



République Algérienne Démocratique et Populaire
Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique



Université Amar Telidji - Laghouat

FACULTE de TECHNOLOGIE

DEPARTEMENT d'Électrotechnique

Mémoire de fin d'études

Présenté par :

◎ **Noureddine HADJ MAHAMMED**

◎ **Yahia SEMAOUI**

DOMAINE : SCIENCES et TECHNOLOGIES.

FILIERE : Électrotechnique

OPTION : Électrotechnique Industrielle

Thème

***Étude Expérimentale du Phénomène de Claquage dans l'Air
sous Tension Alternative.***

Jury de soutenance :

Nom et Prénom	Grade	qualité
Saliha BOUDRAA	MCB	Président
Abdelhalim MAHDJOUBI	MCA	Examineur
Tahar SEGHIER	Professeur	Encadreur

::: Remerciements :::

*Avant toute chose, nous remercions **Dieu** le tout puissant, de nous avoir donné le courage, la foi et la patience pour pouvoir finaliser ce mémoire.*

*Un grand respect et une grande reconnaissance, Ainsi nos sincères remerciements destinés à notre encadrant, Monsieur **Seghier Tahar** de nous avoir orienté du début jusqu'à la fin de ce mémoire en dépit de ses empêchements, et pour ses remarques si précieuses, ainsi pour l'inspiration, l'aide et le temps qu'il a bien voulu nous consacrer.*

Nous tenons à exprimer aussi nos remerciements aux membres du jury, qui ont accepté d'évaluer notre travail.

Nous adressons notre profonde gratitude aux enseignants et responsables du département Électrotechnique, également aux membres de laboratoire Étude et Développement des Matériaux Semi-conducteur et Diélectriques, et à tous ceux qui auraient eu l'aimable volonté de feuilleter notre travail.

Enfin, nous exprimons nos remerciements à tous ceux qui ont contribué de près ou de loin à l'élaboration de notre travail.

.« Merci à tous ».

ملخص

يتناول هذا العمل دراسة وإدراك ومحاكاة انهيار الهواء تحت جهد التيار المتردد. فيه نعالج ظاهرة انهيار الهواء لأشكال هندسية مختلفة للإلكترود والمسافات بين الأقطاب الكهربائية المختلفة.

تم تنفيذ العمل في مختبر البحوث والتنمية من مواد أشباه الموصلات والعوازل - جامعة الأغواط - تحت إشراف مشرفنا.

في هذا العمل ، تم إجراء عدة اختبارات انهيار الهواء لعدة مجموعات من الأقطاب الكهربائية ولمختلف المسافات بين الأقطاب. الهدف النهائي هو تسليط الضوء على تأثير شكل الهندسة والمسافة بين الأقطاب الكهربائية على عتبة الجهد لانهيار الهواء.

بالنسبة إلى نفس المسافة بين الأقطاب الكهربائية ، ولحساب المجال التخريبي المقابل لكل تكوين ، استخدمنا برنامج "COMSOL Multiphysics".

Résumé

Ce travail porte sur l'étude, la réalisation et la simulation de claquage de l'air sous tension AC. Il traite le phénomène de claquage dans l'air pour différentes géométries d'électrodes et pour différentes distance inter électrode.

Le travail a été réalisé dans le Laboratoire Étude et Développement des Matériaux Semi-Conducteur et Diélectriques – Université de Laghouat sous le contrôle de notre encadreur. Dans cette travail, plusieurs tests de claquage pour plusieurs combinaisons d'électrodes et distance inter électrodes ont été réalisé. Le but final est de mettre en évidence l'influence de la forme de la géométrie et distance entre les électrodes sur la tension seuil du claquage de l'air. Pour une même distance inter électrode, et pour calculer le champ disruptif correspondant à chaque configuration, nous avons utilisé le programme "COMSOL Multiphysics".

Abstract

This work deals with the study, the realization and the simulation of air breakdown under AC voltage. It deals with the phenomenon of air breakdown for different electrode geometries and for different inter-electrode distances .

The work was carried out in the Laboratory Study and Development of Semiconductor and Dielectric Materials - University of Laghouat under the supervision of our supervisor. In this work, several breakdown tests for several combinations of electrodes and inter-electrode distance have been performed. The final goal is to highlight the influence of the shape of the geometry and distance between the electrodes on the threshold voltage of the air breakdown. For the same inter-electrode distance, and to calculate the disruptive field corresponding to each configuration, we used the program "COMSOL Multiphysics."

Mot clé : Claquage, Haute Tension, Géométries des électrodes, hétérogénéité, champ disruptif.

SOMMAIRE

Introduction générale

Chapitre 01 Haute tension et phénomène du claquage

I.1. DÉFINITION LA HAUTE TENSION	4
I.2. UTILITÉ DE LA HAUTE TENSION.....	4
I.3. PROBLÈMES LIÉS À LA HAUTE TENSION	5
I.3.1. L'EFFET COURONNE.....	5
I.3.2. CONTOURNEMENT.....	6
I.4. GÉNÉRATEURS DE HAUTE TENSION.....	6
I.4.1. TENSION ALTERNATIVE	7
I.4.2. TENSION CONTINUE	8
I.4.3. LES DOUBLEURS DE TENSION.....	10
I.4.4. LES MULTIPLICATEURS DE TENSION.....	12
I.5. PHÉNOMÈNE DU CLAQUAGE.....	13
I.5.1. INTRODUCTION.....	13
I.5.2. CLAQUAGE DE L'AIR	13
I.5.3. LOI DE PASCHEN.....	14
I.6. CONCLUSION	17

Chapitre II Présentation du matériel et logiciel du calcul

II.1. SALLE HAUT TENSION	18
II.1.1. LA CAGE DE FARADAY	18
II.1.2. LE PUPITRE DE CONTRÔLE :	18
II.2. LES ÉQUIPEMENTS	19
II.3. MESURE DE SÉCURITÉ :	21

II.4. LOGICIEL COMSOL MULIPHYSICS	23
II.4.1. DÉFINITION :	23
II.4.2. HISTORIQUE :	23
II.5. CONCLUSION	23

Chapitre III Résultats des essais et de simulation

III.1 INTRODUCTION	24
III.2 PRINCIPE DES ESSAIS	24
III.3 TESTS DE CLAQUAGE DE L’AIR POUR UNE TENSION ALTERNATIVE AC.....	24
III.3.1. CONFIGURATION SPHÈRE (GRANDE) – SPHÈRE (GRANDE).....	26
III.3.2. CONFIGURATION SPHÈRE (GRANDE) –PLAN.....	28
III.3.3. CONFIGURATION SPHÈRE (GRANDE) -SPHÈRE (PETIT).....	30
III.3.4. CONFIGURATION POINTE –SPHÈRE (GRANDE).....	32
III.3.5. CONFIGURATION SPHÈRE – CYLINDRE	34
III.4 CALCUL PAR SIMULATION DU CHAMP DISRUPTIF	37
III.5 CONCLUSION	47

CONCLUSION GÉNÉRALE

RÉFÉRENCE BIBLIOGRAPHIQUE

Introduction générale

Introduction générale

La haute tension fait référence à toute tension qui génère un champ électrique suffisamment fort dans les composants du système. La recherche sur la haute tension a conduit à la conception et à la production de produits, d'équipements et de systèmes capables de générer et de supporter des champs électriques élevés. Plusieurs phénomènes sont liés à la haute tension, parmi lesquels on trouve : le claquage. En laboratoire, des tensions élevées peuvent être générées en utilisant plusieurs composants et équipements. Ceux-ci incluent des transformateurs élévateurs et des multiplicateurs de tension permettant d'étudier le phénomène de claquage.

