

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

FACULTE DE TECHNOLOGIES
DEPARTEMENT DE GENIE ELECTRIQUE
N° : RE-.....



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

**Mémoire Présenté pour l'Obtention
du Diplôme de Master Académique**

Par:

- **M'HAMED I Ali**
- **BENSALAHZeyd**

Intitulé

**Approche numérique pour l'analyse du champ et du
potentiel électriques dans une configuration de pointe-
barrière-plan**

Soutenue le : 17/06/2025

Soutenu devant le jury composé de:

Nom et Prénom	Grade	Etablissement	Qualité
Dr. HELLALI Lallouani	MCB	Université de M'sila	Président
Dr. BAKRI Badis	MCA	Université de M'sila	Rapporteur
Dr. BENGUESMIA Hani	Pr	Université de M'sila	Co-Rapporteur
Dr. BELHITECHE El'hadi	MCB	Université de M'sila	Examineur

Année universitaire : 2024/ 2025

Remerciements

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

*Nous remercions particulièrement notre promoteur **Dr. Badis Bakri**, Maître de conférences, à l'université de M'sila, et **Pr. Hani Benguesmia**, Professeur, à l'université de M'sila, pour son dévouement exceptionnel, sa précieuse directive et son suivi constant.*

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

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

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

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

ملخص

يعد فهم توزيع المجال الكهربائي داخل وحول معدات الجهد العالي أمراً أساسياً لتصميم وتشغيل وضمان كفاءة عوازل الجهد العالي. تهدف هذه الدراسة إلى تقييم المتانة العازلية لنظام نقطة-حاجز-مستوى تحت تأثير جهد متناوب. لهذا الغرض، تم تحليل توزيعات الجهد والمجال الكهربائي لكلتا الحالتين (مع الحاجز وبدونه) باستخدام طريقة رقمية. يعتمد نهجنا على محاكاة كهروستاتيكية ثنائية الأبعاد باستخدام طريقة العناصر المحددة (MEF) لدراسة التأثير الكمي للحاجز العازل على توزيعات المجال الكهربائي والجهد في ترتيب عمودي لنقطة-مستوى.

الكلمات المفتاحية: هندسة نقطة-مستوى، حواجز عازلة، مجال كهربائي، طريقة العناصر المحددة.

Résumé

La compréhension de la distribution du champ électrique dans et autour des équipements haute tension est essentielle pour concevoir, exploiter et garantir l'efficacité des isolateurs haute tension. Cette étude a pour objectif d'évaluer la rigidité diélectrique d'un système pointe-barrière-plan soumis à une tension alternative. À cette fin, les distributions de potentiel et de champ électrique sont analysées pour les deux configurations (avec et sans barrière) au moyen d'une méthode numérique. Notre approche utilise des simulations électrostatiques bidimensionnelles par la méthode des éléments finis (MEF) afin d'étudier quantitativement l'impact d'une barrière diélectrique sur les distributions du champ électrique et du potentiel dans un intervalle pointe-plan en configuration verticale.

Mots clés: Géométrie pointe-plan, barrières diélectriques, champ électrique, FEM.



"Liste des Figures & Tableaux"

Liste des Figures & Tableaux

N°	Figures	Pages
Chapitre I : "Claquage des diélectriques solides"		
Fig. I.1.	Rigidité diélectrique	06
Fig. I.2.	Types de décharges partielles	07
Fig. I.3.	Electrode de décharge à barrière diélectrique (DBD) [4]	11
Fig. I.4.	Arrangement (a) pointe-plan, (b) pointe-barrière-plan	12
Fig. I.5.	Décharge directe sans barrière. Laboratoire de haute tension (HT) de l'université de Biskra.	15
Fig. I.6.	Décharge glissante. Laboratoire de HT de l'université de Biskra.	17
Fig. I.7.	Décharge par étape.	17
Chapitre II : "Les décharges dans l'air"		
Fig. II.1.	Schéma de l'avalanche de Townsend.	23
Fig. II.2.	Caractéristique de Townsend.	23
Fig. II.3.	Modélisation de la décharge de Townsend. [8]	25
Fig. II.4.	Courbe de Paschen.	26
Fig. II.5.	Schéma d'une avalanche électronique.	27
Fig. II.6.	Etapas successives de développement du streamer positif. [5]	27
Chapitre III : "Résultats et discussion"		
Fig. III.1.	Arrangement pointe-barrière-plan.	33
Fig. III.2.	Diagramme de résolution des différentes étapes dans Comsolmultiphysics.	36
Fig. III.3.	Configuration pointe-barrière-plan logiciel Comsolmultiphysics dans les deux cas étudiés.	36
Fig. III.4.	Répartition du maillage pour les deux cas : sans et avec barrière.	38
Fig. III.5.	Distribution du potentiel électrique.	39
Fig. III.6.	Potentiel électrique le long de la distance minimale de fuite.	40
Fig. III.7.	Distribution du champ électrique.	41
Fig. III.8.	Champ électrique le long de la distance minimale de fuite.	42

N°	Tableaux	Pages
Chapitre II : "Les décharges dans l'air"		
Tab.II.1.	Caractéristique de la tension de décharge en fonction longueur de l'intervalle pour deux matériaux de la pointe [11].	30



"Sommaire"

Sommaire

Liste des Acronymes et Symboles	ii
Liste des Figures et Tableaux	v
Sommaire	vi
Introduction Générale	02

Chapitre I : "Claquage des diélectriques solides"

I.1.Introduction	05
I.2. Décharges électriques	05
I.3. La rigidité diélectrique d'un matériau isolant	06
I.3.1.Mesure de la rigidité diélectrique	06
I.3.2.Facteurs influençant la rigidité diélectrique	06
I.3.3.Types de rigidité diélectrique	07
I.4. Mécanismes de décharge dans les liquides	07
I.4.1. Claquage Électronique	08
I.4.2. Claquage Thermique	08
I.4.3. Claquage par Arborescence	09
I.5. Facteurs influençant la rigidité diélectrique	09
I.5.1.Tension appliquée	09
I.5.2.Température	09
I.5.3. Présence d'impuretés	09
I.5.4.Géométrie des électrodes	09
I.6. Décharges dans les Configurations Pointe-Plan et Plan-Plan	09
I.7. Processus de décharges électriques dans l'intervalle d'air	10
I.8. Type des intervalle d'air	10
I.8.1. Intervalle d'air pointe-pointe	10
I.8.2. Intervalle d'air plan-plan	11
I.8.3. Intervalle d'air pointe-barrière-plan	11
I.9. Différents régimes de décharge en pointe-Plan	12
I.9.1. En pointe positive	13
I.9.2. En pointe négative	13

I.9.3. En regime alternative	13
I.10. Influence de la barrière isolante sur la tension de décharge	14
I.10.1. Influence de la largeur de la barrière	14
I.10.2. Influence de la pollution	14
I.11. Formes de décharge	15
I.11.1. Décharge directe	15
I.11.2. Décharges glissantes aux interfaces air/solide	16
I.11.3. Décharge par étape	17
I.12. Conclusion	18

Chapitre II : "Les décharges dans l'air"

II.1. Introduction	20
II.2. Phénomènes fondamentaux	20
II.2.1. Théorie cinétique des gaz	20
II.2.2. Phénomène de collision	21
II.3. Mécanismes fondamentaux d'ionisation des gaz	21
II.3.1. Ionisation par collision électronique	21
II.3.2. Ionisation par photons (Photo-ionisation)	21
II.3.3. Ionisation thermique	21
II.3.4. Ionisation par champs intenses (Émission de champ)	21
II.3.5. Processus secondaires	22
II.3.6. Facteurs d'influence	22
II.4. Décharges dans les gaz	22
II.4.1. Mécanisme d'avalanche électronique (décharge de Townsend)	22
II.4.1.1. Modélisation de la décharge de Townsend	24
II.4.1.2. Loi de Paschen	25
II.4.2. Théorie du streamer	26
II.4.2.1. Influence de la distribution du champ électrique appliqué	28
II.4.2.2. Influence du type de tension appliquée	28
II.5. Paramètres influant sur le développement de la décharge	29
II.5.1. Présence des particules conductrices dans l'air	29

II.5.2. Influence du type de matériaux de la pointe	29
II.6. Conclusion	30
Chapitre III: "Résultats et discussion"	
III.1. Introduction	32
III.2. Influence des barrières sur la répartition des lignes de champ électrique	32
III.3. Description du modèle "pointe-barrière-plan"	33
III.4. Simulation du modèle de configuration pointe-barrière-plan	33
III.5. Modèle électrostatique de Comsol Multiphysics	35
III.5.1. Répartition du potentiel électrique	38
III.5.2. Répartition du champ électrique	40
III.6. Conclusion	43
Conclusion générale	45
Références	48



" Introduction générale "

Introduction Générale

Les matériaux ont été un facteur déterminant dans les avancées technologiques des équipements électriques. En génie électrique, les diélectriques jouent un rôle essentiel; ils optimisent les performances des dispositifs tout en assurant la sécurité des personnes et des installations. Parmi eux, l'air est fréquemment utilisé comme isolant unique entre les électrodes dans les applications haute tension.[1]

La présence d'une barrière diélectrique dans l'intervalle d'air joue un rôle crucial : elle influence directement les caractéristiques de la décharge électrique ainsi que son état de propreté. Son effet est principalement dû à l'accumulation de charges sur sa surface, côté électrode active. De ce fait, la barrière limite la propagation de la décharge.[2]

Le domaine d'application des barrières isolantes s'étend à de nombreux secteurs industriels. Dans ces équipements, les faibles espacements d'air entre les parties actives et les éléments métalliques présentent des caractéristiques électriques comparables aux configurations générant des champs non uniformes, notamment les dispositions pointe-pointe et pointe-plan.[3]

De nombreuses recherches, tant expérimentales que numériques, ont été consacrées à l'étude des décharges électriques dans l'air pour différentes géométries.

Plusieurs modèles mathématiques et simulations numériques ont été développés pour analyser ces phénomènes. Parmi les diverses configurations d'électrodes étudiées, les systèmes pointe-plan constituent le cas le plus fréquemment examiné.

Actuellement, plusieurs investigations ont été entreprises pour modéliser numériquement le phénomène de claquage dans un intervalle d'air soumis à un champ électrique non uniforme, avec et sans présence d'une barrière isolante.

Cette recherche vise à modéliser numériquement (via COMSOL Multiphysics) les configurations avec et sans barrière isolante, afin d'en comparer les performances diélectriques.

Ceci explique la structuration de notre présent mémoire comme suit:

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

Le premier chapitre propose une revue bibliographique portant sur les décharges électriques, incluant notamment l'influence des différents paramètres sur la rigidité diélectrique ainsi que les processus de décharge dans les intervalles d'air.

Le dernier chapitre présente une modélisation numérique par la méthode des éléments finis (MEF) d'une géométrie pointe-barrière-plane sous tension alternative. Cette simulation, réalisée à l'aide du logiciel COMSOL Multiphysics®, permet de visualiser et d'analyser les distributions spatiales du potentiel électrique et du champ électrique dans cette configuration.

Le travail est clôturé par une conclusion générale.

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

Chapitre I

"Claquage des diélectriques solides"

I.1. Introduction

Les isolations mixtes, composées d'un diélectrique solide et d'un gaz, présentent un grand intérêt industriel et sont largement utilisées dans les équipements haute et moyenne tension. La rigidité diélectrique de ces structures dépend des propriétés du solide isolant, du type de gaz (ou de mélanges gazeux), ainsi que de la pression et de la température de ce dernier.

Une décharge électrique dans un intervalle d'air implique toujours la présence de charges libres et d'un champ électrique, qui peut être continu, alternatif ou impulsionnel, uniforme ou non. La présence d'une barrière diélectrique dans cet intervalle est un facteur déterminant pour les caractéristiques de la décharge, de même que son état de propreté. Son influence est principalement liée à l'accumulation de charges électriques sur sa surface, du côté de l'électrode active. Ainsi, la barrière constitue à la fois un obstacle mécanique et électrostatique au développement de la décharge. [7]

L'objectif de ce premier chapitre est de présenter une brève analyse des phénomènes physiques fondamentaux intervenant dans l'initiation et le développement d'une décharge électrique à pression atmosphérique.

I.2. Décharges électriques

Le terme "décharge électrique" englobe divers phénomènes physiques. Lorsqu'une tension suffisante est appliquée entre deux électrodes placées dans un gaz - tension capable de rendre ce gaz conducteur - il se produit une décharge électrique (manifestée par le passage d'un courant). Selon l'intensité de cette tension appliquée, le courant traversant le milieu gazeux présente différentes caractéristiques qui permettent de classer la décharge. On distingue généralement trois catégories principales de décharges électriques: [8]

- ❖ **Les décharges naturelles**, qui se produisent spontanément dans l'environnement, comme la foudre avec des distances de rupture pouvant atteindre plusieurs centaines de mètres.
- ❖ **Les décharges artificielles non contrôlées**, observées par exemple dans les postes de transformation au niveau des dispositifs de coupure, avec des distances de rupture de l'ordre de quelques mètres.
- ❖ **Les décharges artificielles contrôlées**, telles que les décharges luminescentes ou les arcs utilisés en soudage.

