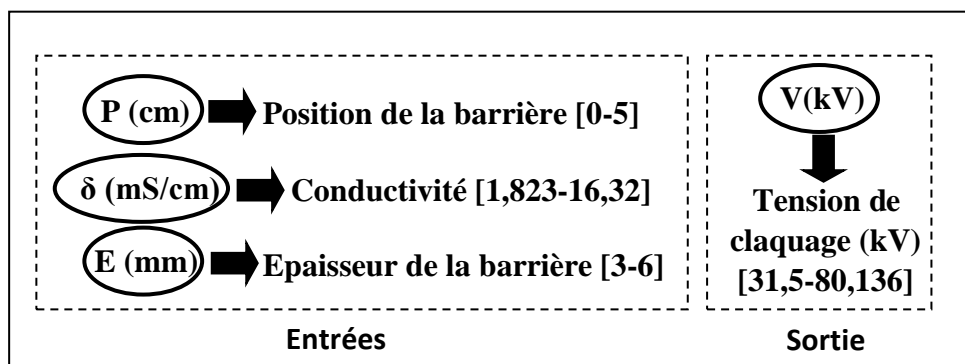


Figure III.2. Variables d'entrées et sortie.

III.6. Utilisation du logiciel Minitab

Les logiciels de plans d'expériences possèdent des bibliothèques de plans classiques et ils permettent aussi de construire les plans particuliers [34]. Le logiciel choisi dans cette étude est le Minitab 19 (figure III.3), un puissant logiciel de statistiques adapte a tous. Il est programmé

pour calculer des réponses dans tous les domaines d'étude, pour effectuer les analyses de variance, pour tracer des courbes d'iso-réponses, pour construire les surfaces de réponse et pour déterminer les zones d'intérêt.

Cet ensemble de possibilités permet d'effectuer de multiples analyses et de regarder ces données sous tous les angles. On arrive ainsi à extraire, en peu de temps, toute l'information présente dans les résultats d'un plan d'expériences.



Figure III.3. Logiciel statistique Minitab.

Minitab® est le logiciel de référence pour l'analyse statistique des données de projets d'amélioration de type Six Sigma. Le menu Assistant de Minitab est un arbre de décisions, il vous guide tout au long de votre analyse, de la représentation de vos données, au choix du test, à sa mise en œuvre, son analyse et son interprétation.

Pour réaliser un plan d'expériences à l'aide du logiciel Minitab, il faut définir les réponses, les facteurs et leurs niveaux. Les modalités d'introduction de ces données sont pratiquement les mêmes pour tous les plans.

Pour créer un plan d'expériences (Surface de réponse), cliquez sur la rubrique STAT > DOE > **Response Surface**. Il apparaît un menu dans lequel, la création d'un plan composite centré est possible.

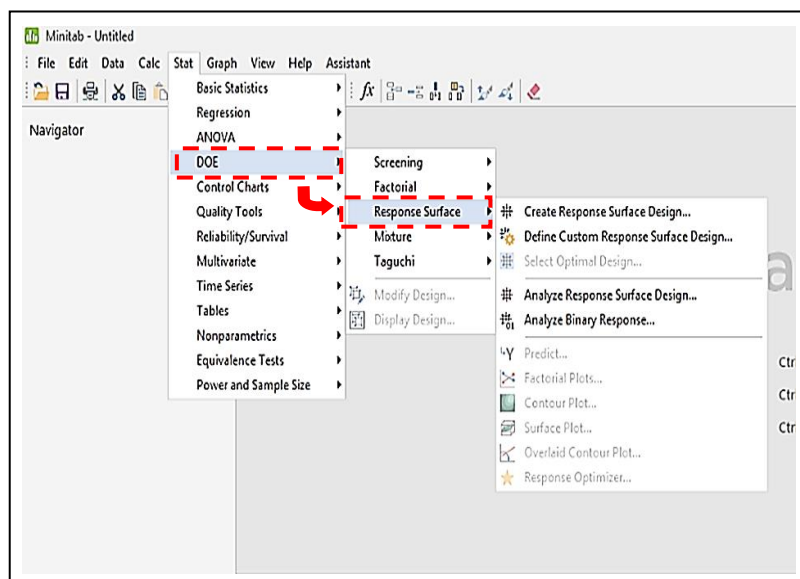


Figure III.4. Menu permettant de créer un plan composite centré.

Le nombre de facteurs est introduit en cliquant sur l'icône « Define Custom Response surfacedesign », puis choisir le nombre de facteurs en cliquant sur « Low/High ».

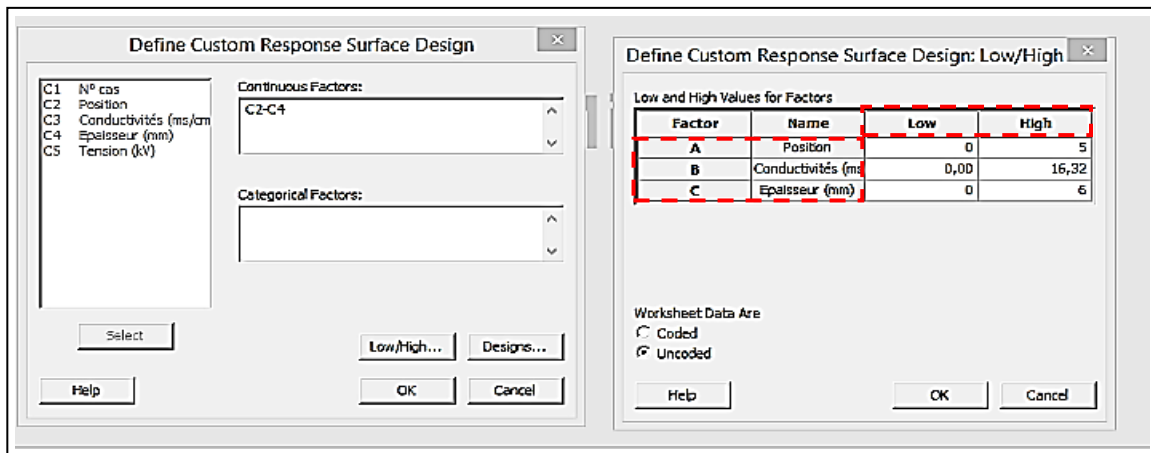


Figure III.5. Menu permettant d’introduire le nombre de facteurs.

Afin de prédire le résultat :

La prédiction du résultat est introduit en cliquant sur l'icône STAT > DOE > Response Surface> Predict ...

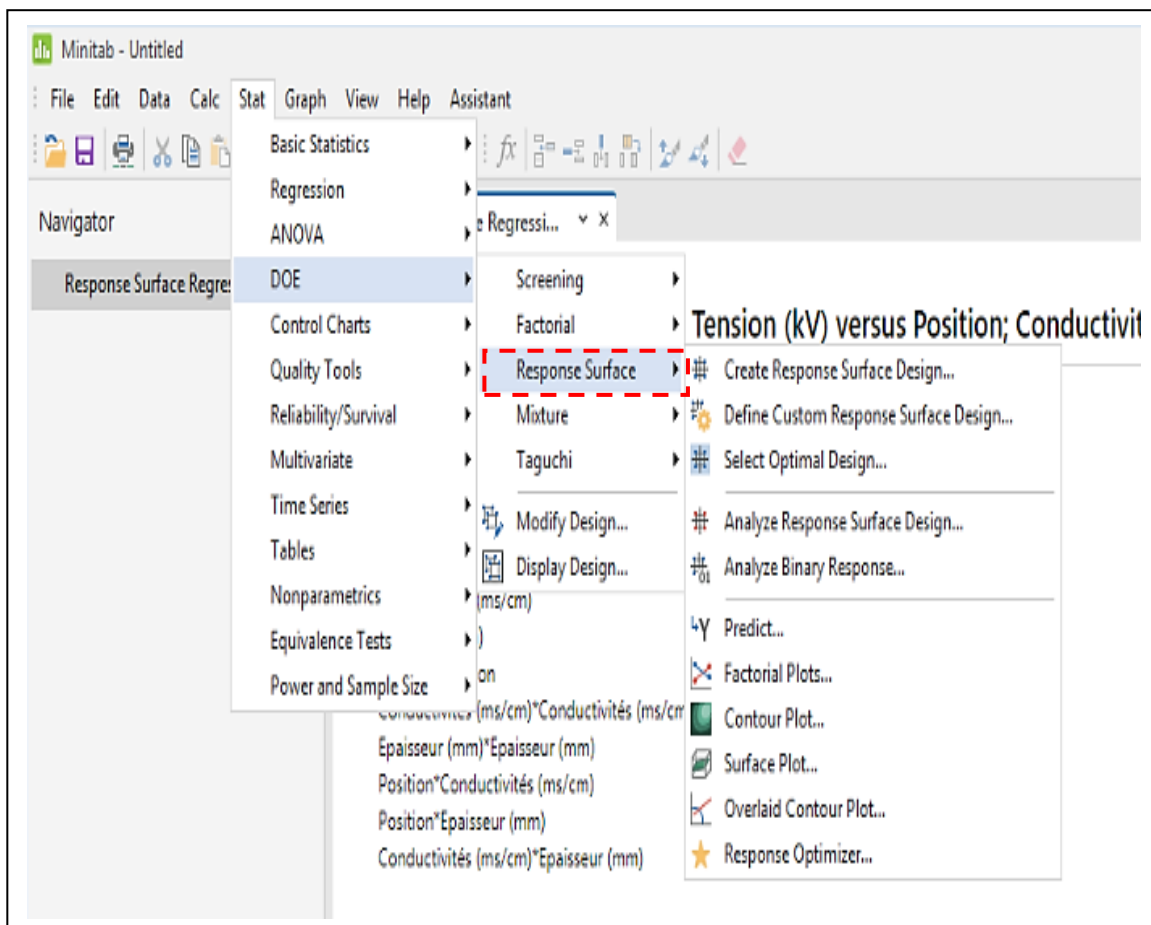


Figure III.6.Menu permettant d’introduire la prédiction.