Dans notre cas, ainsi que dans le laboratoire de recherche et de développement sur les semi-conducteurs et les matériaux diélectriques de l'Université de Laghouat, nous avons réalisé plusieurs tests de claquage dans l'air pour différentes géométries d'électrodes et différentes distances inter électrodes.

Le présent manuscrit est divisé en trois grandes parties,

Après l'introduction générale, nous présenterons le concept de base de la haute tension et des phénomènes dans le premier chapitre, tels que le phénomène de claquage, le phénomène de contournement et le phénomène de l'effet de pointe. Les différentes méthodes de génération de haute tension dans le laboratoire sont ainsi exposées.

Le deuxième chapitre est consacré aux mesures de sécurité à prendre en compte dans la salle haute tension. Nous présenterons différents matériaux utilisés pour protéger les opérateurs et les équipements.

Dans le dernier chapitre, nous présenterons les résultats expérimentaux de la mesure de la tension de claquage dans l'air sous différentes configurations d'électrodes et différentes tensions. Dans une autre partie, nous essaierons de calculer le champ disruptif de l'air, par simulation en utilisant le logiciel Comsol multiphysics.

À la fin une conclusion et des perspectives seront dégagées

I.1. Définition la haute tension

Une haute tension est toute tension qui engendre, dans les composants d'un système, des champs électriques suffisamment intenses pour modifier, de manière significative, les propriétés de la matière, en particulier des matériaux isolants. Alors, l'étude de la haute tension aboutit à la conception et à la réalisation de produits, appareils et systèmes aptes à générer et à supporter des champs électriques élevés. Les systèmes à haute tension sont souvent le siège de phénomènes non linéaires et complexes, où se produisant à partir d'un seuil. On peut citer comme exemple l'arc électrique, effet couronne, claquage des matériaux isolants (solides, liquide), etc...

Seuils de tensions :

- Basses tensions : au-dessous de 1 kV.
- Moyennes tensions : 1 ~ 33 kV
- Hautes tensions : 33 ~ 230 kV
- Très hautes tensions : 230 ~ 800 kV
- Ultra hautes tensions : au-dessus de 800 kV

I.2. Utilité De La Haute Tension

Tout transfert d'énergie impose d'utiliser un système de liaisons associant une grandeur de flux et une grandeur d'effort. Pour le transfert d'énergie par l'électricité, la grandeur d'effort est la tension électrique et la grandeur de flux est l'intensité du courant. La plus grande partie de l'énergie perdue lors de ce transfert dépend de la grandeur de flux, responsable des pertes liées au déplacement. Le choix d'utiliser des lignes à haute tension s'impose dès qu'il s'agit de transporter de l'énergie électrique sur des distances supérieures à quelques kilomètres. Le but est de réduire les chutes de tension en ligne, les pertes en ligne et, également, d'améliorer la stabilité des réseaux.

Les pertes en ligne sont principalement dues à l'effet Joule, qui ne dépend que de deux paramètres : la résistance et l'intensité du courant (selon la relation $P_J = R.I^2$). L'utilisation de la haute tension permet, à puissance transportée ($P=U.I$) équivalente, de diminuer le courant et

donc les pertes. Par ailleurs, pour diminuer la résistance, aux fréquences industrielles, il n'y a que deux facteurs, la résistivité des matériaux utilisés pour fabriquer les câbles de transport, et la section de ces câbles. À matériau de fabrication et section équivalents, les pertes sont donc égales, en principe, pour les lignes aériennes et pour les lignes souterraines.

I.3. Problèmes liés à la haute tension

Les problèmes liés à la haute tension sont : effet couronne ; contournement des isolateurs.

I.3.1. L'effet couronne

L'effet couronne est lié à l'apparition de l'avalanche électronique qui se développe dans un intervalle gazeux séparant deux électrodes asymétriques soumises à un champ électrique hétérogène à des pressions de quelques torrs à quelques atmosphères. La décharge couronne se manifeste dans les conditions naturelles. Elle apparaît sous forme d'une gaine lumineuse qui apparaît autour des conducteurs entourés par l'air, lorsque la valeur maximale du champ électrique atteint celle du champ d'ionisation de l'air et se manifeste sur toute la gamme de fréquences de la tension. La décharge couronne se caractérise par des phénomènes de nature optique, acoustique et électrique. Lorsque le champ électrique en un point du fluide est suffisamment fort, le fluide s'ionise autour de ce point et devient conducteur. En particulier, si un objet chargé possède des pointes ou des coins, le champ électrique y sera plus important qu'ailleurs (c'est le pouvoir des pointes), c'est là en général, que se produira une décharge de corona. Ce phénomène tendra à se stabiliser de lui-même puisque la région ionisée devenant conductrice, la pointe aura apparemment tendance à disparaître. Les particules chargées se dissipent alors sous l'effet de la force électrique et se neutralisent au contact d'un objet de charge inverse. Les décharges de corona se produisent donc en général autour d'une électrode de rayon de courbure fort (un défaut du conducteur formant une pointe par exemple) tel que le champ électrique à ses environs soit suffisamment important pour permettre la formation d'une couche d'air ionisé, et une autre de rayon de courbure faible (une plaque métallique ou la terre) [3].

L'effet de couronne peut être indésirable (par exemple autour des lignes à haute tension), ou au contraire mis à profit dans certaines applications : générateurs électrostatiques, traitement de surface, xérographie, production d'ozone, etc.

Lorsqu'on applique une tension croissante à une ligne coaxiale de rayons R_1 et R_2 , la décharge disruptive survient à partir d'un seuil de tension, U_C

Deux cas sont à distinguer :

$R_1 < R_2/e$ avec $e = 2.718.. \Rightarrow$ Apparition d'une zone ionisée, de rayon croissant, autour du conducteur central ; puis amorçage d'une étincelle).

$R_1 > R_2/e \Rightarrow$ Amorçage d'une étincelle sans effet de couronne [1].