I.3. La rigidité diélectrique d'un matériau isolant

La rigidité diélectrique représente la valeur maximale du champ électrique qu'un matériau isolant peut supporter avant de subir un claquage (ou perforation électrique), comme illustré sur la figure I.1.

Ce phénomène se produit lorsque l'intensité du champ électrique appliqué dépasse un seuil critique, entraînant une décharge disruptive qui altère définitivement les propriétés isolantes du matériau.

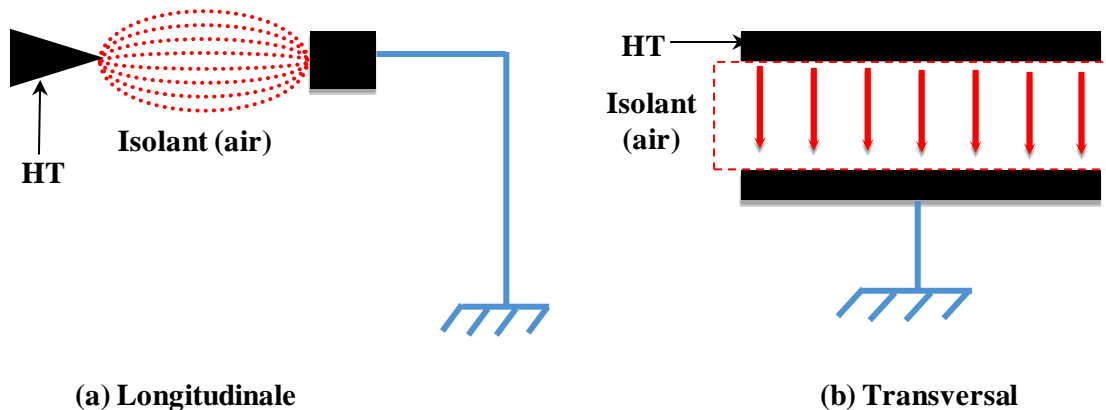


Figure I.1. Rigidité diélectrique

I.3.1. Mesure de la rigidité diélectrique

En pratique, cette propriété est déterminée en divisant la tension de claquage (mesurée dans des conditions d'essai normalisées) par la distance séparant les deux électrodes entre lesquelles la tension est appliquée. Ce rapport, exprimé généralement en **kV/mm** ou **V/ μm** , permet d'évaluer la résistance d'un matériau à la rupture diélectrique.

I.3.2. Facteurs influençant la rigidité diélectrique

Plusieurs paramètres affectent cette caractéristique :

- ✚ **Les conditions électriques** : La fréquence, la forme d'onde (continue, alternative, impulsionnelle) et la durée d'application de la tension jouent un rôle crucial.
- ✚ **L'environnement** : La température, la pression atmosphérique et le taux d'humidité modifient les propriétés isolantes du matériau.
- ✚ **La qualité de l'isolant** : La présence d'impuretés (telles que des bulles d'air, de l'humidité piégée ou des particules conductrices) diminue sa résistance au claquage.

I.3.3. Types de rigidité diélectrique

Selon la disposition des conducteurs et de la surface isolante, on distingue deux configurations principales :

✚ La rigidité diélectrique transversale

Le champ électrique est appliqué perpendiculairement à la surface de l'isolant (cas typique des condensateurs plans). (figure I.1).

✚ La rigidité diélectrique longitudinale

Le champ électrique est parallèle à la surface du matériau (rencontrée dans les câbles haute tension ou les isolateurs en couches). (figure I.1).

Ces distinctions sont essentielles pour concevoir des systèmes électriques fiables, en tenant compte des contraintes mécaniques et électriques subies par les isolants. [9]

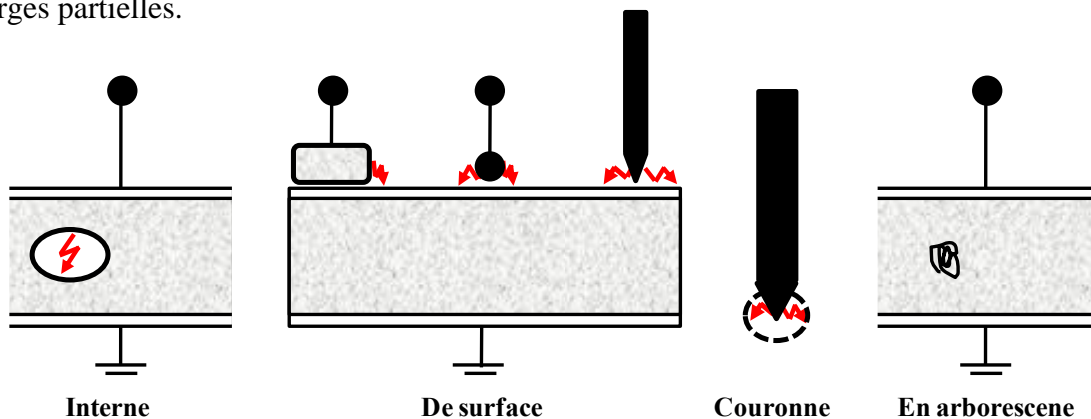
I.4. Mécanismes de décharge dans les liquides

Les décharges électriques dans les isolants liquides peuvent être classées en plusieurs catégories, similaires à celles observées dans les gaz :

✚ Décharges partielles

Les décharges partielles (DP) sont des micro-décharges électriques localisées qui ne provoquent pas de claquage immédiat du matériau isolant, mais entraînent une dégradation progressive de ses propriétés diélectriques.

Ces phénomènes se produisent lorsque le champ électrique local dépasse la rigidité diélectrique d'une zone restreinte du matériau. La figure I.2 présente les différents types de décharges partielles.



I.2. Types de décharges partielles

✚ Décharges de surface

Les décharges de surface (ou décharges superficielles) sont un type particulier de décharges partielles qui se propagent le long de l'interface entre un diélectrique et un conducteur, ou entre deux diélectriques. Contrairement aux décharges internes, elles se développent parallèlement à la surface du matériau isolant.

✚ Claquage total

Le claquage total (ou *rupture diélectrique complète*) dans un liquide est un phénomène électrique où un canal conducteur permanent se forme entre deux électrodes sous l'effet d'un champ électrique suffisamment élevé, entraînant une décharge disruptive brutale (étincelle ou arc électrique). Cette décharge marque la perte totale des propriétés isolantes du liquide sur le trajet du canal.

I.4.1. Claquage Électronique

Le claquage électronique dans les liquides est similaire à celui observé dans les solides. Les électrons, accélérés par un champ électrique intense, acquièrent suffisamment d'énergie pour ioniser les molécules du liquide, créant une cascade d'électrons libres. Ce phénomène est amplifié par la présence d'impuretés ou de bulles de gaz dissous, qui réduisent localement la rigidité diélectrique.

I.4.2. Claquage Thermique

Le claquage thermique dans les liquides résulte d'un échauffement local dû à la conduction électrique. Lorsque le courant traverse le liquide, l'énergie dissipée sous forme de chaleur peut provoquer une vaporisation locale, formant des bulles de gaz. Ces bulles, ayant une rigidité diélectrique inférieure, deviennent des sites privilégiés pour l'initiation de décharges. L'équation suivante décrit l'équilibre énergétique dans ce processus :

$$\sigma E^2 = \rho C_v \left[\frac{dT}{dt} - \text{div}(K \text{grad} T) \right] \quad (\text{I.1})$$

où σ est la conductivité électrique, E le champ électrique, ρ la masse volumique, C_v la capacité thermique massique, K la conductivité thermique, et T la température.

I.4.3. Claquage par Arborescence

L'arborescence électrique, similaire à celle observée dans les solides, se manifeste dans les liquides sous forme de canaux ramifiés (figures de Lichtenberg).

Ces structures se forment à partir de points de forte concentration de champ, comme des électrodes pointues, et se propagent dans le liquide, souvent en suivant les impuretés ou les interfaces. Ce phénomène est particulièrement critique dans les huiles contaminées.

I.5. Facteurs influençant la rigidité diélectrique

La rigidité diélectrique des isolants liquides est influencée par plusieurs paramètres:

I.5.1. Tension appliquée

La fréquence, la forme d'onde (continue, alternative, impulsionnelle) et la vitesse d'application de la tension affectent la probabilité de claquage.

I.5.2. Température

Une augmentation de la température réduit la viscosité du liquide, facilitant la mobilité des charges et diminuant la rigidité diélectrique.

I.5.3. Présence d'impuretés


Les particules solides, l'humidité ou les gaz dissous diminuent la tension de claquage en créant des sites d'initiation de décharges.


I.5.4. Géométrie des électrodes

Les configurations pointe-plan ou pointe-pointe concentrent le champ électrique, favorisant les décharges.

I.6. Décharges dans les Configurations Pointe-Plan et Plan-Plan

Les décharges dans les liquides peuvent être étudiées dans différentes géométries d'électrodes, similaires à celles des gaz:

 **Pointe-Plan**: Le champ électrique intense près de la pointe favorise l'initiation de décharges, souvent sous forme de streamers ou d'arborescences.

 **Plan-Plan** : Les décharges sont plus homogènes, mais des défauts locaux (bulles, impuretés) peuvent déclencher des décharges partielles.

Dans les systèmes avec barrière diélectrique, comme une couche solide immergée dans le liquide, l'accumulation de charges à l'interface modifie la répartition du champ électrique, influençant la tension de décharge.

I.7. Processus de décharges électriques dans l'intervalle d'air

L'air est le principal isolant employé en Haute Tension (lignes et postes). En l'absence de champ électrique, les molécules du gaz sont animées par une agitation thermique et entrent en collision à de multiples reprises.

Ces chocs peuvent être :

- + Elastiques (aucun transfert d'énergie entre les particules en interaction),
- + Ou inélastiques (avec un transfert partiel ou total d'énergie).

Ces collisions sont principalement induites par des facteurs externes, tels que :

- + La radioactivité naturelle (terrestre et atmosphérique),
- + Les rayonnements cosmiques.

Lorsqu'un champ électrique est appliqué, les molécules du gaz s'orientent et se déplacent dans sa direction.

Leur vitesse dépend :

- + De la répartition et de l'intensité du champ,
- + Mais aussi de paramètres comme la pression, la température et l'humidité du gaz.

Les principaux mécanismes à l'origine des décharges disruptives dans l'air sont :

- + Le mécanisme de Townsend,
- + Le mécanisme des streamers (canaux ionisés). [14]

I.8. Type des intervalle d'air

La géométrie des électrodes joue un rôle clé dans les caractéristiques des décharges. On distingue trois configurations types, entraînant des comportements et des usages spécifiques.

I.8.1. Intervalle d'air pointe-pointe

L'emploi d'électrodes pointues est fréquent dans l'étude des décharges électriques, en raison de l'effet de pointe. Ce phénomène génère un champ électrique localement intense au niveau des extrémités et des arêtes métalliques, facilitant ainsi le claquage des gaz.

C'est pourquoi les pointes sont utilisées dans les paratonnerres ou encore dans des dispositifs historiques comme la machine de Watson.

Un autre avantage des pointes est de stabiliser le trajet de la décharge: bien que le chemin entre l'électrode émettrice et la cible ne soit pas nécessairement rectiligne, les points de départ et d'arrivée restent parfaitement définis. Ces décharges se produisent généralement entre deux électrodes métalliques, une configuration rarement employée avec des décharges à barrière diélectrique. [15]

I.8.2. Intervalle d'air plan-plan

Les décharges plan-plan se produisent rarement entre des électrodes métalliques nues. En effet, avec des électrodes planes métalliques, le point d'amorçage et le point d'impact de la décharge sont imprévisibles. Sans traitement spécifique, l'arc électrique n'est pas uniformément réparti sur toute la surface : on observe généralement un seul arc se déplaçant aléatoirement dans l'espace inter-électrodes, ou parfois plusieurs arcs intermittents.

Pour obtenir une décharge homogène, on utilise le plus souvent des électrodes recouvertes d'une couche diélectrique côté décharge (voir figure I.3). Cette configuration permet une répartition uniforme du plasma sur toute la surface plane.

Ces décharges à barrière diélectrique fonctionnent sous des tensions élevées (plusieurs dizaines de kV) et des courants modérés (quelques centaines de mA pour des surfaces d'environ 10 cm²). [16]

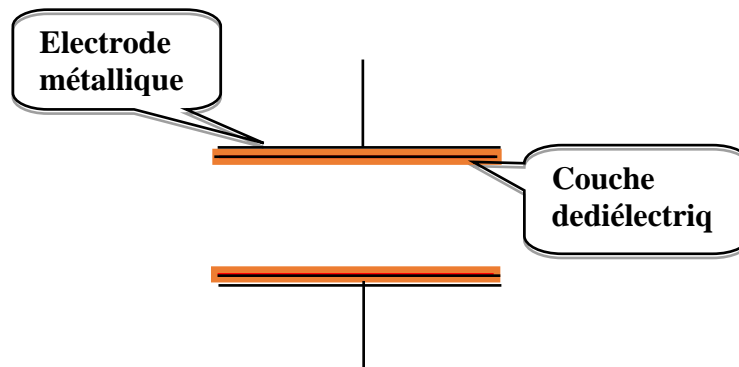


Figure I.3. Electrode de décharge à barrière diélectrique (DBD) [4]

I.8.3. Intervalle d'air pointe-barrière-plan

Ces décharges se caractérisent par un trajet d'arc imprévisible, comme illustré sur la figure I.4. Bien que le point de départ (la pointe) soit connu avec certitude, le point d'impact sur le plan ainsi que le chemin suivi par l'arc restent aléatoires.