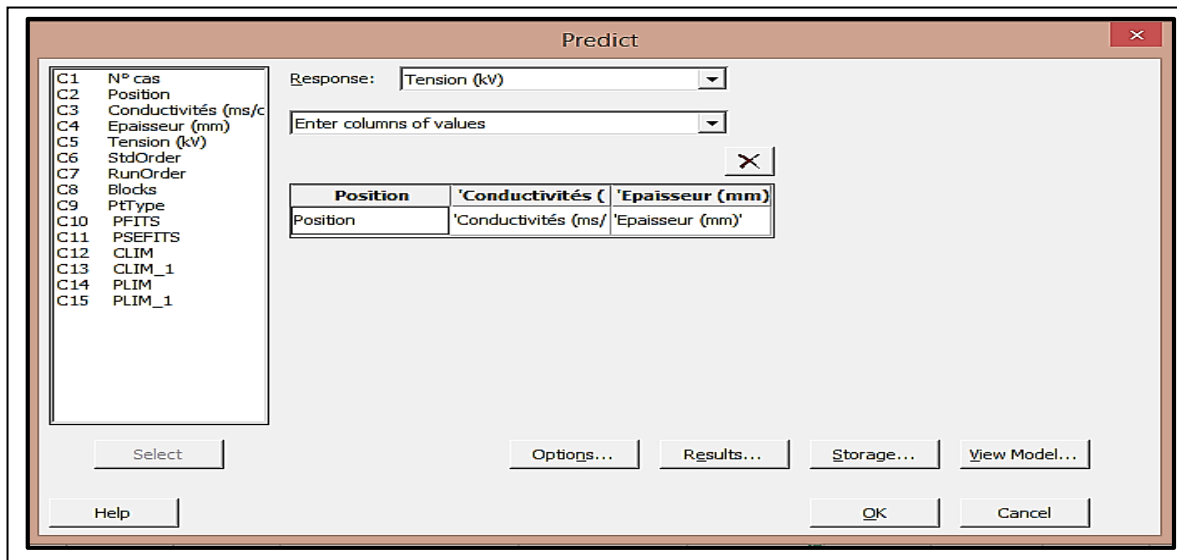


Figure III.7. Menu permettant d'introduire la prédiction.

III.7. Résultats et discussion

Les résultats des essais sont représentés dans les courbes suivant :

III.7.1 Diagramme de Pareto

Un diagramme de Pareto montrant la valeur absolue de l'effet normalisé, classé de haut en bas. Le graphique dessine également une ligne de base pour indiquer quels effets sont statistiquement significatifs. Dans notre cas, un diagramme de Pareto détermine la valeur et l'importance des effets. Sur un diagramme de Pareto, les barres qui traversent la ligne de référence sont statistiquement significatives. Par exemple, dans ce diagramme de Pareto, les barres représentant les facteurs C, B et BC coupent la ligne de base à 2. Ces facteurs sont statistiquement significatifs au niveau de 0,05 par rapport au terme actuel du modèle. Étant donné que le diagramme de Pareto affiche la valeur absolue des effets, vous pouvez déterminer quels effets sont importants, mais pas quels effets augmentent ou diminuent la réponse. Utilisez le tableau des coefficients pour vérifier l'ampleur et la direction de ces effets.

Il peut extraire les paramètres les plus importants (Figure III.8). Parmi tous les facteurs étudiés, la position [P (cm)] apparaît comme un facteur très influent au niveau de confiance choisi ($\alpha = 0,05$), et la conductivité [δ (mS/cm)] peut être calculée selon ce même graphique influence la réponse. L'épaisseur équivalente [E (mm)] n'a pas d'effet significatif sur la réponse.

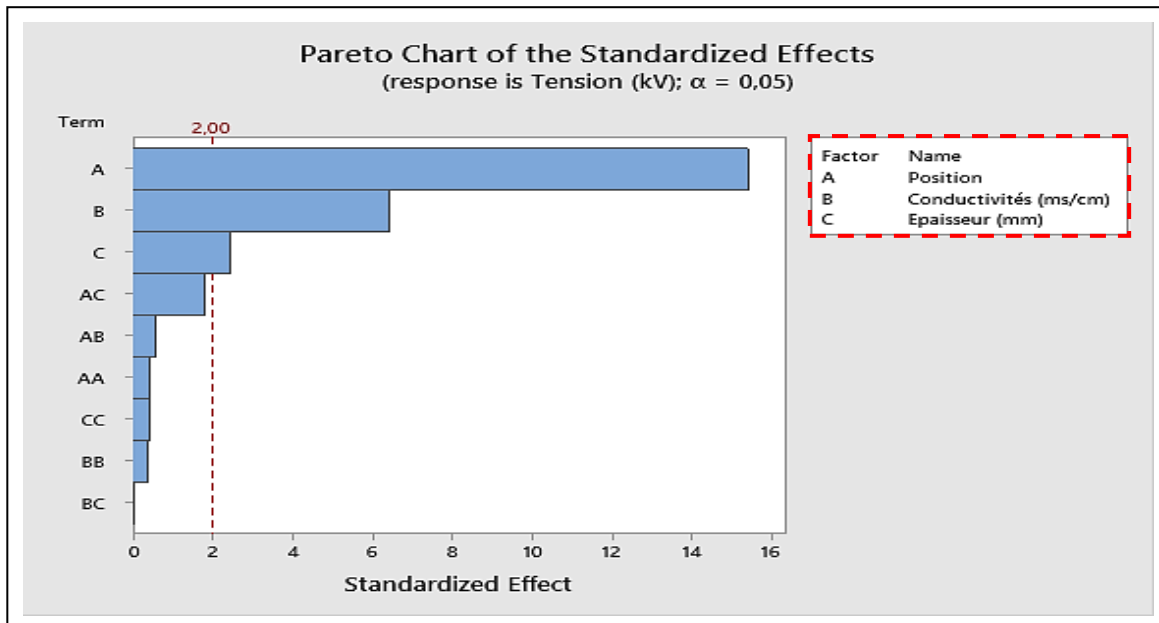


Figure III.8. Diagramme de Pareto des effets normalisés.

III.7.2 Diagramme des effets principaux

Le graphique des effets principaux illustré à la Figure III.9 montre comment chaque facteur affecte les caractéristiques de réponse (position de la barrière (P), conductivité (δ), épaisseur de la barrière (E)).