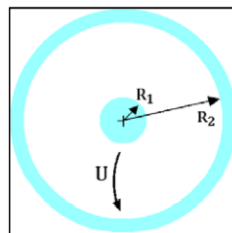


Figure I.01 : applique une tension croissante à une ligne coaxiale de rayons R_1 et R_2 .

I.3.2. Contournement

Le phénomène de pollution des lignes aériennes constitue un sujet d'étude d'une importance primordiale. Cela provient du fait que la pollution des isolateurs constitue un sérieux problème pour l'exploitation des réseaux de haute tension.

On dit que le contournement se produit sur la surface de l'isolateur lorsqu'une décharge électrique s'établit entre ses extrémités et contourne la surface de l'isolateur.

Le contournement provoque l'ouverture du disjoncteur, car il établit un court-circuit entre le conducteur et le pylône (défaut monophasé à la terre).

I.4. Générateurs de Haute Tension

Les générateurs de haute tension sont utilisés dans :

- a) les laboratoires de recherche scientifique ;
- b) les laboratoires d'essai, pour tester les équipements haute tension avant leur utilisation (isolateur, câble, transformateur, appareils de coupure ...) ; remarque: par mesure de sécurité,

les tensions d'essai utilisées sont bien entendu supérieures à la tension de service de l'équipement testé.

c) de nombreuses applications utilisant la haute tension (rayons X, effet couronne, générateur d'ozone, séparation électrostatique, laser...).

Par mesure de sécurité, les tensions d'essai utilisées sont bien entendu supérieures à la tension de service de l'équipement testé [1].

Il y a trois types de tensions conventionnelles :

- ✓ Tension alternative
- ✓ Tension continue
- ✓ Tension de choc transitoire

I.4.1. Tension alternative

I.4.1.1. Transformateur élévateur

Le transformateur élévateur représente la source de haute tension la plus répandue et la plus utilisée dans la pratique. Ce sont des transformateurs de faible puissance (de quelques centaines de VA à quelques kVA) dont l'objectif principal est de procurer une haute tension au détriment du courant qui est de l'ordre du milliampère généralement. Ces transformateurs qui sont destinés principalement aux laboratoires d'essais, doivent avoir une très bonne isolation car ils sont appelés à supporter les nombreux claquages qui surviennent lors des tests. La forme de la HT délivrée par un transformateur HT est généralement différente de la forme sinusoïdale, sans toutefois dépasser les tolérances permises. Ces transformateurs possèdent généralement une borne de l'enroulement qui est reliée à la terre. De nombreux transformateurs sont des transformateurs à point milieu. Pour des tensions supérieures à 750 kV, le coût, le transport et l'encombrement deviennent très gênants; On préfère alors recourir aux transformateurs montés en cascade [4].

I.4.1.2. Générateur à circuit résonant série

Les générateurs à circuit résonant série sont principalement utilisés pour les tests de câbles sur site. En ajoutant une inductance en série sur le secondaire du transformateur, accordée à la charge, on multiplie la tension par un facteur à peu près égal à son facteur de qualité [1].

I.4.1.3. Générateur à circuit résonant parallèle

Le générateur à circuit résonant parallèle, dont le schéma de principe est illustré à la Figure I.02 ci-dessous présente des similitudes avec le circuit série, puisqu'il est son dual. Une inductance L est rajoutée en parallèle avec la capacité C et doit être calculée de façon à être a_{cc} est en série avec l'inductance " L_{cc} " de court-circuit ramenée au secondaire du transformateur HT

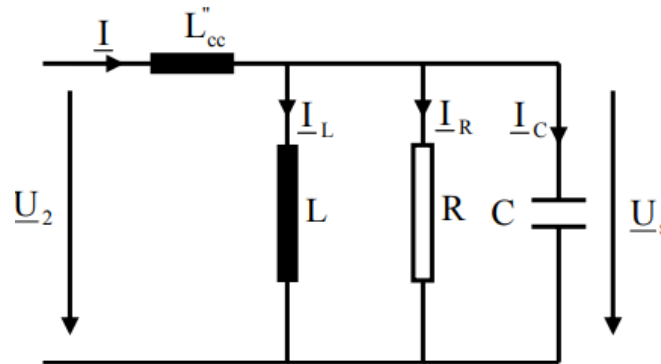


Figure I.02 : générateur à circuit résonant parallèle

Le facteur de réduction de courant est défini par :
$$\beta = \frac{I_c}{I} = \frac{I_L}{I} = \frac{R}{\omega.L} \quad (I.1)$$

Ce circuit présente l'avantage de diminuer le courant de transformateur haute tension puisque ce dernier n'alimente pas l'objet C mais les pertes de actives de la bobine [1].

I.4.2. Tension continue

La haute tension continue est utilisée dans de nombreuses applications, telles que :

- Réseaux HVDC (High Voltage Direct Current)
- Recherche fondamentale : il est plus facile de travailler et d'analyser les phénomènes avec une tension constante qu'avec une tension constamment variable.
- De nombreuses applications nécessitent une tension continue (rayons X de la radiologie, séparation électrostatique, filtre électrostatique...).
- Dans les applications où les essais de test d'équipement à charge capacitive sont très nombreux ; pour des raisons économiques on évite la tension alternative.

I.4.2.1.Redresseur de tension alternative

Le redresseur peut comporter plusieurs diodes en série, de manière à limiter, à une valeur acceptable sur chaque diode, la tension inverse qui peut atteindre au total le double de la valeur de crête de U_s . [1]

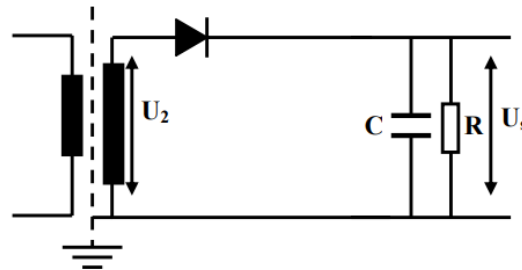


Figure 03 : redresseur à simple alternance en charge

avec : C : capacité de lissage du redresseur + capacité de l'objet en essai + capacités parasites.

R : résistance de l'objet testé + résistance de fuite du condensateur de lissage.