✚ **Classification des décharges pointe-plan** : On distingue trois principaux types de décharges pointe-plan aux applications industrielles distinctes :

- ❖ Décharge directe,
- ❖ Décharge par étapes,
- ❖ Décharge glissante.

✚ **Applications industrielles** : Les arcs (transférés ou non transférés) sont largement utilisés en sidérurgie pour générer des gaz à très haute température, nécessitant des courants intenses (plusieurs centaines d'ampères).

✚ **Cas particulier de l'arc transféré** : L'arc transféré, couramment employé en soudage, présente les caractéristiques suivantes :

- ❖ La pointe sert d'électrode manuelle,
- ❖ Le plan correspond à la pièce métallique à souder,
- ❖ Un gaz sous pression peut être utilisé pour protéger la zone de soudure contre l'oxydation, sans modifier fondamentalement le trajet naturel de l'arc entre les électrodes. [13]

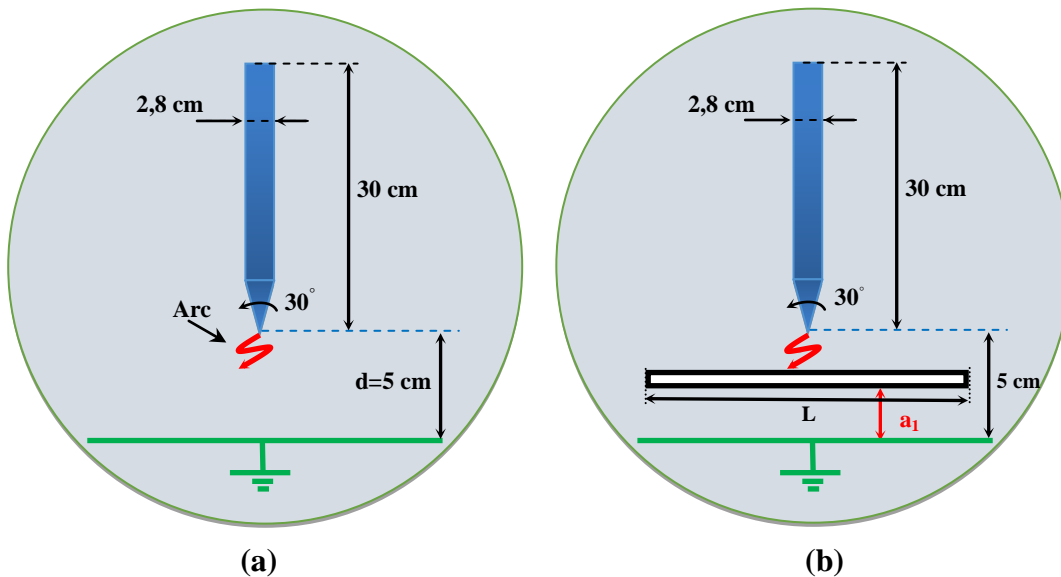


Figure I.4. Arrangement (a) pointe-plan, (b) pointe-barrière-plan

I.9. Différents régimes de décharge en pointe-Plan

Nous allons rappeler ici la séquence des régimes de pré-décharge qui se manifestent entre une électrode pointe et un plan, dans l'air à pression atmosphérique et pour de faibles distances inter-électrodes.

I.9.1. En pointe positive

L'augmentation progressive de la tension dans un dispositif pointe-plan révèle une succession de régimes de décharge caractéristiques. On observe d'abord un faible courant continu (quelques pA) de collection des charges, suivi d'impulsions irrégulières ("burst pulses" et "preonset streamers") résultant d'avalanches électroniques. La zone d'Hermstein présente un courant apparemment continu mais contenant en réalité des impulsions haute fréquence (MHz, $\sim 10\mu\text{A}$). Viennent ensuite les "primary streamers" à fréquence stable (kHz), marquant la fin de la décharge couronne. À plus haute tension apparaissent des "secondary streamers" formant une tache cathodique, puis un arc avorté, suivi d'un arc transitoire (impulsion $>10\text{A}$, 30ns) et enfin un arc silencieux continu. Tous ces régimes maintiennent une composante continue de courant. [14]

I.9.2. En pointe négative

En polarisation négative, la décharge évolue depuis un faible courant de Townsend (pA) vers une couronne pulsée, caractérisée par des micro-décharges (1-100 kHz) alimentées par l'émission électronique de la pointe (effet de champ).

Les streamers négatifs, plus diffus et lents qu'en polarité positive, se propagent vers l'anode plane. La transition vers l'arc, nécessitant une tension plus élevée, forme des spots cathodiques actifs.

Cette configuration, plus stable qu'en pointe positive, est privilégiée pour les applications nécessitant des électrons froids (traitements de surface, métrologie haute tension). Les paramètres exacts dépendent du gaz, de la pression et de la géométrie des électrodes.

I.9.3. En regime alternative

En régime alternatif, la décharge pointe-plan présente une dynamique asymétrique cyclique, alternant entre des mécanismes de pointe positive (streamers rapides et filamenteux) et négative (décharges pulsées plus stables).

Chaque demi-cycle génère des phénomènes caractéristiques : avalanches électroniques durant la phase positive, émission par effet de champ lors de la phase négative.

La fréquence appliquée joue un rôle crucial aux basses fréquences ($<1\text{ kHz}$), les régimes sont similaires au DC, tandis qu'aux hautes fréquences ($>10\text{ kHz}$), les effets d'accumulation de charges spatiales modifient radicalement la morphologie de la décharge.

Ce comportement bipolaire est exploité dans les réacteurs plasma pour le traitement de surfaces et la synthèse de nanomatériaux, où l'alternance des polarités permet un traitement plus homogène.[17,18]

I.10. Influence de la barrière isolante sur la tension de décharge

L'insertion d'une barrière diélectrique entre les électrodes modifie significativement les caractéristiques de décharge. Cette configuration induit deux effets principaux :

❖ Augmentation de la tension de claquage

- ✚ Le diélectrique empêche le passage du courant continu,
- ✚ Nécessite des tensions plus élevées pour initier la décharge,
- ✚ Gain typique de 30 à 50% selon l'épaisseur et la permittivité

❖ Modification des mécanismes de décharge

- ✚ Formation de micro-décharges filamenteuses brèves (~10-100 ns),
- ✚ Accumulation de charges superficielles sur le diélectrique,
- ✚ Auto-extinction systématique du plasma.

I.10.1. Influence de la largeur de la barrière

Lorsque l'épaisseur de la barrière diélectrique est insuffisante par rapport à l'écartement inter-électrodes, la tenue diélectrique du système pointe-barrière-plan devient fonction de la largeur effective du canal de décharge.

Cette dimension caractéristique correspond approximativement à la distance entre la pointe et le bord de la barrière côté plan.

L'optimisation montre que le gain maximal en tension disruptive (claquage) s'obtient lorsque la barrière est positionnée au plus près de l'électrode pointue [21]. Par ailleurs, les régimes de décharge observés sont principalement déterminés par :

- ✚ L'écartement inter-électrodes,
- ✚ L'épaisseur de la barrière diélectrique.

I.10.2. Influence de la pollution

Dans les applications pratiques en air pollué, les dépôts de contamination sur les barrières isolantes forment des couches semi-conductrices superficielles.

Les études montrent que lorsque la conductivité de surface dépasse $1,6 \mu\text{S}$, le comportement électrique se rapproche de celui d'une barrière métallique. [19]

I.11. Formes de décharge

Le mécanisme de décharge est principalement déterminé par le rapport (L/a_1) entre la largeur de la barrière diélectrique (L) et la distance pointe-barrière (a_1). Deux régimes distincts sont observés :

✚ lorsque $L/a_1 < 4$, la décharge se produit selon un mode direct, où le canal ionisé se forme en une seule étape entre les électrodes.

✚ À l'inverse, pour $L/a_1 > 4$, la décharge adopte un mode séquentiel, se propageant progressivement à travers la barrière par étapes successives. Cette transition de comportement révèle l'importance critique des paramètres géométriques dans la formation et la propagation des décharges électriques.

I.11.1. Décharge directe

La décharge directe se caractérise par la formation d'un trajet ionisé suivant la ligne de champ la plus courte entre l'électrode pointue et le plan, comme l'illustre la figure I.5.

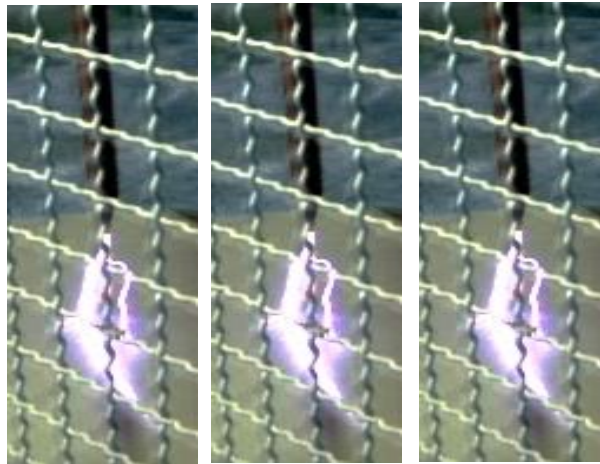


Figure I.5. Décharge directe sans barrière. Laboratoire de haute tension (HT) de l'université de Biskra.

Ce mode de décharge privilégie systématiquement le chemin à la fois le plus direct et de plus faible résistance électrique dans l'espace inter-électrodes. Le canal de plasma ainsi créé présente généralement une morphologie rectiligne ou légèrement incurvée, suivant précisément la

distribution du champ électrique maximal entre les deux électrodes. Ce comportement est typiquement observé dans les configurations où la distance pointe-plan est relativement faible et en l'absence d'obstacles diélectriques significatifs sur le trajet.

Note : Ce régime de décharge est particulièrement important pour comprendre les mécanismes fondamentaux d'amorçage dans les systèmes asymétriques.

Mais avec l'apresence d'une barrière en passant par le bord de la barrière, et l'amorçage se fait en une seule étape, de la pointe vers le plan dans les deux cas suivants: [27]

+ 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.

+ Décharge contourne la barrière

Lorsque la barrière présente une largeur insuffisante, la décharge électrique suit un trajet spécifique; elle part de la pointe, se dirige vers le bord de la barrière, puis rejoint le plan. Cette déviation est causée par des forces électriques répulsives qui modifient le chemin naturel de la décharge. En revanche, pour des barrières plus larges, on observe une décharge directe entre les électrodes. Ce phénomène s'explique par l'influence des forces électrostatiques qui apparaissent à l'interface entre les deux milieux diélectriques (air/barrière). [27]

I.11.2. Décharges glissantes aux interfaces air/solide

Dans les configurations où le matériau diélectrique possède une épaisseur suffisante pour résister au claquage volumique, ou lorsqu'il est employé comme barrière dans un dispositif à décharge gazeuse, on observe un phénomène de contournement de surface. Comme illustré sur la figure I.6, la décharge électrique tend alors à se propager le long de l'interface air-diélectrique plutôt qu'à traverser la barrière. Ce mode de propagation superficielle résulte de la combinaison de plusieurs facteurs :

- + La résistance diélectrique du matériau en volume,
- + Les propriétés de l'interface solide-gaz,
- + La distribution du champ électrique tangentiel

Cette situation est particulièrement critique pour :

- + Les isolateurs de haute tension,
- + Les systèmes de protection électrique,

✚ Les dispositifs à décharge barrière.

Note : Le seuil d'épaisseur critique dépend à la fois des caractéristiques du matériau et des conditions environnementales.



Figure I.6. Décharge glissante. Laboratoire de HT de l'université de Biskra.

I.11.3. Décharge par étape

Le processus de décharge dans les configurations à large barrière diélectrique se décompose en trois phases successives (Figure I.7) :

- ✚ Formation d'une décharge localisée pointe-barrière,
- ✚ Correspond au seuil d'amorçage primaire,
- ✚ Développement de décharges glissantes en surface,
- ✚ Activé à des tensions plus élevées,
- ✚ Phénomène de propagation latérale caractéristique,
- ✚ Établissement du canal conducteur barrière-plan,
- ✚ Complète le trajet de décharge.

La figure I.11 présente des photographies de décharges par étape sous tension alternative (Laboratoire HT de l'université de Biskra).



Figure I.7. Décharge par étape.

I.12. Conclusion

Ce chapitre introductif démontre que l'insertion d'une barrière isolante dans un arrangement pointe-plan modifie significativement la tension disruptive de l'intervalle d'air. Les résultats présentés établissent clairement que la présence de cette barrière augmente la rigidité diélectrique globale du système. Ce renforcement s'explique principalement par une redistribution du champ électrique dans l'espace gazeux, induite par la barrière.

L'ampleur de cette variation dépend de plusieurs paramètres intrinsèques à la barrière:

- ✚ La nature du matériau isolant utilisé,
- ✚ L'état de surface (incluant les dépôts de pollution),
- ✚ La géométrie (forme et dimensions),
- ✚ La position relative par rapport aux électrodes.

Ces facteurs conditionnent l'efficacité de la barrière à modifier le profil du champ électrique, par conséquent, à améliorer la tenue diélectrique du dispositif. L'analyse de ces paramètres constitue un élément clé pour optimiser la conception des systèmes d'isolation haute tension.