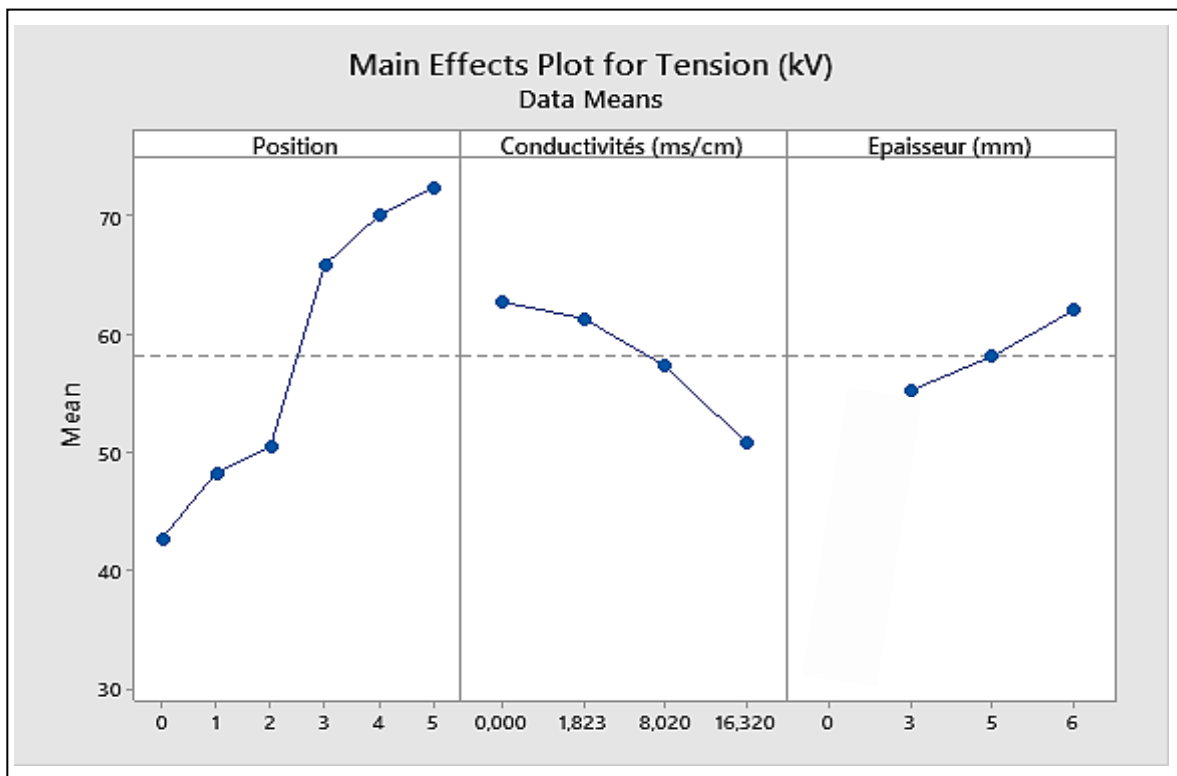


Figure III.9. Diagramme des effets principaux sur la tension.

Un effet principal se produit lorsque différents niveaux d'un facteur affectent différemment une caractéristique. Pour les facteurs à deux niveaux, vous pouvez constater qu'un niveau augmente la moyenne plus que l'autre. Cette différence est le principal effet. Parmi ces résultats, le graphique des effets principaux pour la tension de claquage montre que l'emplacement a le plus grand impact sur la tension de claquage. En moyenne, les essais expérimentaux aux positions 60, 80 et 100 % avaient des tensions de claquage plus élevées que les essais expérimentaux aux positions 0, 20 et 40 %. La conductivité de l'épaisseur a également un effet sur la tension de claquage.

III.7.3 Equation du modèle mathématique

Ce modèle permet de prédire la valeur de tension de claquage en fonction de la variation des facteurs (position, épaisseur, conductivité). Ce modèle est jugé représentatif des résultats expérimentaux puisque le coefficient de détermination est proche de l'unité.

Regression Equation in Uncoded Units

$$\begin{aligned}
 \text{Tension (kV)} = & 33,90 + 8,87 \text{ Position} - 0,823 \text{ Conductivités (ms/cm)} + 2,21 \text{ Epaisseur (mm)} - \\
 & 0,084 \text{ Position*Position} \\
 & + 0,0063 \text{ Conductivités (ms/cm)*Conductivités (ms/cm)} \\
 & + 0,118 \text{ Epaisseur (mm)*Epaisseur (mm)} - \\
 & 0,0246 \text{ Position*Conductivités (ms/cm)} \\
 & - 0,393 \text{ Position*Epaisseur (mm)} \\
 & - 0,0027 \text{ Conductivités (ms/cm)*Epaisseur (mm)}
 \end{aligned}$$

III.7.4. Effet des interactions d'entrées (P, E et δ) sur la réponse (V(kV))

L'équation précédente montre la relation entre les paramètres d'entrée et les réponses. Après avoir généré ces équations, des tracés de surface et des tracés de contour sont générés dans MINITAB. Ces tracés montrent les variations des réponses lorsque les paramètres d'entrée varient.

Dans le contour de la Figure III.10, on comprend clairement que lorsque la position est minimisée, la tension de claquage sera minimisée et vice versa. La tension de claquage est maximale lorsque la position de la barrière est maximale et la conductivité est minimale. Comme le montrent ces figures (III.10(a) et (b)), la tension de claquage est fortement affectée par la position de la barrière.

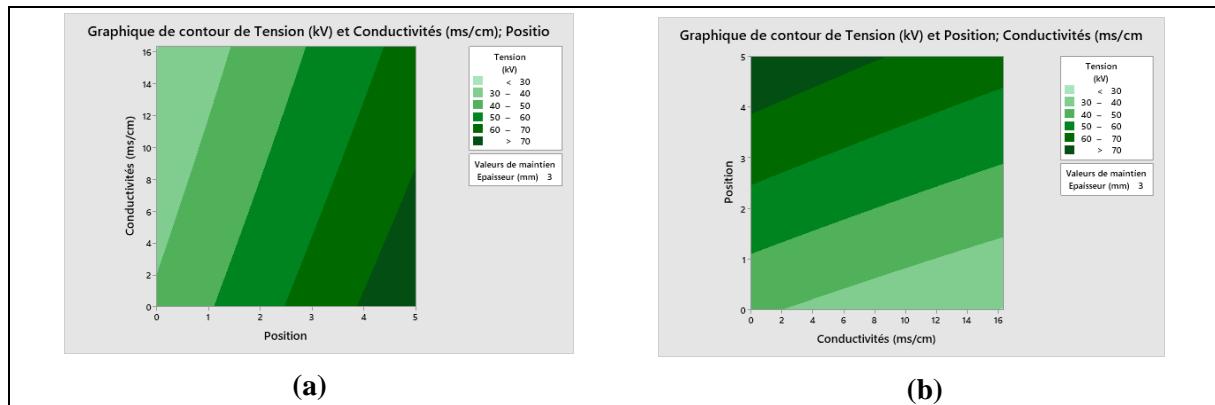


Figure III.10. Contour plot 2D de la tension de claquage, avec épaisseur fixe de la barrière.

- (a) Vs la conductivité, position de la barrière
- (b) Vs la position de la barrière, la conductivité,

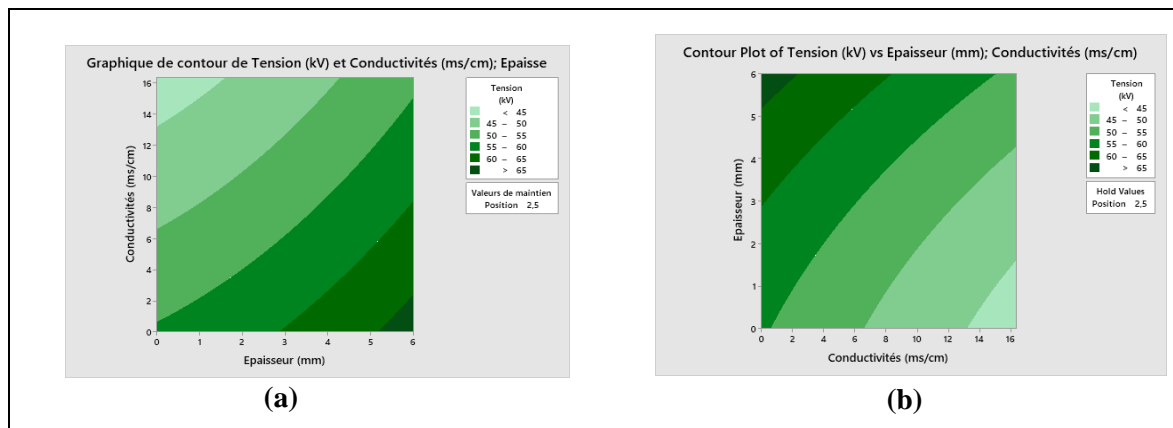


Figure III.11. Contour plot 2D de la tension de claquage, avec position fixe de la barrière.

- (a) Vs la conductivité, épaisseur de la barrière
- (b) Vs épaisseur la barrière, la conductivité,

La figure III.11 montre le contour 2D de la tension de claquage en fonction de la conductivité et de l'épaisseur de la barrière avec une position de barrière fixe. On peut voir que les valeurs de tension de claquage les plus élevées se trouvent dans le coin supérieur gauche de la figure (III.11.b), correspondant à des valeurs élevées à la fois pour la conductivité et l'épaisseur.

La tension de claquage la plus basse est située dans le coin inférieur droit du graphique, correspondant aux valeurs de conductivité et d'épaisseur les plus faibles. Le troisième indicateur (niveau barrière) n'apparaît pas dans le graphique.

Minitab maintient la valeur de position à 2,5 pour calculer la réponse de tension de claquage ajustée.