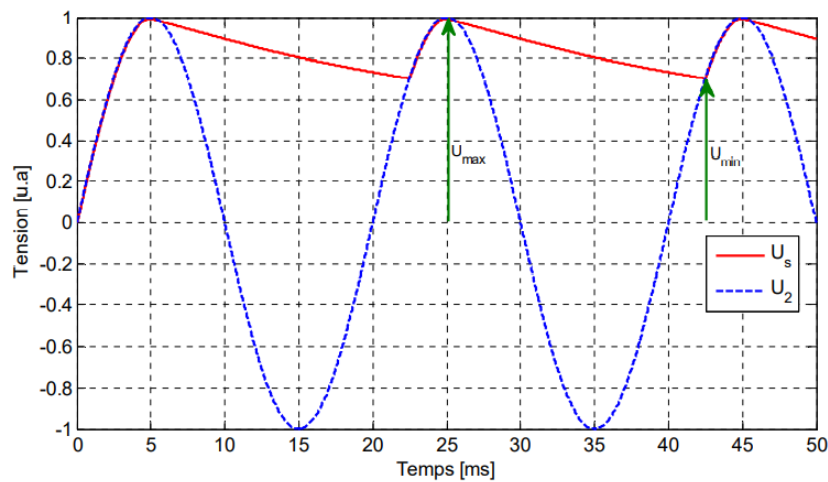


Figure I.04 : U_s avec Capacité de lissage

Diode haute tension

Elle est équivalente à la mise en série de n diodes conventionnelles. Le nombre de diodes n est déterminé suivant la tension inverse à supporter par l'ensemble. Par exemple, pour redresser une tension de 100 kV, on met en série 100 diodes de 1000 V chacune pour avoir une diode haute tension de 100 kV.

I.4.2.2.Redresseur à double alternance

Contrairement au redresseur à simple alternance, l'alternance négative est également redressée.

Il n'y a pas de très grande différence entre les montages redresseurs à simple et à double alternance, en présence d'une capacité de lissage.

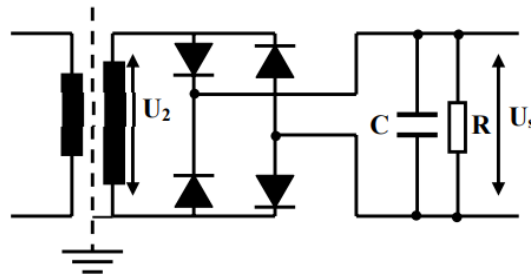


Figure I.05: Redresseur à double alternance en charge (pont de Graëtz)

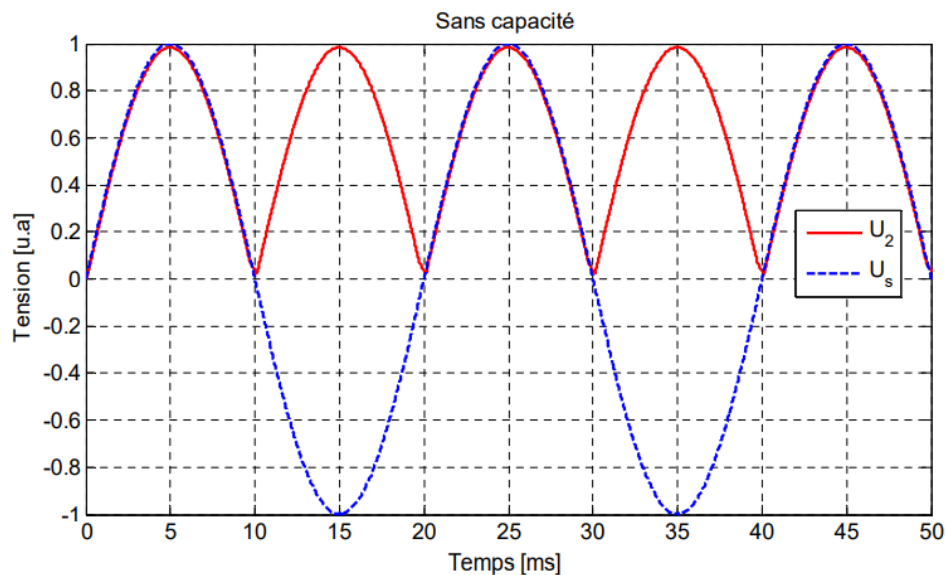


Figure I.06: courbe des tensions redressées délivrées par un pont de Graëtz.

I.4.3. Les Doubleurs de tension

Il y a plusieurs types de doubleurs de tension, mais le principe est le même; Le plus répandu est le doubleur de Schenkel et doubleur de Latour.

I.4.3.1. Doubleur de Schenkel

Pendant l'alternance négative le condensateur C_1 se charge à la tension $V_{\max}$, à l'alternance suivante cette tension qui s'ajoute à la tension du transformateur donne une tension aux bornes de C égale à $2V_{\max}$.

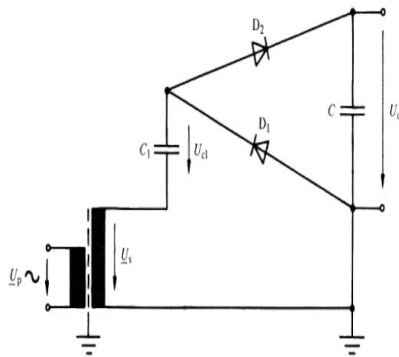


Figure I.07 : Doubleur de Schenkel

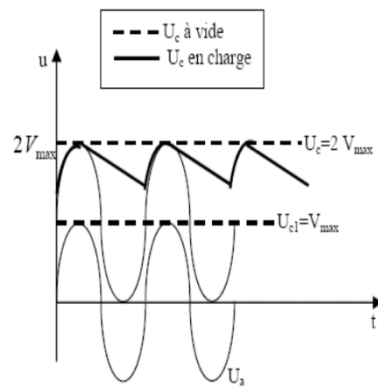


Figure I.08 : Courbes des tensions redressées
Par le doubleur de Schenkel

La tension à vide obtenue à la sortie est donc : $U_c = 2V_{\max}$

Remarque : l'avantage du doubleur de Schenkel est qu'il constitue l'élément de base du redresseur en cascade.

I.4.3.2. Doubleur de Latour

Contrairement au doubleur de Schenkel qui présente l'inconvénient de donner la pleine tension sur un seul condensateur.

Le principe de fonctionnement de doubleur de Latour est basé sur deux condensateurs en cascade dont l'un chargé au cours de l'alternance positive de la tension U_2 , à la valeur de crête, et l'autre est chargé de même, au cours de l'alternance négative. Le doubleur de Latour présente l'inconvénient de nécessiter un transformateur haute tension dont le secondaire n'a pas de point à la terre. Mais, il nécessite le recours à un transformateur haute tension dont le secondaire comporte deux bornes isolées à la terre [1].

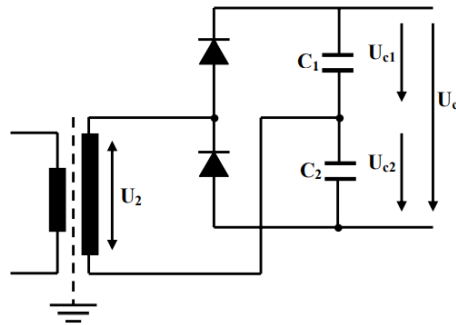


Figure 09 : Doubleur de Latour

I.4.4. Les multiplicateurs de tension

La première phase consiste à fermer les interrupteurs S_1 pour charger en parallèle les condensateurs C_i . Après, on ouvre les interrupteurs S_1 et on ferme S_2 : les tensions des condensateurs C_i qui sont maintenant en série, s'ajoutent pour donner aux bornes de C une tension de sortie $U_c = nU_0$.