Chapitre II

"Les décharges dans l'air"

II.1. Introduction

L'air, principal isolant en haute tension (lignes et postes électriques), fait l'objet d'études cruciales pour optimiser la protection des réseaux énergétiques. Composé de particules en agitation (atomes, molécules, ions, électrons), un gaz subit des collisions aléatoires dues à l'agitation thermique et à des facteurs externes (radioactivité, rayonnements cosmiques). Sous l'effet d'un champ électrique, les molécules s'alignent avec celui-ci, leur vitesse dépendant de l'intensité du champ et des conditions environnementales (pression, température, humidité).

Ce chapitre propose une étude générale des mécanismes de décharge électrique dans les gaz, avec un focus particulier sur l'air.

II.2. Phénomènes fondamentaux

L'étude des décharges électriques dans les gaz, e particulier dans l'air, repose sur plusieurs mécanismes physiques essentiels :

II.2.1. Théorie cinétique des gaz

À l'équilibre thermodynamique et en l'absence de forces externes, un gaz se compose d'un ensemble de particules uniformément distribuées dans l'espace. Leurs vitesses, de directions aléatoires, présentent une distribution isotrope.

L'énergie des particules peut se manifester sous différentes formes :

- **Pour un atome** : énergie cinétique de translation uniquement.
- **Pour une molécule** : énergies supplémentaires de rotation et de vibration internes.

Dans le cas simple d'un atome en translation, son énergie est égale à :

$$\frac{1}{2}mv^2 = \frac{3}{2}KT \quad (\text{II.1})$$

Où : m : est la masse de la particule,

K : est la constante de Boltzmann ($K = 1.38 \cdot 10^{23}$ J/K),

T : est la température thermodynamique,

v : est la vitesse quadratique moyenne de la particule.

II.2.2. Phénomène de collision

Lors de leur mouvement, les particules d'un gaz peuvent entrer en collision lorsque leur rapprochement modifie leurs énergies, tout en conservant l'énergie totale.

On distingue deux types de chocs :

✚ **Élastiques** : seul l'échange d'énergie cinétique de translation se produit, cas majoritaire pour les atomes dans un gaz aux conditions normales. [5]

✚ **Inélastiques** : un transfert d'énergie interne intervient, plus efficace lorsque les masses des particules sont similaires. Dans les décharges gazeuses, seuls les électrons de valence participent à ces collisions, cruciales pour les mécanismes d'ionisation. [8]

II.3. Mécanismes fondamentaux d'ionisation des gaz

L'ionisation d'un gaz résulte de processus physiques clés permettant la création de porteurs de charge (électrons et ions). Les principaux mécanismes incluent :

I.3.1. Ionisation par collision électronique

✚ Un électron accéléré par un champ électrique acquiert suffisamment d'énergie cinétique pour arracher un électron à un atome/molécule neutre.

✚ **Condition** : Énergie de l'électron incident \geq Énergie d'ionisation du gaz (ex. 15,8 eV pour N_2).

✚ **Application** : Principal mécanisme dans les décharges couronne et les avalanches électroniques.

II.3.2. Ionisation par photons (Photo-ionisation)

✚ Absorption d'un photon énergétique (UV, rayon X) par un atome, conduisant à l'éjection d'un électron.

✚ **Loi de Einstein** : $h\nu \geq E_i$ (énergie d'ionisation).

✚ **Rôle**: Entretien des décharges via émission secondaire de rayonnement.

II.3.3. Ionisation thermique

✚ À haute température (plasmas), l'agitation thermique provoque la dissociation des molécules et l'ionisation des atomes.

Exemple : Arcs électriques ($T > 10\,000$ K).

II.3.4. Ionisation par champs intenses (Émission de champ)

✚ Sous un champ électrique très élevé ($\sim 10^9$ V/m), les électrons sont extraits directement des atomes par effet tunnel quantique.

✚ **Application** : Déclenchement des décharges dans les gaz denses.

II.3.5. Processus secondaires

- ✚ **Émission électronique:** Libération d'électrons par impact sur les cathodes (métaux).
- ✚ **Recombinaison :** Neutralisation des ions et électrons (rayonnement ou chocs à 3 corps).

II.3.6. Facteurs d'influence

- ✚ Pression et température du gaz,
- ✚ Nature du gaz (énergie d'ionisation, section efficace de collision),
- ✚ Géométrie des électrodes et gradient de champ.

Ces mécanismes gouvernent le claquage diélectrique et la formation des plasmas dans les applications HT.

II.4. Décharges dans les gaz

Les décharges gazeuses, résultant de l'ionisation d'un gaz soumis à un champ électrique critique, conduisent à la formation d'un plasma. Leur amorçage repose principalement sur deux mécanismes :

- ✚ L'avalanche électronique (multiplication des charges par ionisation collisionnelle),
- ✚ La propagation de streamers (canaux ionisés guidés par le champ électrique).

II.4.1. Mécanisme d'avalanche électronique (décharge de Townsend)

En l'absence de champ électrique appliqué, un gaz confiné entre deux électrodes peut néanmoins contenir des particules chargées. Ces dernières sont générées soit naturellement (par rayonnement UV ou radioactivité), soit artificiellement (comme lors de l'extraction d'électrons cathodiques par irradiation ultraviolette). [5]

Lorsqu'un champ électrique est appliqué, les électrons libres sont accélérés et acquièrent suffisamment d'énergie pour ioniser les atomes neutres par collision. Les nouveaux électrons ainsi libérés sont à leur tour accélérés par le champ, produisant une cascade ionisante. Ce processus multiplicatif conduit à une augmentation exponentielle du nombre de porteurs de charge, formant ce qu'on appelle une avalanche électronique.

Ce phénomène se caractérise par :

- ✚ Une croissance exponentielle de la densité électronique avec la distance à l'électrode,
- ✚ La création simultanée d'ions positifs,
- ✚ L'établissement final du claquage du gaz (figure II.1).

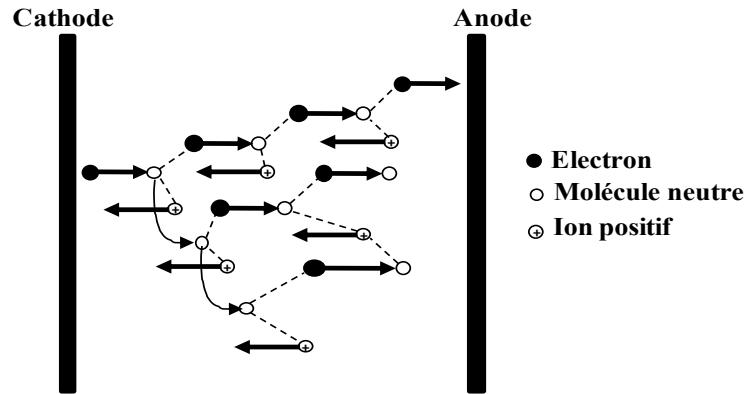


Figure II.1. Schéma de l'avalanche de Townsend.

Cette avalanche peut être étudiée quantitativement à partir de la connaissance du coefficient α , dit premier coefficient d'ionisation de Townsend. α représente le nombre d'électrons (ou d'ions positifs) créés par un électron par élément de longueur le long d'une ligne de force du champ appliqué.[5]

Une expression empirique exploitable considère que l'énergie thermique des électrons est acquise par le travail du champ électrique sur une distance de l'ordre du libre parcours moyen. Or ce dernier est inversement proportionnel à la pression.

Donc, en introduisant les constantes A et B déterminées expérimentalement, on a :

$$\alpha = AP e^{-BP/E} \quad (\text{II.2})$$

P : la pression atmosphérique

E : le champ électrique appliqué

α : le premier coefficient d'ionisation de Townsend

A et B déterminées expérimentalement

L'allure du courant obtenu quand on fait croître la tension est donnée par la figure II.2.

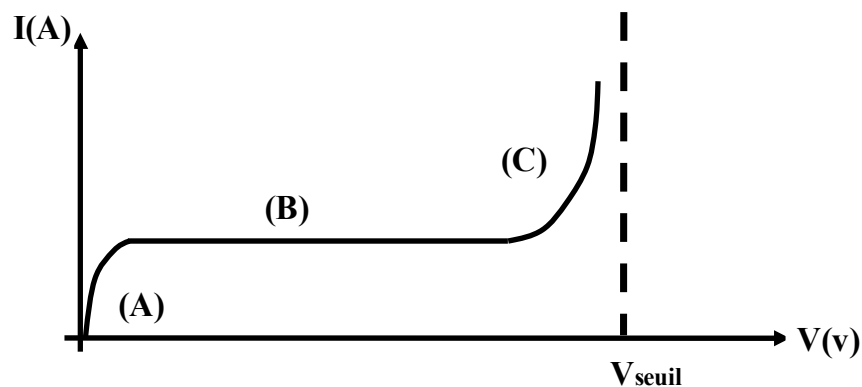


Figure II.2. Caractéristique de Townsend.

La caractéristique courant-tension présente trois régimes distincts :

Zone (A) - Comportement ohmique : Le courant croît linéairement avec la tension, typique d'un gaz faiblement ionisé où la recombinaison domine.

Zone (B) - Saturation : Toutes les charges générées sont collectées par les électrodes, conduisant à un courant constant.

Zone (C) - Amorçage : Au-delà d'une tension seuil (V_{seuil}), le courant augmente brutalement par multiplication électronique (effet d'avalanche), marquant le début de la décharge.

II.4.1.1 Modélisation de la décharge de Townsend

Dans la théorie de Townsend, les ions positifs de l'avalanche électronique vont vers la cathode (électrode négative). Si ces derniers ont une énergie suffisante, ils peuvent arracher des électrons par bombardement de la cathode qui vont venir renforcer l'avalanche. Lorsque l'intensité du champ électrique est suffisante, ce phénomène devient important. L'avalanche s'auto entretient et le claquage se produit même si la tension n'est plus appliquée. On définit le coefficient γ appelé coefficient d'émission secondaire ou second coefficient de Townsend qui représente le nombre d'électrons arrachés à la cathode par un ion positif. Ce coefficient dépend de la nature du matériau constituant la cathode et du gaz.

Le coefficient α de Townsend (premier coefficient d'ionisation) quantifie la création d'électrons secondaires par unité de longueur le long des lignes de champ [8]. Dans un système d'électrodes planes distantes de d , contenant un gaz à pression P (figure II.3), ce coefficient permet d'analyser l'avalanche électronique avant claquage.

A titre d'illustration considérant un système à champ uniforme : deux électrodes plane à une distance d l'une de l'autre contenant un gaz à la pression P avant le claquage figure (II.3).

Le critère de claquage selon Townsend est alors défini comme la tension pour la quelle le courant devient infini. [9]

Le critère de Townsend peut s'interpréter simplement en considérant que représente le nombre d'ions positifs créés par une avalanche primaire à partir d'un seul électron.

Ces ions arrivant vers la cathode vont produire en moyenne $\gamma e^{\alpha d}$ électrons secondaires.

Si $\gamma e^{a.d} < 1$, la décharge est dite «non autonome», car elle ne peut se maintenir d'elle-même par le fait des mécanismes secondaires si l'apport d'électrons créés par une source extérieure est interrompu.

Si $\gamma e^{a.d} = 1$, le nombre d'ions créés par l'avalanche primaire est en moyenne juste suffisant à maintenir par bombardement de la cathode l'avalanche électronique. La décharge est autonome, c'est à dire qu'elle peut se maintenir en l'absence d'une source extérieure de production des décharges. Ce critère définit donc la tension d'amorçage.

Si $\gamma e^{a.d} > 1$, le processus des avalanches successives est cumulatif et le courant de décharge croît d'autant plus rapidement que $\gamma e^{a.d}$ dépasse l'unité. [9]

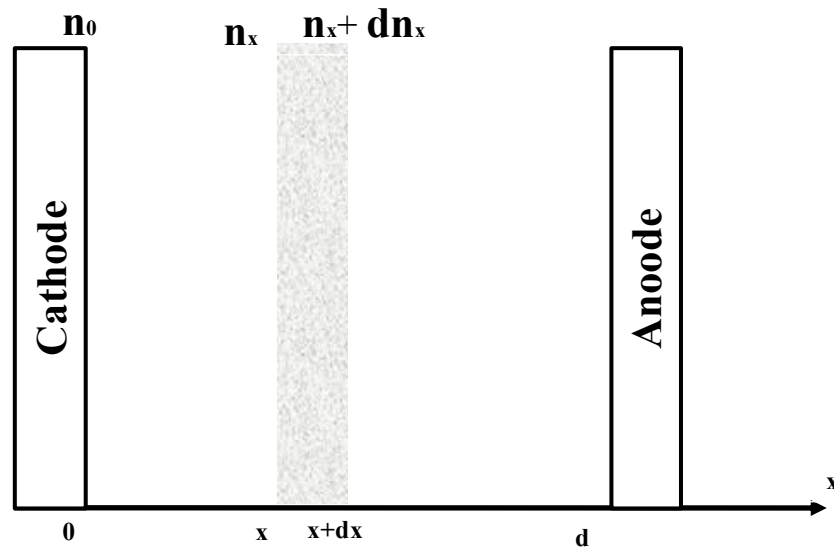


Figure II.3. Modélisation de la décharge de Townsend. [8]

Où :

n_0 : nombre d'électrons/seconde émis de la cathode

n_x : nombre d'électrons à l'abscisse x

dn_x : nombre d'électrons créés à l'abscisse x

Sur un élément de longueur dx , un électron crée $\alpha \cdot dx$ électrons, on écrit :

$$dn_x = \alpha dx \quad (\text{II.3})$$

II.4.1.2. Loi de Paschen

La loi de Paschen décrit la tension de décharge qui varie avec la pression du gaz et la distance d entre les deux électrodes. La loi s'applique uniquement dans le cas

d'un champ électrique uniforme entre les deux électrodes. Dans ce cas $E = V/d$.