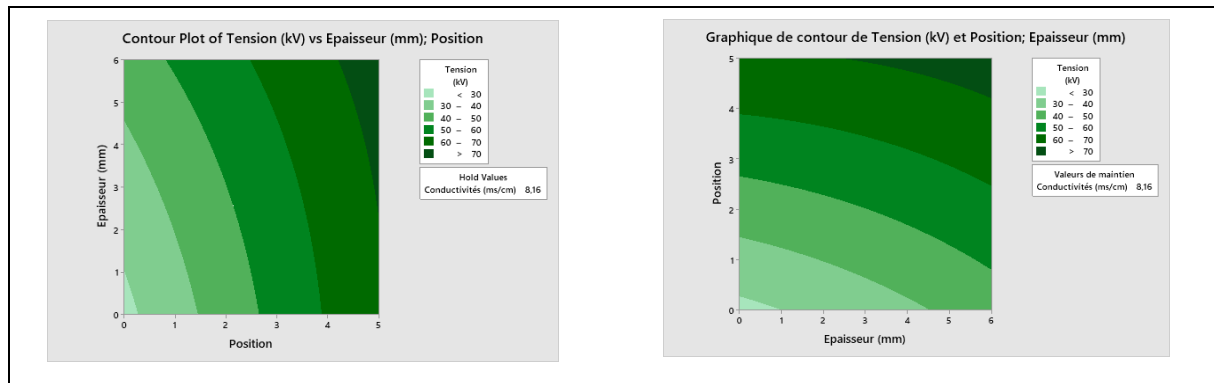


Figure III.12. Contour plot 2D de la tension de claquage, avec conductivité fixe de la barrière.

- (a) Vs épaisseur, position de la barrière
- (b) Vs position la barrière, la conductivité,

Minitab utilise le modèle stocké pour créer le tracé de contour illustre dans la figure III.12. La valeur la plus élevée de la tension de claquage se trouve dans le coin supérieur droit du graphique, correspondant aux valeurs élevées d'emplacement et d'épaisseur. La valeur la plus basse de la tension du flux est située dans le coin inférieur gauche du graphique, correspondant à la valeur basse de la position et de l'épaisseur. Le troisième prédicteur, la conductivité, n'apparaît pas dans le graphique. Minitab maintient la valeur de conductivité à environ 8 lors du calcul de la réponse de tension de claquage ajustée. Si vous modifiez cette valeur de maintien, les contours changeront également, parfois de manière drastique.

Remarque

Pour annoter les valeurs des prédicteurs et les réponses pour n'importe quel point de ce contour, utilisez Plant Flag. Pour planter un drapeau, cliquez avec le bouton droit sur le tracé, choisissez Planter un drapeau dans le menu qui s'affiche, puis cliquez sur le point du contour que vous souhaitez annoter. Utilisez Predict pour déterminer si ces points sont inhabituels et pour évaluer la précision des prédictions.

III.8. Analyse

Une fois le modèle créé dans minitab, un test est effectué pour vérifier la qualité de prédiction du modèle neuronal, en calculant la sortie correspondante en lui montrant un nouvel ensemble d'apprentissage de 3*15 entrées (P,δ,E) qui ne font pas partie de le modèle. La tension de claquage "V" (kV) prédite par notre modèle est présentée dans le tableau III.2.

Ce tableau contient des prédictions à l'aide de Minitab pour différentes configurations de position, conductivité et d'épaisseur de barrière. Ces résultats sont comparés à des résultats expérimentaux recueillis dans la littérature et seront également mentionnés dans le même tableau comme référence pour juger des performances de la méthode de simulation utilisée dans ce travail.

Il est à noter qu'il ressort du tableau ci-dessus que les pourcentages prédits varient d'une étape de la décharge à une autre. Le taux de précision de la prédiction est très élevé et l'erreur de prédiction moyenne globale est très faible, pas plus de 5 %.

Tableau III.2. Données expérimentales collectées et résultats de prédiction.

N° test	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
V_exp (kV)	31,500	46,680	49,392	50,904	39,480	45,360	49,560	37,800	43,008	46,368	33,768	39,144	42,000	52,080	56,280
V_pred (kV)	33,9043	41,5892	47,8922	51,3977	40,0960	46,3893	49,8900	35,3343	41,5948	45,0790	29,7177	35,9341	39,3963	49,1966	54,7144
Erreur_Moy (%)	4.92														

Les résultats obtenus peuvent maintenant être tracés pour comparer la réponse mesurée avec la réponse prédite. Pour cela, il est nécessaire de tracer l'ajustement du modèle illustré dans la figure III.13. Les réponses mesurées sont placées en abscisse et les réponses estimées sont placées en ordonnée ainsi les points du nuage sont alignés sur la ligne $y = x$, ce qui signifie que la précision du modèle est bonne.

La Figure III.14 présente les résultats numériques des courbes de tension de claquage prédites, superposés aux résultats expérimentaux dans le second canal. Les directions considérées constituent le nombre d'essais. En revanche, d'après ces résultats, les courbes des résultats expérimentaux et numériques ont une allure similaire dans tous les domaines, avec un écart de 5% entre eux. La validité de la méthode numérique est donc confirmée par ce bon accord.

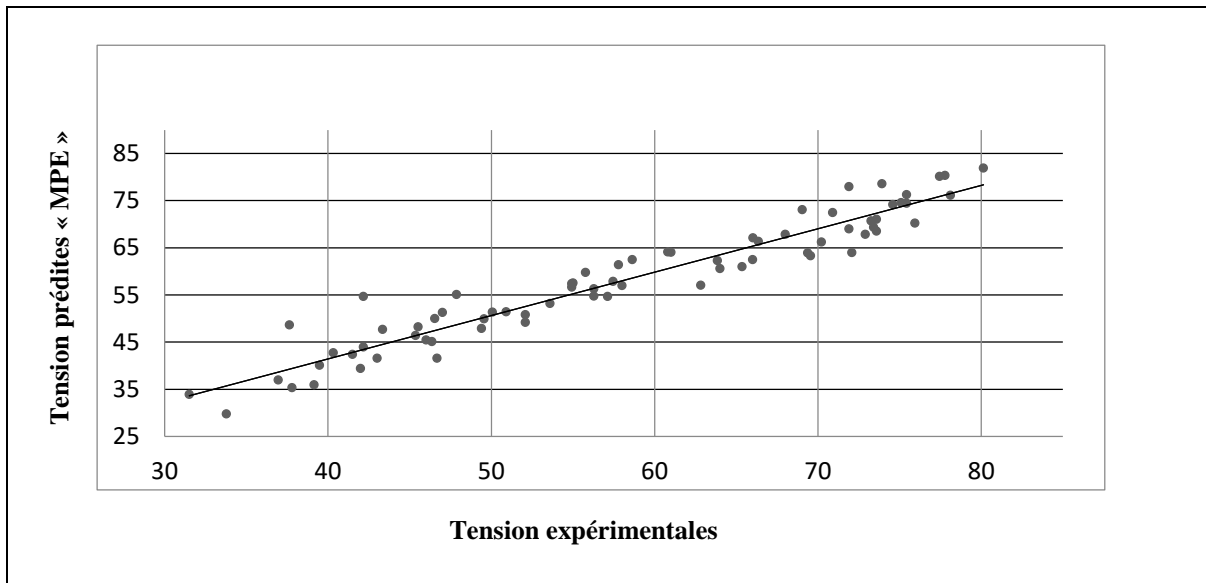


Figure III.13. Tension prédites vs Tension expérimentales.

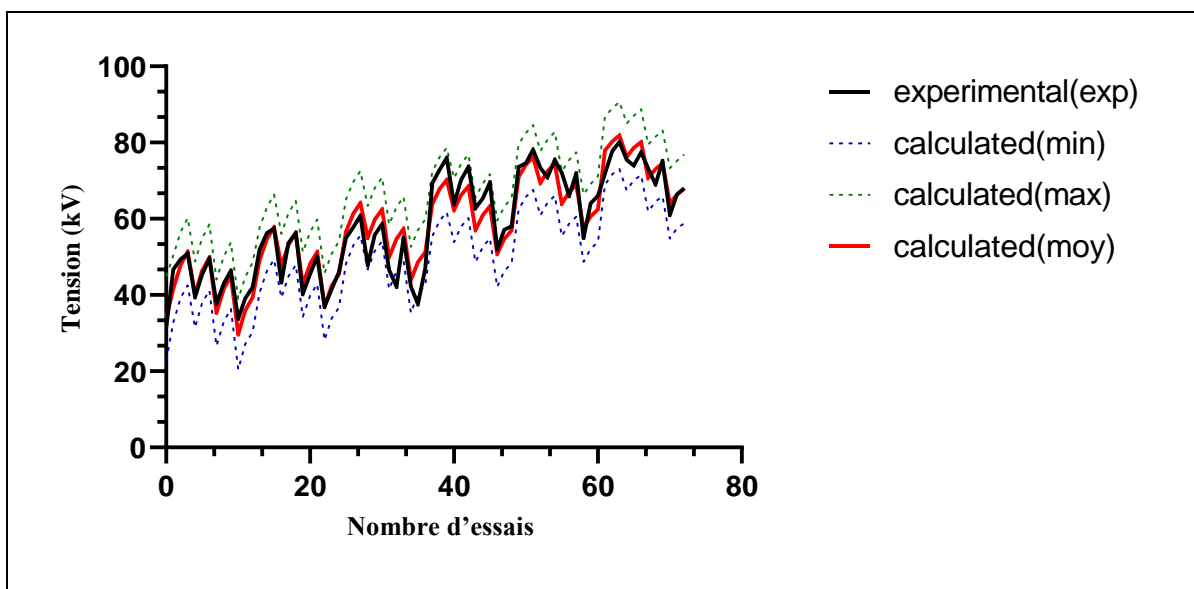


Figure III.14. Comparaison des tensions prédites et expérimentales.