Avec n : nombre de condensateurs C_i .

Remarque : ce générateur qui ne peut être utilisé qu'une fois les condensateurs chargés, a une durée d'application bien déterminée (qui dépend de l'énergie emmagasinée dans le condensateur et de la constante de décharge) car quand les condensateurs se déchargent, la tension tombe à zéro [4].

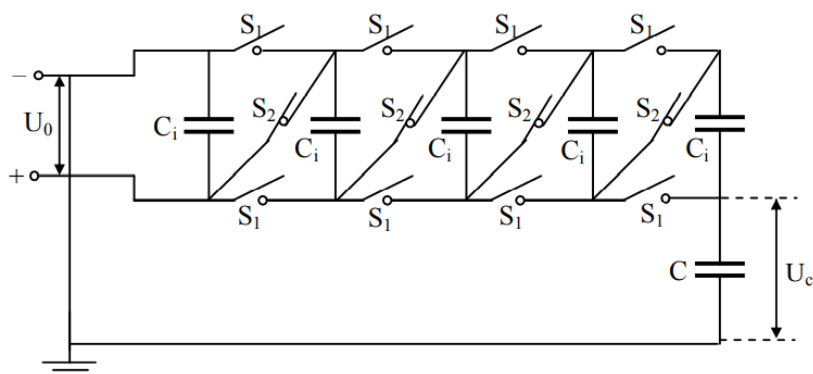


Figure I.10 : Multiplicateur de tension

I.5. Phénomène du claquage

I.5.1. Introduction

Le claquage est un phénomène qui se produit dans un isolant quand le champ électrique est plus important que ce que peut supporter cet isolant. Il se forme alors un arc électrique. Dans un condensateur, lorsque la tension atteint une valeur suffisante pour qu'un courant s'établisse au travers de l'isolant (ou diélectrique), cette tension critique est appelée tension de claquage. Elle est liée à la géométrie de la pièce et à une propriété des matériaux appelée rigidité diélectrique qui est généralement exprimée en [kV/mm]. La décharge électrique à travers l'isolant est en général destructrice. Cette destruction peut être irrémédiable, mais ceci dépend de la nature et de l'épaisseur de l'isolant entrant dans la constitution du composant : certains isolants sont ainsi dits auto régénérateurs, comme l'air ou l'hexafluorure de soufre [5].

I.5.2. Claquage de l'air

Dans un gaz, la rigidité diélectrique dépend de la pression en passant par un minimum (loi de Paschen). Plusieurs mécanismes de claquages existent. À pression ambiante (et de façon plus générale, au-dessus du minimum de Paschen), le mécanisme usuel est la décharge impulsionnelle. Les ions qui existent naturellement dans un gaz sont accélérés par le champ électrique, et, par collision avec les molécules neutres, peuvent produire de nouveaux ions. Passé un champ électrique suffisant, ceci devient une réaction en chaîne, le gaz devient alors conducteur. Le processus de Townsend, plus important à basse pression, répond à une logique similaire, mais concerne les électrons libres présent dans le gaz, qui arrachent d'autres électrons par collision avec les molécules. Dans le vide ou dans un gaz à très faible pression, un troisième mécanisme se manifeste : le claquage du vide se produit lorsque la distance entre les électrodes devient inférieure au temps de vol libre moyen d'un électron, leur permettant de "sauter" de la cathode à l'anode. La lampe à décharge est une application usuelle du claquage diélectrique des gaz [6].

Tous les gaz sont isolants :

- Ont la même constante diélectrique $\epsilon = \epsilon_0 = 8,85.10^{-12} \text{ F /m}$
- L'air est l'isolant le plus disponible, le plus utilisé et par-dessus le marché il est gratuit.
- Il est impossible de connaître le comportement particulier d'une particule, mais la théorie cinétique des gaz permet de connaître, en raison même de leur grand nombre, leur comportement moyen.

- N'importe quel gaz, utilisé comme diélectrique doit posséder certaines caractéristiques pour le bon fonctionnement telles que :
 - Grande résistivité
 - Pertes faibles
 - Rigidité diélectrique élevée
 - Non inflammable
 - Résistant aux effets thermiques et chimiques
 - Absence de toute toxicité ou Maintenance pas chère et pratique.

Tension critique de claquage U_c :

Si $U \geq U_c$: l'isolant ne peut pas supporter cette tension $\Rightarrow$ Claquage (décharge électrique).

Remarque :

A la pression atmosphérique,

si $d = 1\text{cm}$: $U_c \approx 30\text{ kV}$; donc le champ critique $E_c \approx 30\text{ kV/cm}$.

Étincelle-arc électrique

Lors d'un claquage, si l'on contrôle le courant avec une résistance élevée, la décharge se stabilise pour des courants de l'ordre du μA (Étincelle). Sinon, s'il n'y a pas de résistance de protection R , la décharge évolue rapidement vers d'autres régimes caractérisés par des courants beaucoup plus élevés (arc électrique), si la source d'alimentation a une puissance suffisante [1].

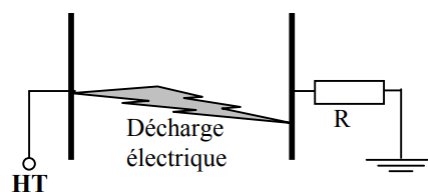


Figure I.11: Décharge électrique

I.5.3. Loi de Paschen

La loi de Paschen, loi empirique énoncée par le physicien allemand Friedrich Paschen en 1889, indique que l'apparition d'un arc électrique dans un gaz, à un certain champ électrique de claquage (dit champ disruptif), est une fonction généralement non linéaire du produit de la pression P du gaz par la distance d entre les électrodes [7].

I.5.3.1.Expression analytique

La loi de Paschen énonce que la tension de claquage d'un gaz soumis à une différence de potentiel continue V , entre électrodes séparées d'une distance d , obéit à une équation de la forme :

$$V_{claquage} = \frac{Bpd}{C + \ln(pd)} \quad (I.2)$$

où B et C sont des constantes caractéristiques des électrodes et du gaz et où p est la pression de celui-ci. Les courbes donnant les représentations graphiques de $V_{claquage}$ en fonction du produit pd sont appelées courbes de Paschen [7].