On peut déterminer α de manière expérimentale pour obtenir :

$$\alpha = P.A.\exp\left(\frac{-BP}{E}\right) \quad (\text{II.4})$$

Où :

P : est la pression du gaz,

A et B sont des constantes connues.

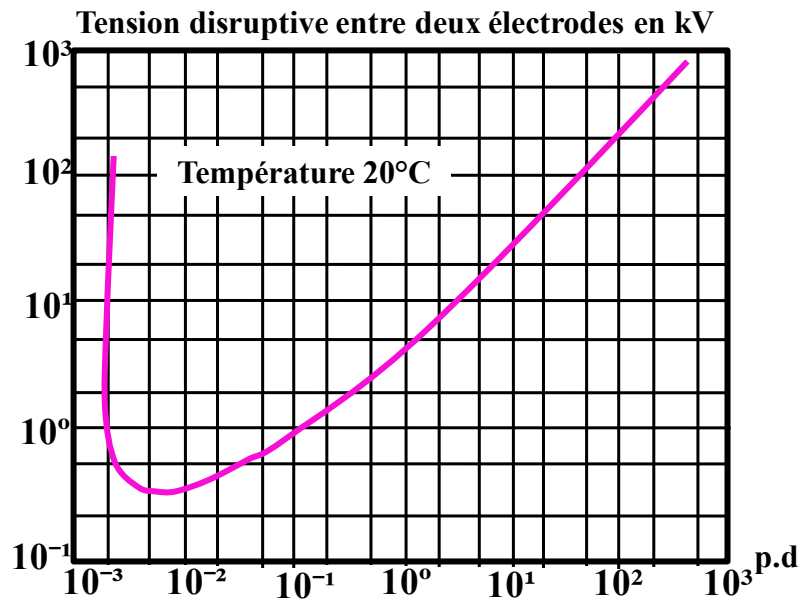


Figure II.4. Courbe de Paschen.

Ces courbes montrent que V_s a un minimum unique, pour une valeur : $pd = (pd)_{min}$.

Si l'on augmente le produit pd , un électron accéléré par le champ électrique aura une probabilité plus grande de rencontrer une molécule du gaz, mais l'énergie moyenne acquise entre deux collisions étant plus faible, la probabilité d'obtenir une collision ionisation diminue, à moins d'augmenter la tension. Si $(pd) < (pd)_{min}$, la tension d'amorçage croît également par diminution du nombre de collisions.

II.4.2 Théorie du streamer

En raison d'une vitesse électronique environ 100 fois supérieure à celle des ions, l'avalanche génère une structure dipolaire caractéristique (figure II.5), composée de :

- ✚ **Une zone anode** fortement peuplée d'électrons rapides,
- ✚ **Une zone cathode** concentrant les ions positifs plus lents.

Cette distribution asymétrique de charges crée :

- ❖ Une perturbation significative du champ électrique initial,
- ❖ Des gradients de potentiel locaux accentués.

Lorsque les densités de charge atteignent un seuil critique, un nouveau phénomène se déclenche : la formation d'un streamer.

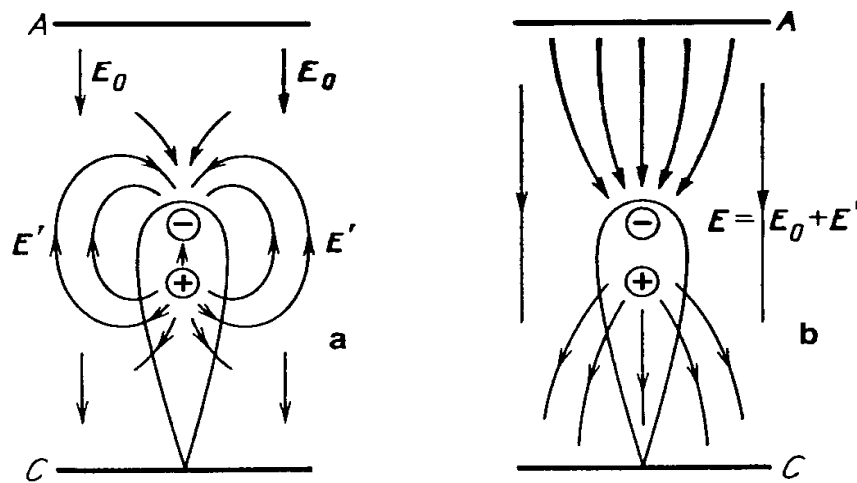


Figure II.5. Schéma d'une avalanche électronique.

✚ Renforcement du champ près de la cathode

La présence d'une charge d'espace positive intensifie localement le champ électrique dans la région cathodique.

✚ Génération d'avalanches secondaires

Ce champ accru provoque :

- ❖ Une production massive d'électrons par photo-ionisation,
- ❖ Le développement d'avalanches secondaires se propageant vers l'avalanche principale.

✚ Neutralisation des charges

Les électrons issus de ces avalanches secondaires viennent compenser la charge d'espace positive (figure II.6), modifiant ainsi la distribution globale du champ.

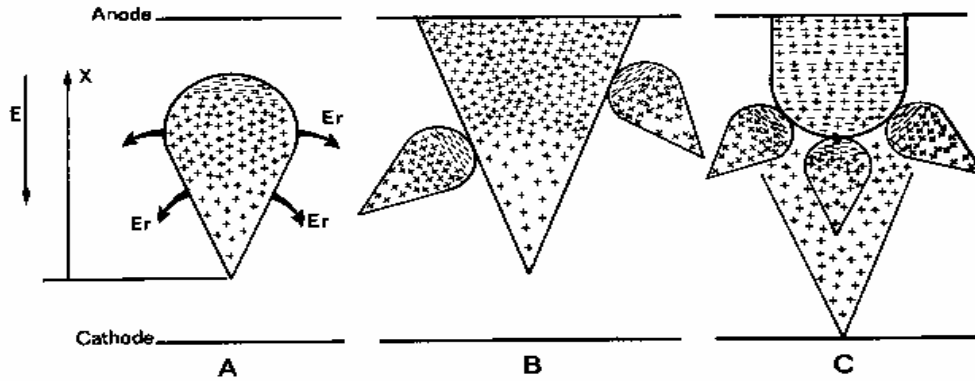


Figure II.6. Etapes successives de développement du streamer positif. [5]

E_r : champ décharge d'espace.

De l'endroit où naissent les avalanches secondaires, de nouvelles "têtes" de charges d'espace positives apparaissent augmentant le champ électrique en aval. Le déclenchement de nouvelles avalanches est encore favorisé vers la cathode. [5]

II.4.2.1. Influence de la distribution du champ électrique appliqué

✚ Cas des électrodes planes parallèles

Le champ électrique uniforme permet :

- ❖ Un développement axial infini du streamer jusqu'à la cathode,
- ❖ Une condition de claquage directement liée au seuil d'apparition du streamer.

✚ Configuration dissymétrique (pointe-plan)

- ❖ Concentration des avalanches dans la zone de champ maximal (voisinage de la pointe)
- ❖ Propagation conditionnelle du streamer :

$$E_{total} = E_{appliqué} + E_{espace} \geq E_{seuil} \quad (II.5)$$

doit maintenir la génération d'avalanches secondaires

✚ Polarité négative particulière

Mécanisme complexe avec :

- ❖ Éloignement des avalanches de la pointe négative,
- ❖ Propagation des streamers vers les zones de faible champ,
- ❖ Phénomène encore imparfaitement modélisé.

II.4.2.2. Influence du type de tension appliquée

L'apparition d'un streamer est directement déterminée par l'intensité du champ électrique dans l'intervalle gazeux (ici l'air), elle-même contrôlée par la tension appliquée.

La forme de cette tension-continue, alternative (50/60 Hz) ou en rampe - influence significativement le processus d'amorçage.

En régime continu, on observe un seuil de tension minimal (V_{ci}) nécessaire à l'initiation du premier streamer. Lorsque cette valeur est atteinte ou dépassée, deux scénarios sont possibles :

- ✚ Si le champ est suffisant, le streamer traverse intégralement l'intervalle, provoquant un claquage complet,
- ✚ Si le champ devient insuffisant, une zone passive se forme près de l'électrode, où :
 - ❖ Le champ local diminue, stoppant l'ionisation,
 - ❖ Les phénomènes de recombinaison et diffusion nettoient progressivement la zone,
 - ❖ Le champ se restaure, permettant un nouveau cycle de décharge.

Ce processus cyclique génère des micro-décharges répétitives (appelées "dards") dont la fréquence dépend de la tension appliquée.

En régime alternatif basse fréquence (50/60 Hz), le mécanisme est similaire mais les streamers se développent radialement autour du conducteur, formant une décharge couronne. Leur répétition à fréquence audible explique le bourdonnement caractéristique des lignes haute tension.

II.5 Paramètres influant sur le développement de la décharge

II.5.1. Présence des particules conductrices dans l'air

La présence de particules conductrices (rayon R , masse m) dans un intervalle pointe-plan :

- ❖ Abaisse le seuil de claquage par concentration du champ,
- ❖ Favorise l'amorçage via des micro-décharges locales,
- ❖ A été quantifiée par Sumuila & Dascalescu [14] pour E_{ni} en corona positive.

II.5.2. Influence du type de matériaux de la pointe

La tension de décharge change en changeant le matériau de la pointe, et on obtient les résultats présentés dans le tableau .II.1.

On observe qu'après 80 décharges la pointe a diminué de 0.07 mm de hauteur. Notons que la chaleur dégagée de l'aluminium est plus élevée que pour les autres matériaux utilisés à cause de la résistivité, qui est plus importante, d'où il subira facilement l'usure (le point d'ébullition est plus faible pour l'aluminium).

Tableau II.1. Caractéristique de la tension de décharge en fonction longueur de l'intervalle pour deux matériaux de la pointe [11].

Longueur de l'intervalle (mm)	Tension de décharge (kV)	
	Aluminium	Acier
10	80.4	83.2
50	291	294
100	569	583

II.6. Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons fait une synthèse sur les phénomènes d'ionisation, et de la physique des décharges électriques dans les gaz.

A decorative horizontal border with a scroll-like appearance on the left and right sides, containing the chapter title.

Chapitre III

"Résultats et discussion"

III.1. Introduction

La modélisation constitue une étape cruciale dans toute simulation numérique. Elle permet, à travers la définition et l'étude des caractéristiques géométriques et physiques du problème considéré, d'élaborer un modèle simplifié qui se rapproche au maximum de la réalité.[Réf]

L'objectif de cette phase de simulation est de calculer la distribution du potentiel électrique et du champ électrique, afin d'évaluer l'effet d'une barrière isolante rectangulaire sur la rigidité diélectrique à une fréquence industrielle de 50 Hz.

Pour notre étude, nous avons utilisé COMSOL, un logiciel moderne basé sur la méthode des éléments finis, pour calculer et visualiser le potentiel électrique ainsi que la distribution du champ électrique dans une configuration pointe-barrière-plan soumise à une tension sinusoïdale.

Dans ce dernier chapitre, nous avons implémenté dans ce logiciel notre modèle avec toutes ses spécifications (formes et nature des électrodes, propriétés et dimensions des matériaux, tension appliquée, conditions aux limites, etc.). Enfin, une interprétation des résultats obtenus est présentée.

III.2. Influence des barrières sur la répartition des lignes de champ électrique

L'air, en tant que milieu diélectrique, est fréquemment employé comme unique isolant entre les électrodes dans les dispositifs haute tension. Ces électrodes peuvent correspondre à des pièces métalliques d'équipements sous tension, à des conducteurs de lignes aériennes ou à des bornes haute tension dans des laboratoires d'essai.

Dans les systèmes d'isolation, l'amélioration de la rigidité diélectrique d'un intervalle air pointe-plan peut être obtenue par l'insertion optimale d'une barrière isolante horizontale.[Réf]

L'augmentation de la rigidité diélectrique d'un intervalle air pointe-plan grâce au positionnement adéquat d'une barrière isolante constitue une solution efficace pour renforcer les performances d'isolation. En effet, l'introduction d'un écran isolant entre les deux électrodes permet de transformer l'intervalle d'air initial en un système stratifié air-barrière, comme illustré à la figure III.1.

L'intervalle barrière-plan présente une distribution quasi uniforme du champ électrique, dont les caractéristiques dépendent principalement des paramètres géométriques de la barrière, notamment sa largeur et sa position relative [10].