III.8.1 Essais sans barrière

Les résultats utilisés dans ce mémoire sont tirés d'un précédent mémoire d'un ingénieur d'état. [56]

Nous utilisons ces résultats pour les comparer aux résultats avec barrière afin de comprendre l'effet de différents paramètres sur la tension de claquage des systèmes avec barrière. Toujours dans le cas sans barrière, le type de décharge est direct. (Figure I.4).

III.8.2 Effet de la distance inter-électrodes

Les tests ont porté sur différentes distances de la barrière inter-électrodes (1, 2, 3, 4 et 5 cm). On peut voir qu'une augmentation de la distance entre les électrodes entraîne une augmentation de la tension de claquage (voir la Figure I.5 du Chapitre I.5). A partir de ces résultats, il peut être confirmé que les résultats obtenus sont cohérents avec les travaux antérieurs.[13][57]

III.8.3 Effet de l'insertion de la barrière

Pour étudier l'effet de l'insertion de la barrière déjà mentionnée dans la section théorique, nous avons comparé la tension de claquage de chaque système (avec et sans la barrière).

Pour le système de barrière, nous avons utilisé trois barrières en verre de 3,5, 6 mm d'épaisseur.

D'après les résultats obtenus sur la figure III.15, nous avons constaté que la barrière isolante augmente significativement la tension de claquage.

Une augmentation significative de la tension de claquage signifie une augmentation de la rigidité diélectrique.

Le système est donc relativement rigide. D'autre part, la présence d'une barrière crée un espace entre la barrière et le plan, où le champ est homogène (uniforme), ainsi, en présence d'un obstacle (barrière), le système se compose de deux sous l'un pointe - barrière et l'autre barrière – plan. [57]

Lorsque la barrière est proche de l'électrode de pointe, la tension de claquage de l'intervalle pointe-barrière-plan augmente de manière significative.

Dans ce cas, la résistivité de la barrière change du fait de la conductivité électrique de la barrière résultant du dépôt de charges et de la décharge qui se produit près de sa surface.

Au fur et à mesure que la barrière se rapproche de la pointe, le champ électrique diminue dans le plan, et ce résultat confirme l'hypothèse selon laquelle le champ électrique diminue lors de l'introduction d'une barrière isolante dans un système à pointe plan. [2]

Aussi pour que la barrière se rapproche du plan, la tension de claquage diminue.

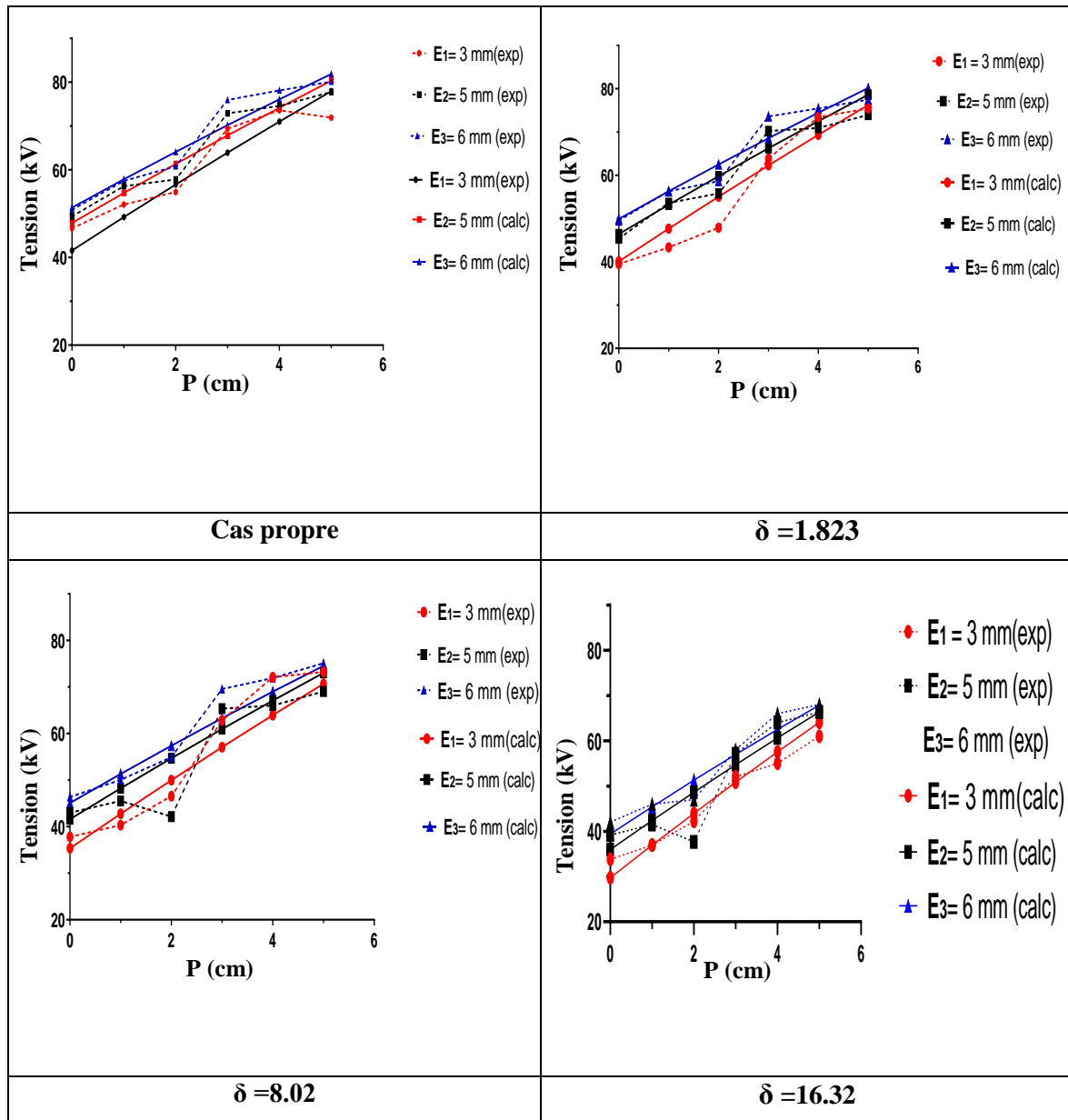


Figure III.15. Influence de la position de la barrière sur la tension de claquage sous différentes épaisseurs et conductivités.

III.8.4 Influence des conductivités superficielles

La figure III.16 montre la tension de claquage en fonction de la conductivité pour différentes positions et épaisseurs de la barrière.

Nous notons qu'avec l'augmentation de la position pour une conductivité donnée, engendre une augmentation de la tension de claquage se produit, ce qui explique que la position de la barrière affecte directement la rigidité du système point-plan, puis l'augmentation de la conductivité de surface de la barrière conduit pour abaisser la tension de claquage.