I.5.3.2.Courbes de Paschen

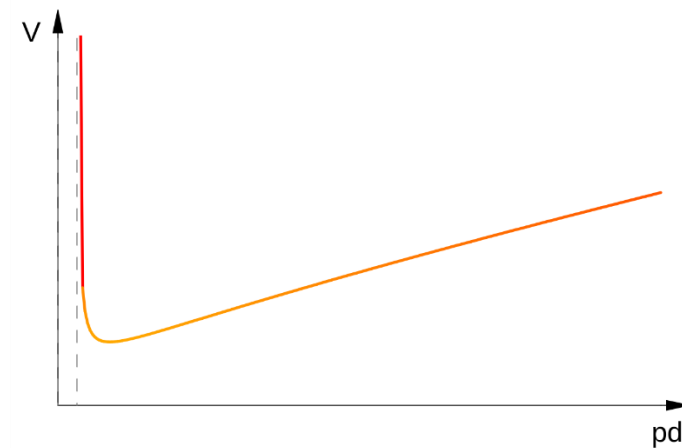


Figure I.12: Courbe de Paschen, en abscisse le produit pression fois distance, en ordonnée la tension

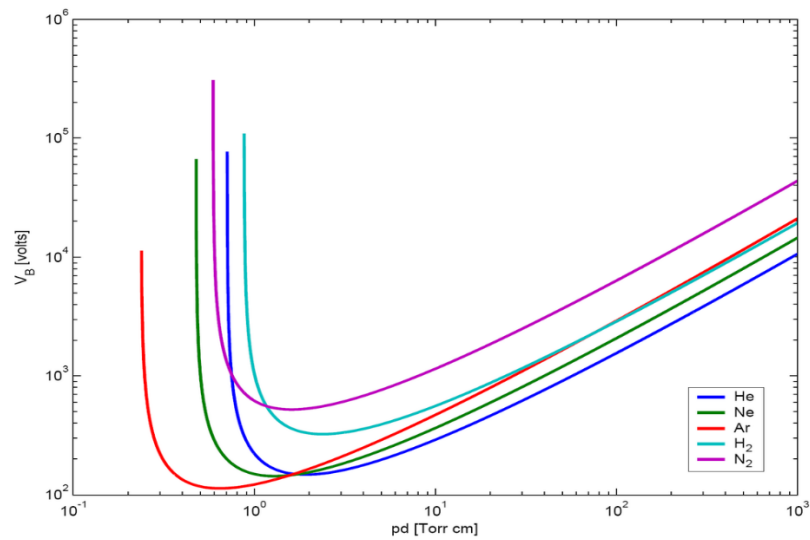


Figure I.13: Courbes de Paschen obtenues pour l'hélium, le néon, l'argon, l'hydrogène et le diazote, utilisant l'expression donnant la tension de claquage en fonction des paramètres B et C et du produit pression * distance.

I.5.3.3. Valeurs expérimentales

$$c = \ln \left(\frac{A}{\ln \left(1 + \frac{1}{\gamma} \right)} \right) \quad (\text{I. 3})$$

A et B sont des constantes mesurées expérimentalement. A s'exprime en (Torr·1.cm-1) et B en (V·Torr·1.cm-1). γ est le second coefficient de Townsend, qui dépend de la nature des électrodes [7].

Voici quelques valeurs des coefficients A et B pour quelques gaz:

Tableau I.1 : Tableau des variables A et B

Gaz	A (Torr·1.cm ⁻¹)	B (V·Torr·1.cm ⁻¹)
H ₂	5	130
N ₂	12	342
Air	15	365
He	3	34
Ne	4	100
Ar	14	180

I.5.3.4. Facteurs influençant la valeur de la rigidité diélectrique

Pour un matériau donné, la rigidité diélectrique dépend de plusieurs facteurs ou paramètres. On peut séparer les facteurs influant sur la rigidité diélectrique en deux groupes : des facteurs liés au protocole de mesure :, et des facteurs liés à la fabrication du matériau.

- **Facteurs liés au protocole de mesure :**

- Formes de la tension: continue, alternative, ou de choc, etc.
- Géométrie d'électrodes: la géométrie des électrodes influe sur la distribution de champs électriques dans l'espace (champs non-homogènes) ce qui provoque des décharges locales, là où le champ est le plus intense.
- Distance inter-électrodes: en général la variation de la rigidité diélectrique n'est pas linéaire en fonction de la distance.
- Polarité de la tension.
- Conditions atmosphériques de la mesure : Température, Pression et Humidité.

- **Facteurs liés à la fabrication du matériau (intrinsèque à l'échantillon mesuré):**

- La présence de bulles : des bulles d'air ou d'eau peuvent être présentes dans les isolants liquides ou polymères.
- La présence d'impuretés.
- L'absorption d'eau dans les plastiques fait baisser la valeur de la rigidité diélectrique.
- Le vieillissement thermique : un isolant est souvent soumis à une variation de température au cours de son fonctionnement, cette variation de température entraîne un vieillissement thermique qui fait varier la valeur de la rigidité diélectrique [8].

I.6. Conclusion

Afin de transmettre une grande quantité de puissance, il est préférable d'augmenter la tension et diminuer le courant pour réduire la perte de puissance et le coût total de transmission. Cependant, la transmission à haute tension provoquera de nombreux phénomènes indésirables, tels que le claquage, contournement, effet de pointe... Afin d'étudier ces phénomènes la haute tension peuvent être générées en laboratoire en respectant les mesures de sécurité. En effet, dans le chapitre suivant, nous discuterons ces mesures qui doivent être prises lors du travail dans une salle à haute tension.

II.1. Salle haut tension

En haute tension, on trouve quelques dispositifs importants pour les essais, la protection et la mesure des grandeurs électriques, on peut citer : la cage de Faraday et le pupitre de contrôle.

II.1.1. la cage de faraday

Est une cage en métal, reliée à la terre par un conducteur en cuivre, cette cage assure une protection contre le champ électrique élevé et les décharges partielles avec le milieu extérieur.

On retrouve aussi à l'intérieur de cette cage :

- **Le transformateur de test BT/HT et ses connections**

Est un transformateur élévateur de tension, abaisseur de courant, donc il ne suffit pas une grande contrainte mécanique, cet instrument est raccordé avec l'impédance de mesure par exemple avec des connecteurs.

- **La perche**

Est un dispositif isolant utilisé généralement pour la vérification de décharge électrique dans les équipements et elle reliée vers la terre.

II.1.2. le pupitre de contrôle

Permet de commander et lire les paramètres mesurés, aussi on trouve l'autotransformateur pour ajuster la tension désire.



Figure II.01 : Un pupitre de commande HV9103

II.2. Les équipements

L'équipement utilisé		Reference
En francien	En angle	
Transformateur de test BT/HT	HV Test Transformer	HV 9105
		
<i>Figure II.02 : Transformateur de test BT/HT</i>		

Une cuvette de raccordement	Connecting cup	HV 9109
 Figure II.03 : <i>Une cuvette de raccordement</i>		
Piédestal de plancher	Floor Pedestal	HV9110
 Figure II.04 : <i>Piédestal de plancher</i>		
Une impédance de mesure	Measuring Capacitor	HV 9141
 Figure II.05 : <i>Une impédance de mesure</i>		

Mesurer l'éclateur	Measuring Spark Gap	HV 9133
  <i>Figure II.06 : Mesurer l'éclateur</i>		
Résistance	Resistor	HV 9121
 <i>Figure II.07 : Résistance</i>		

II.3. Mesure de sécurité :

C'est une série de dispositions et d'actions que le chercheur suit pour prévenir les dangers de la haute tension comme :

- **la mise à la terre**

La mise à la terre est très importante, absolument nécessaire pour une bonne salle de test pour les équipements de test haute tension. La connexion doit être effectuée avec des câbles de cuivre à faible inductance qui relient tous les composants du circuit haute tension qui doit être mis à la terre à UNE borne de terre.