III.3. Description du modèle "pointe-barrière-plan"

Pour la configuration expérimentale pointe-barrière-plan, le dispositif comprenait les éléments suivants :

- ✚ Une électrode pointe en cuivre électrolytique de haute pureté, d'une longueur totale de 30 cm et d'un diamètre nominal de 2,8 mm, présentant un profil conique à 30° à son extrémité afin de créer un gradient de champ électrique élevé.
- ✚ Une barrière diélectrique en verre (permittivité relative $\epsilon_r = 4,6$), de largeur constante de 5 cm et d'épaisseur uniforme de 3 mm, choisie pour ses excellentes propriétés isolantes et sa stabilité thermique.
- ✚ Une électrode plane en acier inoxydable, connectée à la terre et polie mécaniquement pour garantir une surface parfaitement plane.
- ✚ Le positionnement relatif de la barrière isolante pouvait être ajusté avec une précision de ± 1 mm, permettant ainsi d'étudier systématiquement l'influence de sa position sur la distribution du champ électrique [11].

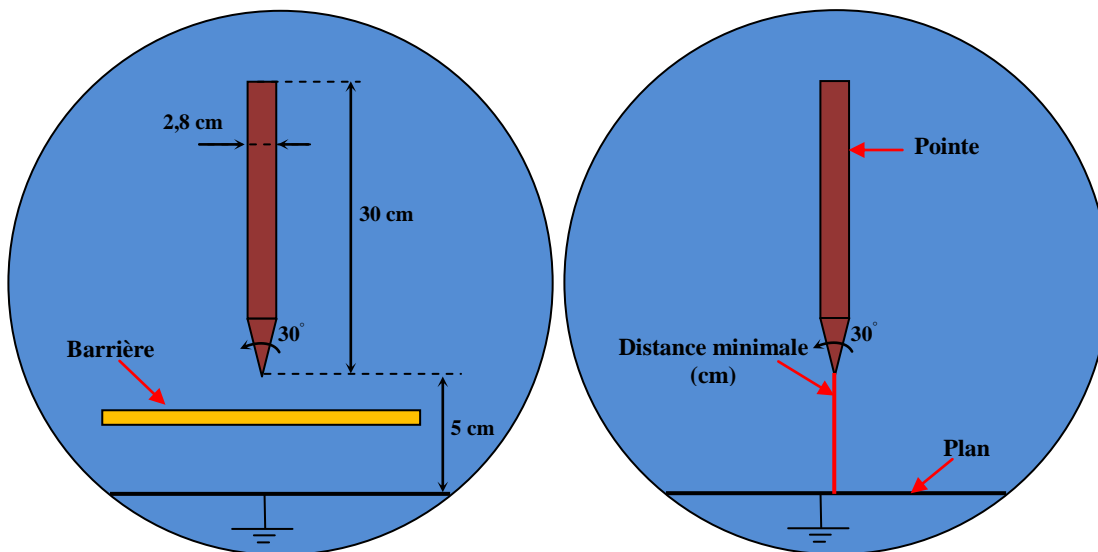


Figure III.1. Arrangement pointe-barrière-plan.

III.4. Simulation du modèle de configuration pointe-barrière-plan

Malgré l'utilisation très répandue de la décharge des systèmes d'électrodes inhomogènes (décharge couronne), il n'y a pas de modèle numérique fiable et précis pour la simulation par ordinateur de ce phénomène.

Bien que les systèmes d'électrodes inhomogènes (à l'origine des décharges couronne) soient largement répandus dans les applications industrielles, il n'existe actuellement aucun modèle numérique fiable permettant de simuler précisément ce phénomène par des méthodes numériques.

Les méthodes numériques actuelles permettent d'estimer avec une approximation acceptable les caractéristiques fondamentales des décharges électriques. Plusieurs approches ont été développées pour résoudre couplage des équations de Poisson et de conservation de la charge.

Dans la littérature, les chercheurs ont exploré différentes configurations géométriques :

- ✚ Systèmes unidimensionnels (1D),
- ✚ Modèles quasi-bidimensionnels (1.5D),
- ✚ Configurations bidimensionnelles (2D),
- ✚ Géométries tridimensionnelles complètes (3D)

Dans notre étude, le calcul du champ électrique a été réalisé à l'aide du logiciel COMSOL Multiphysics. L'implémentation numérique a consisté à :

✚ Définition géométrique

- Construction de la géométrie dans AutoCAD,
- Sélection du mode d'analyse électrostatique.

✚ Caractérisation des matériaux

- Attribution des propriétés diélectriques à chaque composant,
- Définition des permittivités relatives pour tous les domaines.

✚ Conditions aux limites

- Imposition des potentiels électriques sur les électrodes,
- Délimitation des frontières d'isolation où le champ électrique est considéré nul.

✚ Résolution numérique

- Application de la méthode des éléments finis,
- Paramétrage des solveurs.

✚ Post-traitement

- Visualisation et analyse des résultats.

La simulation numérique a été réalisée à l'aide du logiciel COMSOL Multiphysics® en modélisation bidimensionnelle (2D), en s'appuyant sur la méthode des éléments finis (MEF).

La figure III.2 illustre le schéma de résolution numérique mettant en évidence les différentes étapes de calcul implémentées dans l'environnement COMSOL Multiphysics®.

III.5. Modèle électrostatique de Comsol Multiphysics

Le champ électrique est généré par une distribution stationnaire de charges électriques, dont l'intensité et la configuration spatiale restent constantes dans le temps. Cette situation électrostatique est décrite par les équations fondamentales suivantes :

Loi de gauss :

$$\nabla E = \frac{\rho}{\varepsilon_0} \quad (\text{III.1})$$

Nature conservative:

$$\nabla \times E = 0 \quad (\text{III.2})$$

Relation champ-potentiel

$$E = -\nabla V \quad (\text{III.3})$$

L'équation (III.3) introduit le potentiel électrique scalaire V , conduisant à la formulation potentielle :

$$\nabla^2 V = -\frac{\rho}{\varepsilon_0} \quad (\text{III.4})$$

Concernant les conditions d'interface entre les différents milieux, deux approches sont généralement considérées :

- ✚ Le potentiel électrique est imposé sur les frontières (condition de Dirichlet),
- ✚ Les lignes équipotentielles sont supposées orthogonales aux limites, ce qui correspond à une dérivée normale nulle du potentiel (condition de Neumann).

Pour notre étude, nous avons retenu une configuration bidimensionnelle pointe-barrière-plan, composée de trois éléments distincts aux propriétés diélectriques différentes :

- L'électrode pointe (conductrice),
- La barrière isolante,
- Le plan de masse.

L'air environnant, caractérisé par une permittivité relative $\varepsilon_r = 1,0005$, constitue le milieu diélectrique principal. Une tension de 10 kV a été appliquée à l'électrode active, cette valeur étant maintenue constante pour les deux configurations étudiées (avec et sans barrière isolante).

La méthodologie de simulation implémentée dans COMSOL Multiphysics® est schématisée dans l'organigramme présenté en figure III.2.

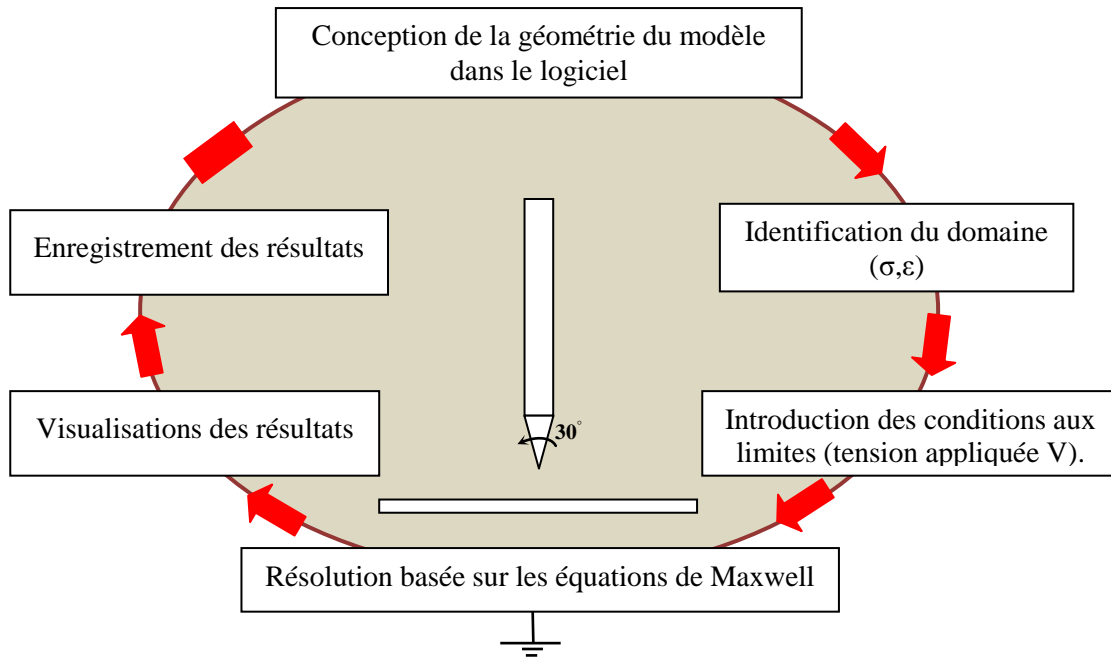


Figure III.2. Diagramme de résolution des différentes étapes dans Comsol multiphysics.

Pour la configuration étudiée, représentée sur la figure III.3, les conditions aux limites suivantes ont été appliquées :

- ✚ **Électrode active (HT)** : Potentiel fixé à 10 kV (haute tension),
- ✚ **Électrode de masse** : Potentiel maintenu à 0 V (référence de terre).

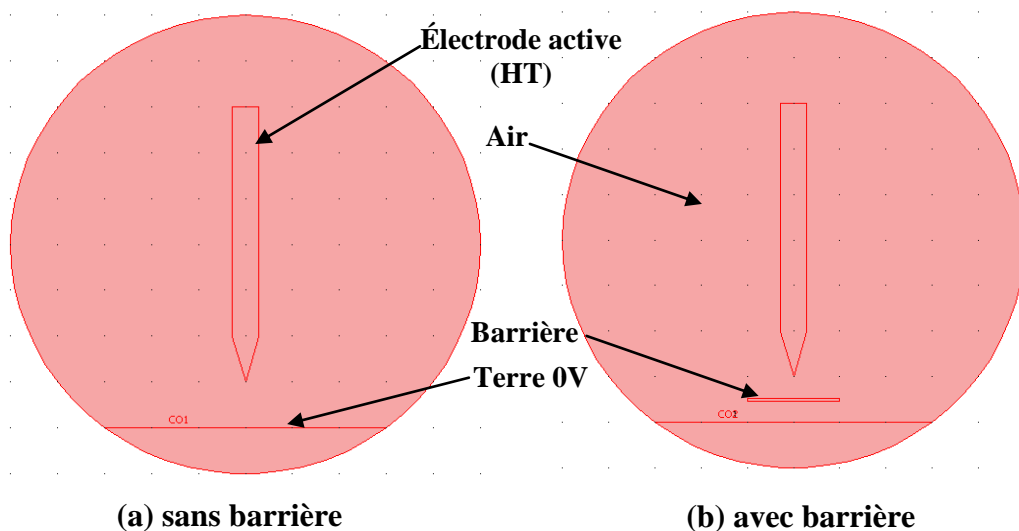


Figure III.3. Configuration pointe-barrière-plan logiciel comsol multiphysics dans les deux cas étudiée.

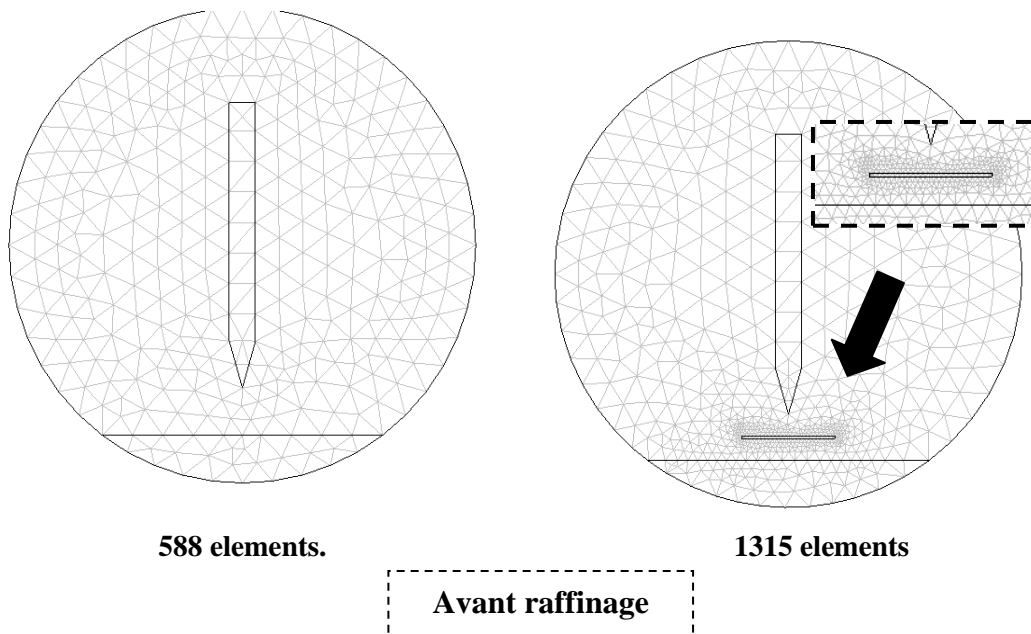
Concernant le maillage, plusieurs critères doivent être pris en compte pour assurer la précision et l'efficacité de la simulation :

✚ **Densité des éléments finis** : La densité des éléments doit être particulièrement élevée dans les régions critiques, telles que celles proches de la barrière, afin de capturer de manière précise les variations complexes des phénomènes physiques dans ces zones sensibles.