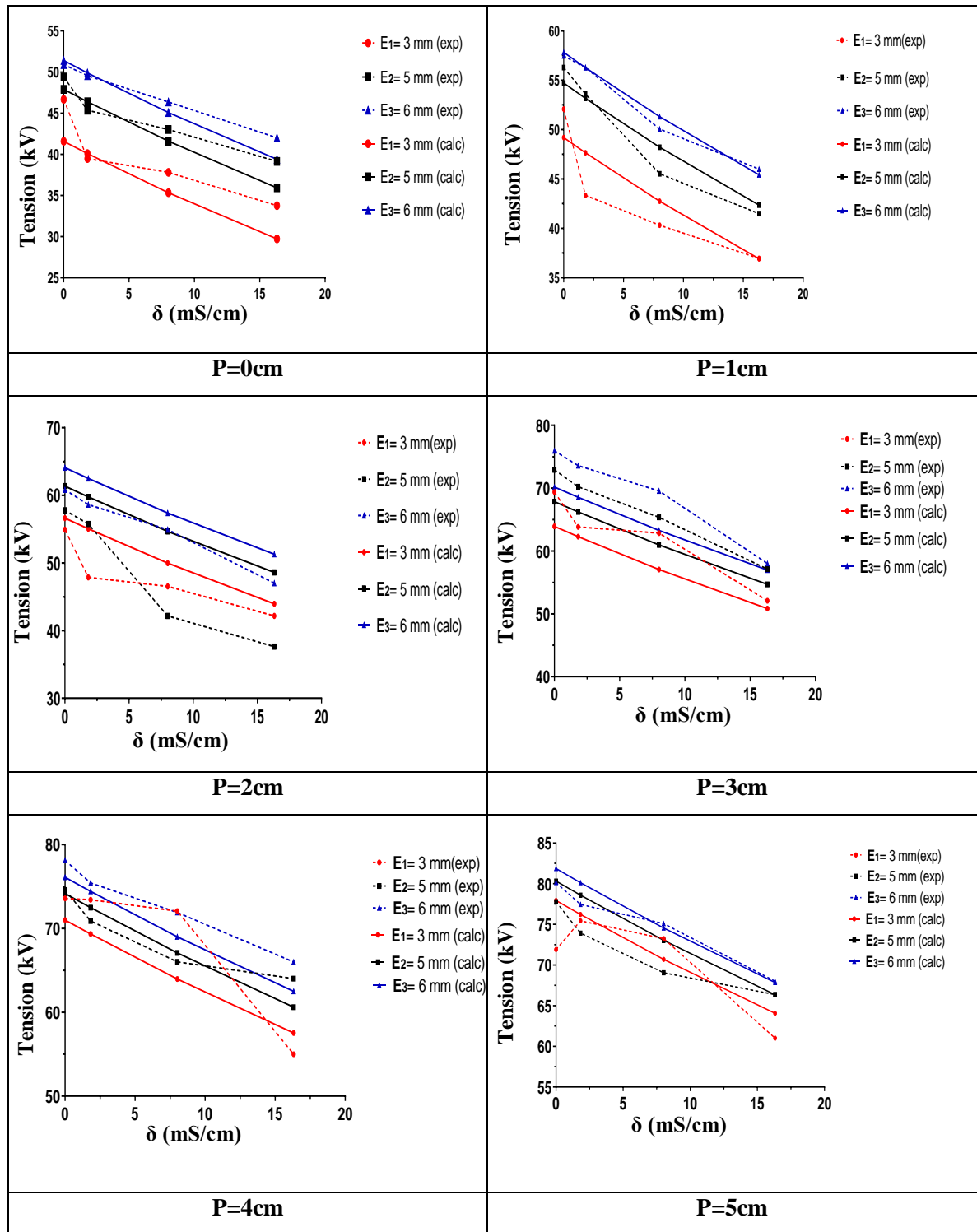


Figure III.16 Influence de la conductivité de la barrière sur la tension de claquage sous différentes épaisseurs et position de la barrière.

III.8.5 Influence des épaisseurs de la barrière

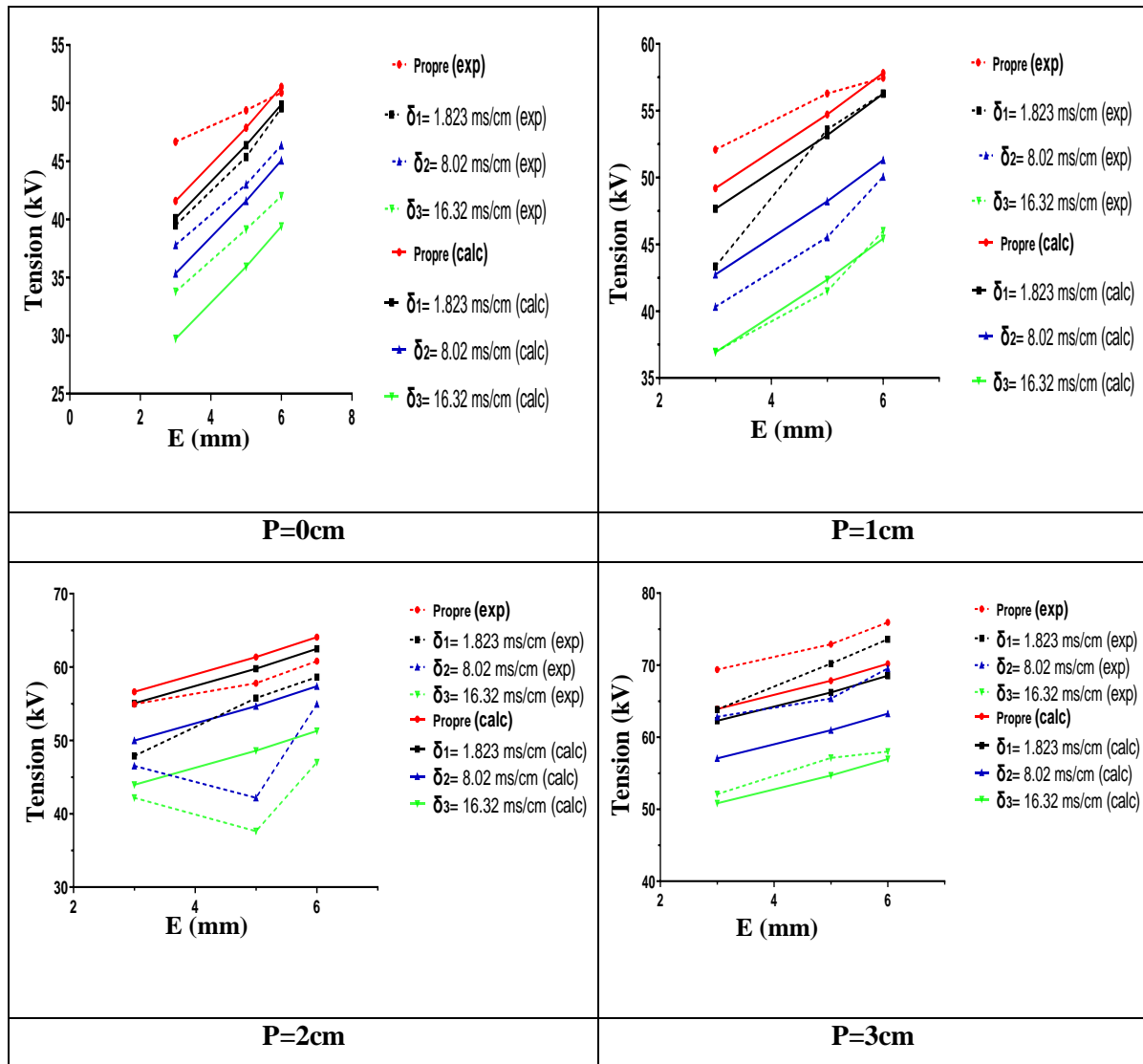
L'objectif principal de nos simulations est de comprendre comment l'épaisseur de la barrière affecte la tension de claquage du système d'isolation.

Le système d'électrodes est toujours le même et la distance inter électrodes est maintenue constante (5 cm).

D'après les résultats donnés ci-dessous (Fig. III.17), généralement, l'épaisseur a une influence sur la distribution des porteurs positifs et sur la chute de tension sur la surface de la barrière.

Lorsque l'épaisseur de la barrière augmente, le champ entre la barrière et le plan devient plus en plus uniforme.

Nous constatons que dans notre cas, l'épaisseur a peu d'effet sur la tension de claquage pour les trois choix d'épaisseur 3,5 et 6 mm. Ce résultat a été confirmé par d'autres chercheurs [13][57], ainsi l'augmentation de l'épaisseur de la barrière entraîne une légère augmentation de la tension de claquage quelle que soit sa localisation entre les électrodes.