- la cage de Faraday



Figure II.08 : la cage de faraday

- Serrure de porte de sécurité :



Figure II.09 : Serrure de porte de sécurité

- Tige de décharge (la perche) :



Figure II.10 : Tige de décharge

- **Vert & rouge lampes (Il y a une tension, il n'y a pas tension):**



Figure II.11 : Vert & rouge lampes

II.4. Logiciel Comsol multiphysics

II.4.1. Définition :

COMSOL Multiphysics est un logiciel de simulation numérique basé sur la méthode des éléments finis. Ce logiciel permet de simuler de

nombreuses physiques et applications en ingénierie, et tout particulièrement les phénomènes couplés ou simulation multi-physiques .

La simulation multi-physique est, en analyse numérique, une tentative de reproduction du comportement d'un modèle dépendant de différents domaines des sciences physiques. Il peut s'agir de domaines mécaniques thermiques, chimiques, électromagnétiques, etc.

II.4.2. Historique :

Le logiciel COMSOL et la société correspondante ont été créés en 1986 par des étudiants de Germund Dahlquist, dans la suite de son cours consacré à la simulation numérique à l'Institut royal de technologie (KTH) à Stockholm en Suède. La première version de COMSOL Multiphysics est sortie en 1998.

La version initiale (avant 2005) de COMSOL Multiphysics s'appelait FEMLAB.

II.5. Conclusion

Pour utiliser un laboratoire haute tension, les utilisateurs doivent se familiariser avec chaque équipement de laboratoire et comprendre chaque équipement et toutes ses propres mesures de sécurité, mais des experts du laboratoire doivent être présents pour guider chaque utilisateur afin d'assurer le fonctionnement normal du laboratoire et la sécurité des utilisateurs.

III.1 Introduction

Ce chapitre traite les essais de claquage réalisés dans la salle haute tension du laboratoire Étude et Développement des Matériaux Semi-conducteur et Diélectriques – Université de Laghouat. Des essais de claquage de l'air, pour différentes géométries d'électrodes et différentes distances inter électrodes sont proposés. Les mêmes essais sont simulés à l'aide du programme COMSOL Multiphysics 5.6 afin de calculer la répartition du champ électrique entre les électrodes et de déduire le champ disruptif

III.2 Principe des essais

L'éclateur est composé de deux électrodes dont l'une est mise à la terre et l'autre reliée au potentiel à mesurer. La distance d entre les électrodes peut être réglée pour rapprocher les deux électrodes de l'éclateur jusqu'à ce que l'éclatement soit atteint ; la distance atteinte à ce moment peut être connue Valeur de tension.

III.3 Tests de claquage de l'air pour une tension alternative AC

- **L'objectif d'essais :**

L'objectif principale du ces essais est de générer une tension dans le but de tester le phénomène de claquage de l'air sec, pour différentes géométries d'électrodes et différentes distances inter électrodes.

- **L'équipement utilisé :**

- Transformateur d'essai HV HV9105 ;
- Un pupitre de commande HV 9103 ;
- Un pic AC voltmètre HV 9150 ;
- Mesure l'écart HV 9133 ;
- Résistance de charge () HV 9121 ;
- Une impédance de mesure HV 9141 ;
- Deux cuvette de raccordement HV 9109 ;
- Un socle de sol HV 9110 ;
- Mise à la terre Tige HV 9107 ;
- Deux barre de connexion HV 9108 ;
- Un piquet de terre ;
- Deux sphères grand modèle ($R=50\text{mm}$) ;

- Deux sphères petit modèle ($R=25\text{mm}$) ;
- Deux tige pointe ;
- Deux Cylindre ;
- Deux Plan ;

- **Le schéma électrique équivalent**

La figure ci-dessous représente le schéma de mesure de la tension du claquage.

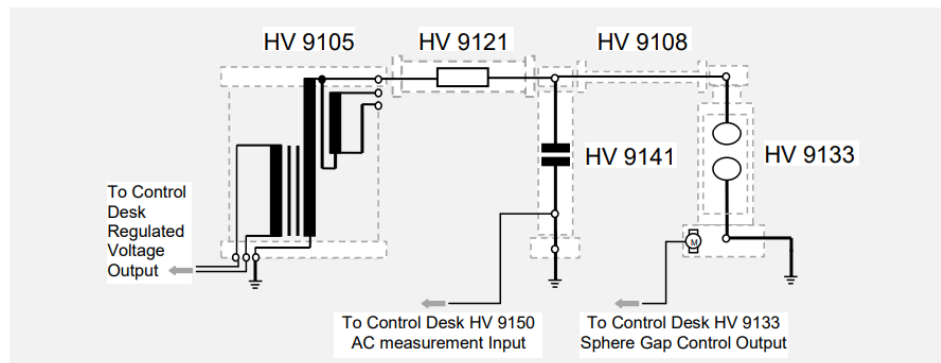


Figure III.01 : Circuit pour Sphère l'écart AC Mesure de tension par l'intermédiaire de contrôle bureau Instrumentation

- **Procédure**

- 1) Nous vérifions bien les points de connexion à la terre dans la cage.
- 2) Ont vérifié que le transformateur est correctement connecté au pupitre de commande. Pour obtenir des instructions sur la façon de procéder.
- 3) On place le condensateur de mesure HV 9141 sur un Piédestal de plancher et positionner une cuvette de raccordement sur le dessus et connectez-le à pupitre de commande.
- 4) On place la résistance de charge HV 9121 entre le transformateur et le condensateur de mesure.
- 5) Nous positionnons la Mesurer l'éclateur. Ce sera connecté via la cuvette de raccordement au-dessus du condensateur de mesure par une barre de connexion HV 9108.
- 6) Réglez la distance entre l'électrode
- 7) Après double vérification de toutes les connexions et mise à la terre, assurez-vous que tout le monde a quitté la cage HV. À la sortie, la dernière personne doit placer l'HV9107 Rod mise à la terre à travers l'entrée avant de fermer et verrouiller la porte.
- 8) On Allume pupitre de commande. Notez l'état des voyants d'alerte au-dessus de la porte.

9) Assurez-vous que le voltmètre AC est réglé pour mesurer la tension de claquage et réinitialisez-le si nécessaire.

10) Augmenter la tension lentement et enregistrer la tension de claquage indiquée sur le pic voltmètre AC pour chaque distance dans le tableau des résultats. Répétez chaque distance plusieurs fois pour une meilleure précision.