✚ **Qualité du maillage** : La qualité du maillage est primordiale pour garantir la précision des résultats. Un maillage de mauvaise qualité peut entraîner des résultats erronés ou imprécis, particulièrement dans les zones où des gradients importants de variables physiques sont présents.

✚ **Choix du maillage** : Le choix du maillage doit être effectué en équilibrant la précision des résultats et la réduction du temps de simulation. Un maillage trop fin pourrait augmenter le temps de calcul de manière excessive, tandis qu'un maillage trop grossier pourrait sacrifier la précision. Il est donc nécessaire de sélectionner un maillage qui permette d'obtenir des résultats satisfaisants tout en optimisant les performances du calcul.

✚ **Raffinage du maillage** : Le raffinement du maillage dans les zones critiques ou où des phénomènes complexes se produisent peut améliorer considérablement la précision des résultats. La figure III.4 illustre cette démarche, montrant la différence entre le maillage avant et après raffinement. Ce processus permet de mieux capter les variations locales tout en maintenant un temps de calcul raisonnable.



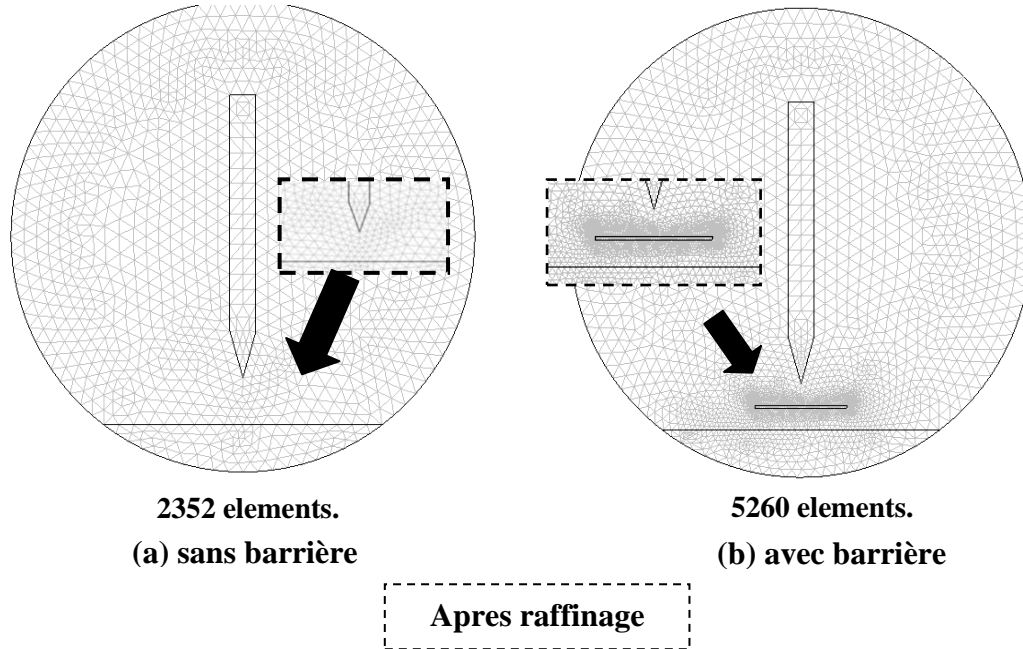


Figure III. 4. Répartition du maillage pour les deux cas : sans et avec barrière.

Lorsque le programme converge vers une solution, il bascule automatiquement vers la fenêtre de post-traitement qui permet d'analyser les résultats. Ces derniers peuvent être visualisés sous forme de cartes de remplissage coloré, représentant notamment la distribution du potentiel électrique et du champ électrique. Cette section est consacrée à l'étude de ces deux grandeurs physiques.

III.5.1. Répartition du potentiel électrique

La figure III.5 illustre la distribution du potentiel électrique dans l'espace inter-électrodes, mettant en évidence une forte concentration des lignes équipotentiellles au voisinage de la pointe. Cette configuration est caractéristique d'un gradient de potentiel élevé, traduisant une amplification locale du champ électrique selon la relation $\vec{E} = \nabla V$. Le resserrement des équipotentiellles indique une augmentation significative de l'intensité du champ, pouvant atteindre plusieurs kV/mm dans cette zone critique.

Physiquement, cette inhomogénéité du champ résulte de la géométrie asymétrique du système électrode-pointe, où les effets de pointe dominant. Lorsque la distance inter-équipotentielle devient inférieure au libre parcours moyen des électrons, les conditions deviennent favorables à l'ionisation par avalanche (critère de Townsend). En pratique, ces régions constituent des sites

privilegiés d'amorçage de décharges (streamers ou leaders) dès que le champ dépasse la rigidité diélectrique du milieu.

La figure III.6, montre l'intensité du potentiel électrique, pour les deux cas avec et sans barrière, (l'axe vertical pointe-plan). Nous remarquons que la variation de la configuration (avec et sans barrière) a une légère variation sur l'intensité de la tension inter-électrode, dû a la présence de la barrière. Donc le système pointe-plan en présence de la barrière, se compose de deux sous systèmes, l'un pointe - barrière et l'autre barrière – plan. Ce dernier est considéré comme un système plan-plan, qui est le système le plus rigide. Nos résultats coïncident avec ceux obtenus par d'autres chercheurs. [7]

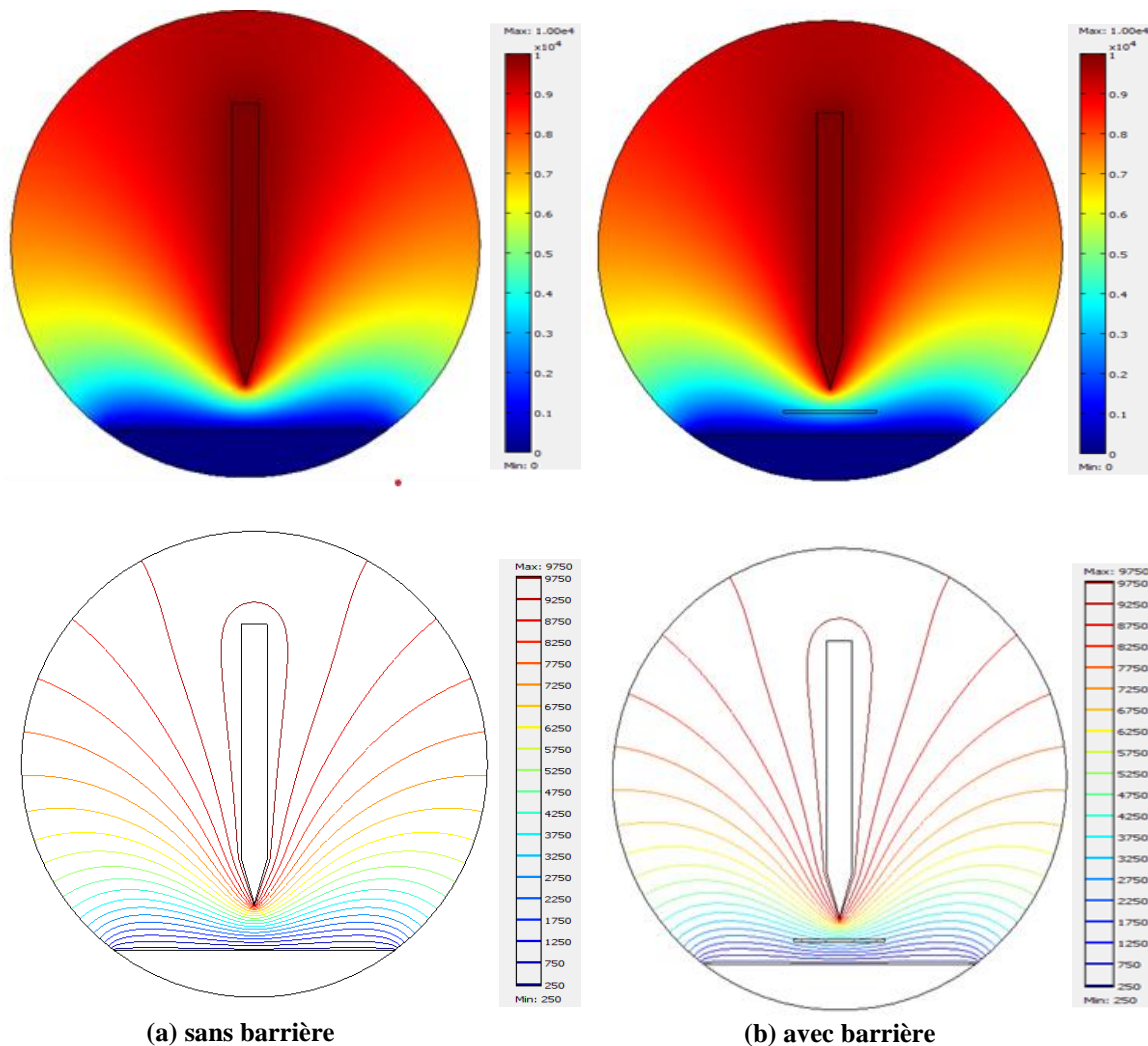


Figure III.5. Distribution du potentiel électrique.

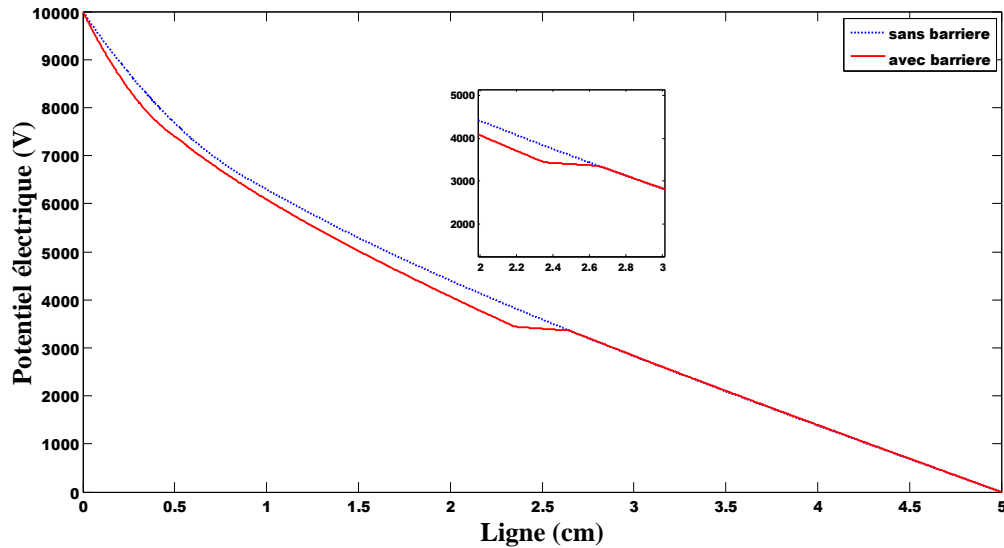


Figure III.6. Potentiel électrique le long de la distance minimale de fuite.

III.5.2. Répartition du champ électrique

Les figures III.7 et III.8 présentent respectivement la distribution des lignes de champ électrique et l'intensité du champ électrique pour les configurations avec et sans barrière diélectrique.

La figure III.7(a) (sans barrière) révèle :

- ✚ Un pic de champ électrique à la pointe, dont l'atténuation rapide résulte de l'injection de charges dans l'intervalle inter-électrode, générant un champ d'espace opposé au champ appliqué,
- ✚ L'apparition secondaire d'un pic au niveau du plan,
- ✚ Une décroissance progressive du champ lorsque les streamers atteignent le plan, permettant la neutralisation des charges.

La figure III.7(b) (avec barrière isolante) montre quant à elle :

- ✚ Une augmentation du champ électrique au plan jusqu'à un maximum, sans décroissance ultérieure car les streamers ne peuvent atteindre la barrière pour y être neutralisés,
- ✚ Une réduction modérée du champ à la pointe par rapport au cas sans barrière.

Conformément aux principes électrostatiques, les lignes de champ (perpendiculaires aux équipotentielles) émergent de l'électrode sous tension et convergent vers l'électrode mise à la terre. L'analyse des vecteurs représentés sur la figure III.7 confirme une intensification du champ électrique au voisinage immédiat des électrodes, particulièrement prononcée du côté de l'électrode en pointe.