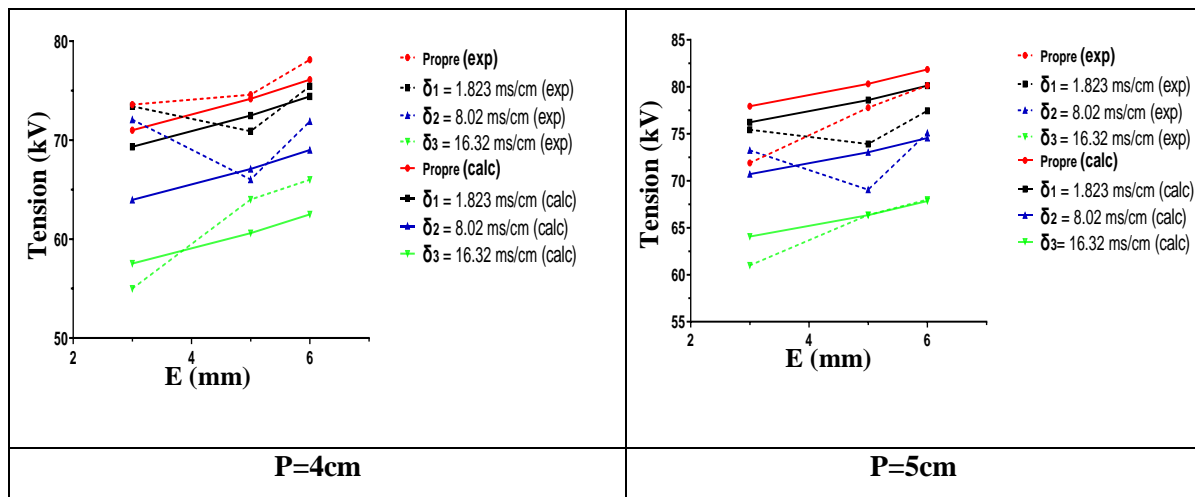


Figure III.17 Influence de l'épaisseur de la barrière sur la tension de claquage sous différentes conductivités et position de la barrière.

III.10. Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons appliqué la méthode de plan d'expérience MPE, pour prédire la tension de claquage. Parmi les avantages de la méthode de conception expérimentale mentionnés dans le chapitre précédent, le fonctionnement de MPE ne nécessite pas l'utilisation de modèles mathématiques très complexes, et le taux d'erreur est très faible, dans notre cas pas plus de 5%. Nos principales conclusions sont les suivantes :

- ✚ La mise en place d'une barrière isolante dans un système à champ non uniforme pour agir comme un obstacle électrique provoquant ainsi l'allongement de la décharge disruptive et par conséquent l'amélioration de la tenue et la rigidité électrique de ce système.
- ✚ L'insertion d'une barrière isolante sur un système point-plan crée une zone entre la barrière et le plan où le champ est uniforme. Par conséquent, un système point-plan dans lequel il y a une barrière se compose de deux sous-systèmes, un point-barrière (plan) et un autre plan-plan. Ce dernier est considéré comme un système plan-plan, qui est le système le plus rigide.

A decorative horizontal scroll-like border with a thin black outline and small circular details at the top and bottom corners, framing the text.

Conclusion générale

Conclusion générale

La recherche de décharge dans les intervalles d'air est un domaine de recherche très actif, tant du point de vue technique du développement et de l'utilisation, que du point de vue de la modélisation et de la simulation. Compte tenu des limites des équipements expérimentaux et des instruments de mesure de laboratoire, l'utilisation d'outils informatiques pour estimer ou prédire la tension de claquage de la configuration pointe-barrière-plan est d'une grande aide dans la recherche. Sans oublier un gain de temps et d'argent.

Le travail présenté dans ce mémoire s'inscrit dans le cadre général de l'analyse et prédiction de la tension de claquage d'un intervalle d'air d'une configuration pointe-plan avec l'insertion d'une barrière propre et polluée sous tension alternative 50 Hz. en utilisant la méthode de plans d'expériences «MPE». Ce travail est divisé en trois parties.

Dans un premier temps, nous approfondissons la définition du phénomène de claquage dans les intervalles d'air.

Deuxièmement, nous proposons une méthode de conception expérimentale pour prédire la tension de claquage de la structure point-plan avec barrière polluée, qui donne de bons résultats en comparant avec les résultats réels donnés dans la littérature. La validité des résultats obtenus montre que la méthode a été appliquée avec succès, et son application dans le domaine de la haute tension, en particulier dans la configuration pointe-barrière-plan, peut apporter une valeur ajoutée à la recherche.

L'insertion d'une barrière isolante dans un système à champ non uniforme agit comme un obstacle électrique provoquant ainsi l'allongement de la décharge disruptive et par conséquent l'amélioration de la tenue et la rigidité électrique de ce système.

La troisième, nous présentons un modèle mathématique à l'aide d'une approche de conception d'expériences. Elle conduit à l'analyse de l'interaction entre différents paramètres : conductivités, épaisseurs et positions de la barrière isolante.

Dans notre cas, la méthode de plan d'expérience a donné de meilleurs résultats avec une erreur d'environ 5 %. Dans cette étude, nous pouvons dire que cette méthode est conçue pour montrer de bonnes performances dans les études analysant différentes phases de décharge de l'intervalle d'air.

Comme perspective, nous proposons d'appliquer une approche de plan d'expérience au phénomène de claquage, en prenant en compte les différents paramètres impliqués dans son initiation et son développement.

A decorative horizontal border with rounded ends and a scroll-like effect on the left and right sides, framing the text.

Références bibliographiques

Références bibliographiques

- [1] **M.A. Benziada, A. Boubakeur, A. Mekhaldi**, "Investigations of Non-uniform Pollution Impact on Electric Field Distribution in a Point-Barrier-Plane Arrangement under AC Voltage". International Conference on Advanced Electrical Engineering (ICAEE), 2019.
- [2] **S. Benharat**, "Etude du comportement de la barrière isolante en vue de son optimisation. Thèse de doctorat en science en électrotechnique, option : système électro-énergétique, 2021.
- [3] **K. Hamour, A.H Chekri**, "Caractérisation des décharges électrique évoluant dans un intervalle d'air pointe – barrière polluée – pointe sous tension continue", Mémoire de Master Académique en électrotechnique, Université de Bejaia, juin 2015.
- [4] **S. Benharat, S. Bouazabia**, "Répartition de champ électrique dans un système pointe-plan avec barrière isolante". In Le 1^{er} Congrès Algérien de Caractérisation, Propriétés et Modélisation de Matériaux et des Matériaux Composite, 2015.
- [5] **N.N. Tikhodeev**, "Effect of an incomplete barrier in electrical discharge-new experiments and advances in theory". Soviet physics-technical physics, 3(2), 385-397, 1958.
- [6] **M.P. Verma**, "Electric field lines of rod-barrier-plane in positive impulse voltage". Wiss. Zeit. der TU Dresden H, 1, 111, 1962.
- [7] **A. Beroual, A. Boubakeur**, "Influence of Barriers on the Lightning and Switching Impulse Strength of Mean Air Gap in Point/Plane Arrangements", IEEE Transaction on Dielectrics and Electrical Insulation, Vol. 26, No. 6, pp. 1130-1139, 1991.
- [8] **M.A. Benziada, A. Boubakeur, A. Mekhaldi**, "Influence of insulating barrier on the electric field distribution in a point-plane air gap using COMSOL Multiphysics", CISTEM 2018, pp. 1-5, 29-31 October, Algiers, Algeria, 2018.
- [9] **A. Boubakeur**, "Influence des barrières sur l'amorçage des moyens intervalles d'air pointe-plan". Rozprawy Elektryczne (Polish Academy of Sciences), 27(3), 729-744, 1981.
- [10] **S. Mouhoubi Née Gherbi**, "Etude de l'influence d'une barrière dans un intervalle pointe-plan, par la mesure de la tension disruptive, du champ électrique et des décharges partielles", Mémoire d'ingénieur d'état, Ecole Nationale Polytechnique, Alger, 2008.
- [11] **C. Yasser**, "Etude de la rigidité diélectrique des intervalles d'air pointe-plan avec les différentes formes de tensions", Mémoire de master, Département de Génie électrique, Université de M'sila, 2017.
- [12] **N. Bouatia, N. Benouaret**, "Recherche de l'équivalence de performance électrique entre deux configurations plan – plan et pointe – pointe avec deux barrières polluées sous tension alternative". Mémoire de master, Département de Génie électrique, Université de Bejaia, 2016.
- [13] **M. Daoudi, Y. Kharchi**, "Prédiction de la tension de claquage d'une configuration pointe-barrière-plan polluée par l'approche basée sur l'intelligence artificielle", Mémoire de master, Département de Génie électrique, Université de M'sila, 2020.
- [14] <https://www.wikipedia.org>
- [15] **P. Moureaux, Jean-Louis Poyard**, "INRS Phénomènes électrostatiques Risques associés et prévention". L'Institut national de recherche et de sécurité (INRS) Octobre, 2019.
- [16] **A. Boubakeur**, "Phénomène de décharge électrique et Protection primaire", Ecole Nationale Polytechnique, Alger, Département d'Electrotechnique – Laboratoire de Recherche en Electrotechnique, 2014.
- [17] **A. Ouadah**, "Etude de l'influence de l'insertion d'une barrière isolante sur la rigidité diélectrique d'un système d'électrodes pointe-plan (Expérimentale) ", Mémoire de Master Académique en génie électrique, Université de M'sila, juin 2015.
- [18] **J. P. Salanne**, "Contrôle du point de fonctionnement des décharges électriques par l'intermédiaire de leur alimentation" (Thèse de doctorat en Génie électrique), 2005.