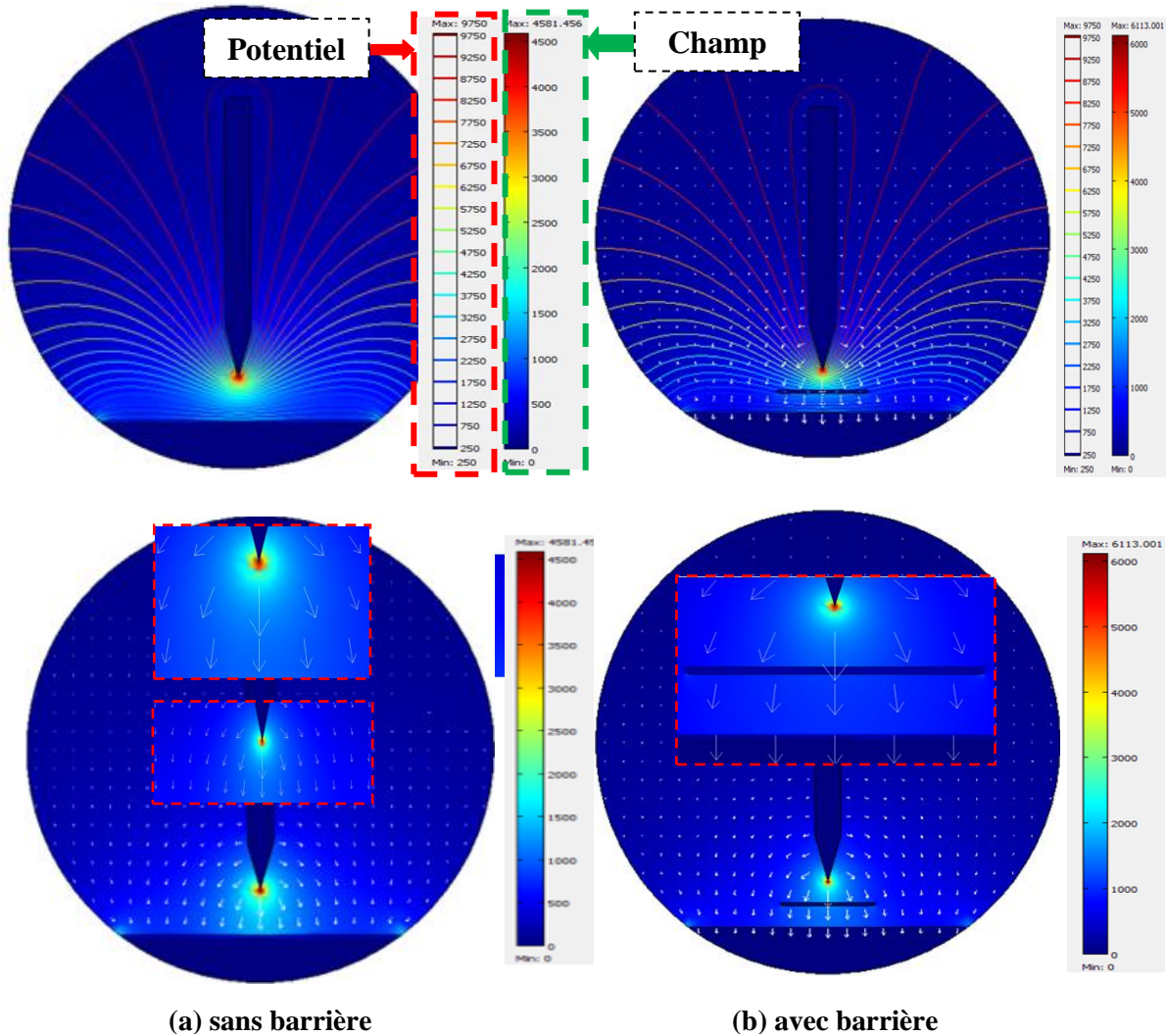


Figure III.7. Distribution du champ électrique.

La distribution du champ électrique est modifiée lors de l'insertion d'une barrière dans l'intervalle pointe-plan selon la figure III.8. En l'occurrence, le dimensionnement de l'intervalle d'air pointe-barrière-plan doit être optimisé en fonction des paramètres (largeur la barrière, position..etc), afin d'assurer les meilleures performances techniques en parvenant à une meilleure qualité d'isolation.

Dans le cas d'une présence de la barrière présenté dans la figure III.8 où le champ est diminué.

Notamment, crée une zone entre la barrière et le plan où le champ est uniforme. Donc le système pointe-plan en présence de la barrière, se compose de deux sous-systèmes, l'un pointe-

barrière (plan) et l'autre plan – plan. Ce dernier est considéré comme un système plan-plan, qui est le système le plus rigide.

L'insertion d'une barrière diélectrique dans l'intervalle pointe-plan modifie significativement la distribution du champ électrique, comme le démontre la figure III.8. Cette modification s'explique par deux mécanismes physiques principaux :

- ✚ La perturbation du gradient de potentiel due à la différence de permittivité entre l'air ($\epsilon_r \approx 1$) et le matériau diélectrique ($\epsilon_r > 1$),
- ✚ La création d'interfaces supplémentaires où s'accumulent les charges de polarisation.

Comme le révèle la figure III.8, la présence de la barrière induit :

- ✚ Une réduction locale de l'intensité du champ électrique au voisinage de la pointe,
- ✚ L'établissement d'une zone de champ quasi-uniforme entre la barrière et le plan électrode.

Cette configuration peut être modélisée comme la superposition de deux sous-systèmes distincts :

- ✚ Un système pointe-barrière (géométrie asymétrique) où le champ reste tjrs non uniforme,
- ✚ Un système barrière-plan (géométrie symétrique) assimilable à une configuration plan-plan présentant une rigidité diélectrique élevée ($E_{\text{rigide}} \approx 3 \text{ kV/mm}$ pour l'air sous conditions standards),

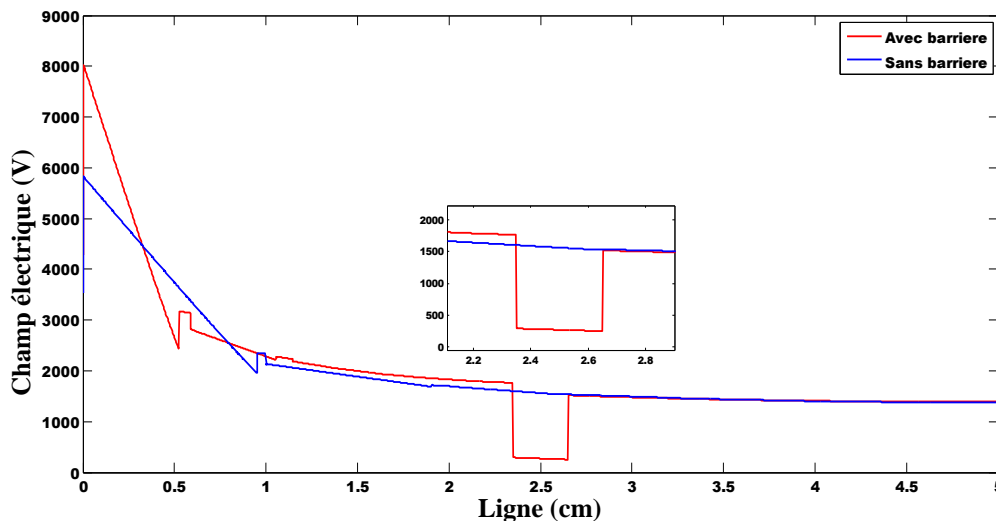


Figure III.8. Champ électrique le long de la distance minimale de fuite.

L'analyse des résultats obtenus permet de comprendre cette répartition ou les charges induites à l'interface barrière/plan créent un champ de compensation qui homogénéise la distribution globale.

Cette configuration hybride combine ainsi les avantages des deux géométries, ainsi de tirer parti de la forte rigidité diélectrique des systèmes plan-plan tout en contrôlant l'inhomogénéité du champ dans la région pointe-barrière, offrant un compromis optimal pour les applications haute tension.

III.6. Conclusion

Ce travail a porté sur l'étude de la distribution du champ électrique dans un système pointe-plan, avec et sans barrière isolante, sous tension alternative. Grâce au logiciel COMSOL, basé sur la méthode des éléments finis, nous avons pu analyser la distribution du potentiel et du champ électrique.

Les principales conclusions de cette étude sont les suivantes :

- ✚ L'insertion d'une barrière isolante modifie la distribution du champ électrique en augmentant la rigidité diélectrique du système;
- ✚ En présence de la barrière, la distribution du champ électrique devient quasi uniforme et son intensité est inférieure à celle observée sans barrière. Ce phénomène s'explique par le rôle de la barrière, qui agit comme un obstacle électrostatique limitant la propagation du champ ;
- ✚ Nous avons mis en évidence une atténuation du champ électrique due à la barrière isolante. Cette diminution confirme l'augmentation de la rigidité diélectrique après l'insertion de la barrière dans l'intervalle air pointe-plan.



" Conclusion générale "

Conclusion Générale

Ce mémoire de master a étudié l'influence des barrières diélectriques sur les décharges électriques dans des configurations pointe-plan, en s'appuyant sur une revue théorique approfondie et des simulations numériques réalisées avec COMSOL Multiphysics.

Les résultats principaux révèlent que l'introduction d'une barrière isolante altère notablement la distribution du champ électrique, ce qui se traduit par une augmentation de la rigidité diélectrique globale du système.

Cette amélioration s'explique par :

- ✚ **La redistribution du champ électrique** : La barrière crée une zone de champ quasi-uniforme entre elle et l'électrode plane, réduisant les gradients locaux et limitant la propagation des décharges.
- ✚ **L'accumulation de charges** : Les charges superficielles sur la barrière génèrent un champ de compensation qui atténue l'intensité du champ près de la pointe.
- ✚ **La géométrie hybride** : Le système pointe-barrière-plan combine les avantages des configurations asymétriques (pointe-plan) et symétriques (plan-plan), offrant une meilleure tenue diélectrique.

Les simulations numériques ont validé ces mécanismes, confirmant une diminution du champ électrique en présence de la barrière, notamment dans la région pointe-barrière.

Ces résultats concordent avec les études expérimentales antérieures, soulignant l'efficacité des barrières pour renforcer l'isolation dans les applications haute tension.

Perspectives

Pour prolonger cette recherche, plusieurs axes pourraient être explorés :

- ✚ **Optimisation des paramètres géométriques** : Étudier l'influence de l'épaisseur, de la largeur et de la position de la barrière sur la rigidité diélectrique, en variant systématiquement ces paramètres.
- ✚ **Matériaux innovants** : Tester des diélectriques avancés (nanocomposites, céramiques) pour améliorer les performances des barrières.
- ✚ **Conditions environnementales** : Analyser l'effet de la pollution, de l'humidité ou des températures extrêmes sur le comportement des décharges.

✚ **Modélisation dynamique** : Étendre les simulations à des régimes transitoires (tensions impulsionnelles) et coupler les phénomènes électriques avec des effets thermiques ou mécaniques.

✚ **Validation expérimentale** : Confronter les résultats numériques à des mesures en laboratoire pour affiner les modèles.

Cette étude ouvre des perspectives prometteuses pour la conception de systèmes d'isolation plus performants et fiables, en particulier dans les réseaux électriques et les équipements haute tension. Les recherches futures pourraient s'orienter vers des approches multidisciplinaires, combinant la science des matériaux et la physique des plasmas, afin d'approfondir l'analyse de ces mécanismes complexes.



" Conclusion générale "

Références bibliographiques

- [1] A.Béroual and A.Boubakeur , " Influence of Barriers on the Lightning and Switching impulse strength of Mean Air gaps in point/plane Arrangements." , IEEE Transactions on Electrical Insulation. Vol. 26 No. 6, December 1991.
- [2] C. Menguy, «Mesure des caractéristiques des matériaux isolants solides» Technique de l'Ingénieur, D2310, 2002.
- [3] 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, Ecole Centrale de Lyon, 1997.
- [4] A. Boubakeur, « Claquage des diélectriques solides », cours quatrième année, Département de Génie Electrique, Ecole Nationale Polytechnique d'Alger, Janvier 2004.
- [5] G. Le Roy, C. Gray, B. Hutzler, J. Lalot, Ch Dubanton , " les propriétés diélectriques de l'air et les très hautes tension". Edition eyrolles, Paris 1984.
- [6] E.Kuffel, W.Zaenguele "high voltage engineering".Pergamon press, 1984.
- [7] A.Boubakeur, " Foudre – zone d'attraction d'un paratonnerre – ", support pour conférence, Alger, 2004.
- [8] J.Arianer "les processus d'ionisation ". Cours université Paris sud .2004.
- [9] J.Arianer "les processus d'ionisation ". Cours université Paris sud .2004.
- [10] Z.You-Bin "the influence of the electrode material of rod-rod cap with tip on its DC breakdown voltage" graz 1995.
- [11] www.ens-lyon.fr/dsm/magistere/projets-biblio/2003/Iblaise-\memoire.html, Site web.
- [12] M. Auguet, M. Ianoz " Traité d'électricité ". Haute tension Volume XX II.
- [13] Technique des essais à haute tension, pub I. CEI, No. 60 -1 (1973),60-2 (1973),60-3 (1976), 60-4 (1977),Genève ,1973,1976,1977.
- [14] Ramzi Deghnouche " Etude de l'influence de la barrière isolante sur l'amorçage des intervalles d'air pointe-plan" mémoire d'ingénieur, université de Biskra, juin 2004
- [15] A.Boubakeur, "Influence des barrières sur la tension de décharge disruptive des moyens intervalles d'air pointe-plan" , thèse de doctorat, E.P. Varsovie, Pologne, 1979.
- [16] N. Berger, « Liquides isolants en électrotechnique : caractéristiques des produits » Technique de l'Ingénieur, D2471, 2002.