- [19] **A.M Pointu, J. Perrin, J. Jolly**, "Plasmas froid de décharge– Applications et diagnostic ", Les techniques de l'ingénieur Dossier D2835 (11/1997).
- [20] **S.Vaquie**, "Arc électrique", Les techniques de l'ingénieur Dossier D2870 -03/1995.
- [21] **A. Zouaghi**, "Etude de l'influence des barrières isolantes sur la tenue diélectrique d'intervalles d'huile en chocs de foudre et en continu", (Thèse de doctorat, Ecully, Ecole centrale de Lyon), 1997.
- [22] **A. Boubakeur**, "Influence des barrières sur la tension de décharge disruptive des moyens intervalles d'air pointe-plan". PhD thesis, 1979.
- [23] **M.V.Scolova, A.N. Zhukov**, "Influence of barrier surface properties on the discharge in a narrow gas gap". Proceedings of 9th ISHVE, Austria, 1-4, 1995.
- [24] **S. Chakravorti, M.C. Siddagangappa**, "Effect of charge accumulation on the electric field distribution along spacer surfaces". (1995).
- [25] **A. Boubakeur**, "Influence d'une barrière isolante sur la rigidité des intervalles d'air PointePlan à 50Hz". Laboratoire de haute tension ENP.
- [26] **R. Deghnoche**, "Etude de l'influence de la barrière isolante sur l'amorçage des intervalles d'air pointe-plan", Mémoire Ingénieur d'Etat en électrotechnique, Université de Biskra, Juin 2007.
- [27] **F. Guerbis, A. Boubakeur, A. Beroual**, "Influence d'une barrière isolante sur la charge de pré claquage de l'huile de transformateur sous tension alternative". In 8^{ème} Conférence Nationale sur la Haute Tension, numéro spécial d'Algerian Journal of Technology, AJOT, pp. 165-169, 2011.
- [28] **François Louvet, Luc Delplanque** " Design of experiments : une approche pragmatique et illustrée : the French touch ", Orléans : Expérimentique, DL 2005 ISBN : 2-9525126-0-4
- [29] **B. Wahdame**, "Analyse et optimisation du fonctionnement de piles à combustible par la méthode des plans d'expériences", Energie électrique. Université de Franche-Comté ; Université de Technologie de Belfort-Montbéliard, 2006. Français. tel-00163317
- [30] **I. Yahiaoui**, "Les plans d'expériences Initiation à la construction et l'analyse des plans factoriels complets à deux niveaux et du plan composite centré", Notes de Cours, Département de Génie des Procédés, Faculté de Technologie, Université de Bejaia, 2015.
- [31] **J. Goupy**. "Les plans d'expériences, Revue Modulad", 2006.
- [32] **A. Fahima, K. Nacira**, "Modélisation du procédé d'adsorption de la tétracycline et de l'amoxicilline par le charbon actif via les plans d'expériences", Mémoire de Master, Université de Bouira, Algérie, 2018.
- [33] **S. Vivier**, "Stratégies d'optimisation par la méthode des Plans d'Expériences, et Application aux dispositifs électrotechniques modélisés par Eléments Finis". Modélisation et simulation. Université des Sciences et Technologie de Lille - Lille I, 2002. Français. fftel-00005822f
- [34] **A. belgharbi, S. Abib**, "Utilisation des plans expérience pour la formulation des pates cimentaires auto-plaçants", Mémoire de Master en Génie Civile, Université de Bouira, Algérie, 2016
- [35] **T. Belkadi, L. Makked**, "Traitement des margines d'olives par co-précipitation en utilisant les plans d'expériences", (Mémoire de Master en Chimie, UMMTO), 2016.
- [36] **R. Linder**, "Les plans d'expériences : un outil indispensable à l'expérimentateur. Presses des Ponts", 2005.
- [37] **F. Saheb, O. Mahdjoub**, "Modélisation de conception de mélange Pour évaluer l'effet de la nature de sable sur les propriétés physico mécaniques de béton", (Mémoire de Master en Génie Civile), 2017.
- [38] **Y. Ait Bahcine**, "Application de la méthodologie des plans d'expérience à la robustesse des méthodes analytiques : Etude de cas hydrochlorothiazide/valsartan et ridogrel", 2018.

- [39] **J. Goupy**, "Plans d'expériences, Ed. Techniques Ingénieur ", 2006.
- [40] **J. Goupy**, "Introduction aux Plans d'expériences", Dunod. Paris, 2001.
- [41] **A. Lahmar, O. Bechelaleg**, "Contribution à l'étude de l'influence de l'anneau de garde sur les performances d'un isolateur composite en utilisant la méthodologie des surfaces de réponse", Mémoire de Master Académique en génie électrique, Université de M'sila, juin 2020.
- [42] **G. Sado, M.C. Sado**, "Les plans d'expériences: de l'expérimentation à l'assurance qualité". Afnor, 2000.
- [43] **L.Makhloof, S. Touazi**, "Modélisation par plans d'expériences d'un réacteur agité ouvert : Application à la cémentation du cuivre sur poudre de zinc", (Mémoire de Magister en Génie Chimique », Université de Bejaïa), 2011.
- [44] **J. Goupy**, "Modélisation par les plans d'expériences, Techniques de l'ingénieur, mesures et contrôles". R 275, 1-23.
- [45] **J. Goupy**, "Les plan d'expérience, revue MODULAD", 2f006, 34, 74-116.
- [46] **O. Diaf**, "Valorisation de la brique de terre comprimée et stabilisée par du ciment et de la chaux", Mémoire de Magister en Génie Civile, Université Mohamed Boudiaf-M'sila), 2018.
- [47] <https://ellistat.com/Les-plans-d-experiences-par-la-methode-Taguchi.pdf>
- [48] **M. Rguig**, "Méthodologie des surfaces de réponse pour l'analyse en fiabilité des plates-formes pétrolières offshore fissurées", (THÈSE DE DOCTORAT en Génie Civile, Université de Nantes Faculté des sciences et des techniques), 2005.
- [49] **H. Benguesmia, B. Bakri, S. Khadar, Y. Bourek**, "Estimation of Flashover Voltage of Polluted Insulator Using Artificial Neural Networks (ANN)", The 4th International Conference on Mechanics and Energy, (ICME2018-063), December 20-22, Hammamet, Tunisia, pp.80, 2018.
- [50] **H. Benguesmia, B. Bakri, S. Khadar, N. M'ziou**, "Flashover voltage prediction of cap and pin insulator using the computational intelligence ", The fifth International Conference on Mechanics and Energy, (ICME2019-057), December 19-21, Monastir, Tunisia, pp.....,2019.
- [51] **H. Benguesmia, B. Bakri, F. Ouagueni, S. Khadar, N. M'ziou**, "Electric Field simulation of the Barrier Effect in Point-Barrier-Plane Air Gaps Using Finite Element Method", 9ème Journées des sciences de l'ingénieur JSI'2020, September 25-27, Sfax, Tunisia, 2020.
- [52] **H. Benguesmia, Y. Kharchi, M. Daoudi, S. Khadar, N. M'ziou**, " Estimation of Breakdown Voltage of Point-Plane in the Presence of Barrier Using Artificial Neural Network (ANN)", 9ème Journées des sciences de l'ingénieur JSI'2020, September 25-27, Sfax, Tunisia, 2020.
- [53] **H. Benguesmia, M. Daoudi, Y. Kharchi, F. Ouagueni, N. M'ziou**, " Numerical Simulation of the Barrier Effect on the Electric Field Distribution in Point-Plane Air Gaps in AC Voltage using COMSOL Multiphysics", 9ème Journées des sciences de l'ingénieur JSI'2020, September 25-27, Sfax, Tunisia, 2020.
- [54] **N. Bouatia, N. Benouaret**, "Recherche de l'équivalence de performance électrique entre deux configurations plan – plan et pointe–pointe avec deux barrières polluées sous tension alternative", Master en électrotechnique, Université de Bejaia, 2016.
- [55] https://elearning.univmsila.dz/moodle/pluginfile.php/122745/mod_resource/content/1/cha pitre%203.pdf
- [56] **A. Bensaci, A. Laggoun**, "L'effet de l'insertion d'une barrière isolante polluée sur la rigidité diélectrique d'un système pointe-plan", Mémoire d'ingénieur d'état en électrotechnique, Dép. Génie électrique, Université de Biskra, juin 2011.

[57] **A. Brahmia, A.B Saci**, "Étude de l'influence de la barrière isolante sur la rigidité diélectrique de l'air", Mémoire d'ingénieur d'état en électrotechnique, Département en Génie électrique, Université de Kasdi Merbah Ouargla, juin 2013.