11) Une fois que le claquage se produit, diminuer la tension jusqu'à ce que l'étincelle est éteinte.

12) Nous éteignons le pupitre de commande puis entrons dans la cage. Nous déchargeons les appareils à l'aide Tige de décharge

- **Montage de mesure de la tension du claquage**

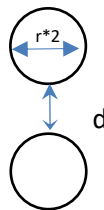
Nous avons obtenu cette configuration suivant :



Figure III.03 : Configuration de mesure Tension de Claquage

III.3.1. Configuration Sphère (grande) – Sphère (grande)

Le système d'électrode est constitué de deux Sphères identique de diamètre: $r = 50\text{mm}$



La valeur théorique de la tension du claquage (la tension maximum) peut être calculer en utilisant la formule suivante :

$$U_{\max} = 1,1 \cdot \frac{r.d}{r+d/2} \cdot (24,22 + \frac{6,08}{\sqrt{d}}) \quad (\text{III.1})$$

Dans le tableau suivant on présente les tensions de claquage mesurées et calculées

Tableau III.1 : les tensions de claquage mesurées et calculées dans le cas sphère-sphère

Distance(mm)	Tension de claquage $\hat{u}_c$ (kV)	$U_{\max}$ (kV)	Erreur $U_{\max} - \hat{u}_c$ (kV)
1	3,8	4,73	0,93
1,5	5,2	6,48	1,28
2	8,3	8,15	0,14
2,5	9,15	9,76	0,61
3	11	11,31	0,31
4	14,9	14,31	0,58
5	17,9	17,19	0,70
6	21,2	19,96	1,23
8	27,5	25,27	2,22
14	37,2	39,65	2,45
27	70	65,29	4,70
44	105	91,14	13,85

Dans la figure on représente la tension du claquage mesurée et calculée en fonction de la distance inter électrode

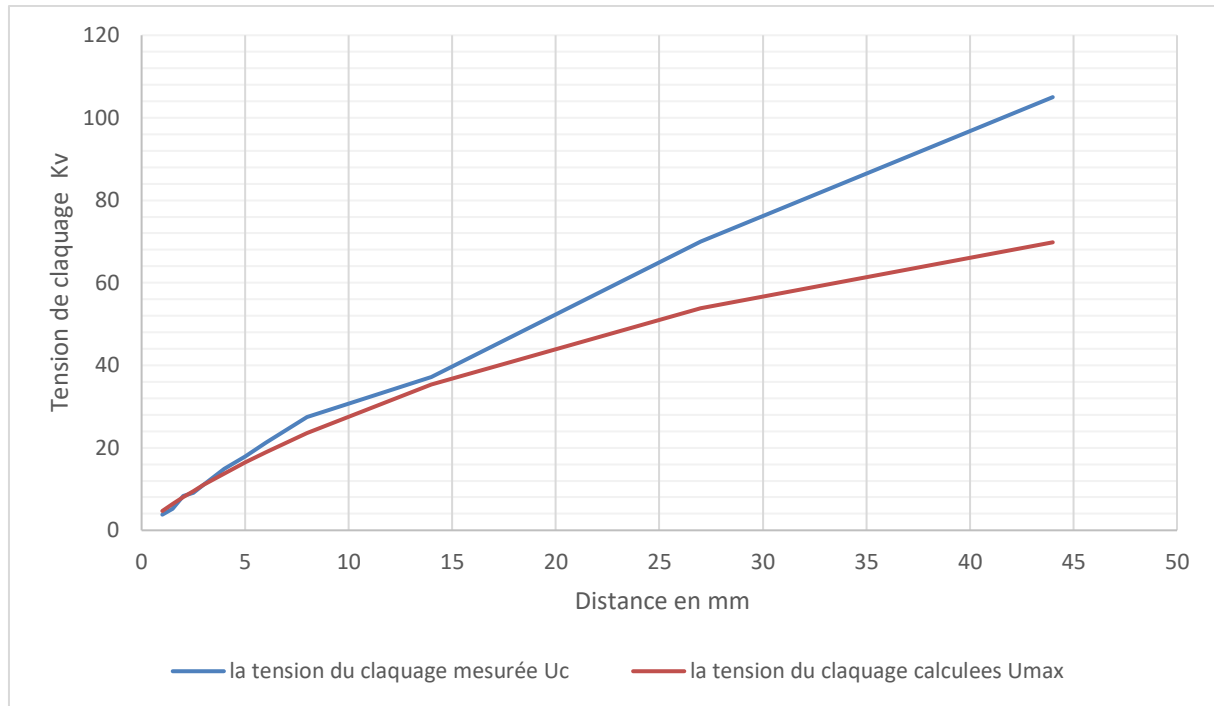


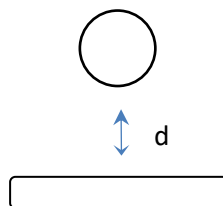
Figure III.04 : Tension de claquage en fonction de la distance inter électrodes Sphère- Sphère

La figure ci-dessus montre que lorsque la distance entre les électrodes augmente, la tension de claquage augmente également. Les résultats expérimentaux sont en bon accord avec les résultats calculés par la formule analytique. Cependant, à partir de la distance inter électrode de 5 mm; il y a une différence entre la valeur mesurée et la valeur calculée. L'erreur entre les deux valeurs augmente si la distance augmente davantage. Pour une distance de 44 mm, par exemple, l'erreur égale à 13 kV.

Cette configuration représente la simulation de Générateur de Marx.

III.3.2. Configuration Sphère (grande) –Plan

Le système d'électrode est constitué d'une sphère de diamètre : $r = 50$ mm et un électrode plan.



La valeur théorique de la tension du claquage (la tension maximum) peut être calculer en utilisant la formule suivante :

$$U_{\max} = 1,1 \cdot \frac{r \cdot d}{r+d} \cdot \left(24,22 + \frac{6,08}{\sqrt{d}} \right) \quad (\text{III.2})$$

Dans le tableau suivant on présente les tensions de claquage mesurées et calculées

Tableau III.2 : les tensions de claquage mesurées et calculées dans le cas
Sphère (grande) –Plan

Distance(mm)	Tension de claquage $\hat{u}_c$ (kV)	$U_{\max}$ (kV)	Errer $U_{\max} - \hat{u}_c$ (kV)
1	3,8	4,69	0,19
1,5	5,2	6,39	0,79
2	8,3	8,00	1,30
2,5	9,15	9,53	2,03
3	11	11,00	0,50
4	14,9	13,78	1,48
5	17,9	16,41	0,41
6	21,2	18,90	1,10
8	27,5	23,53	0,77
14	37,2	35,32	5,98
27	70	53,85	9,15
44	105	69,82	21,18

Dans la figure suivante on représente la tension du claquage mesurée et calculée en fonction de la distance inter électrode

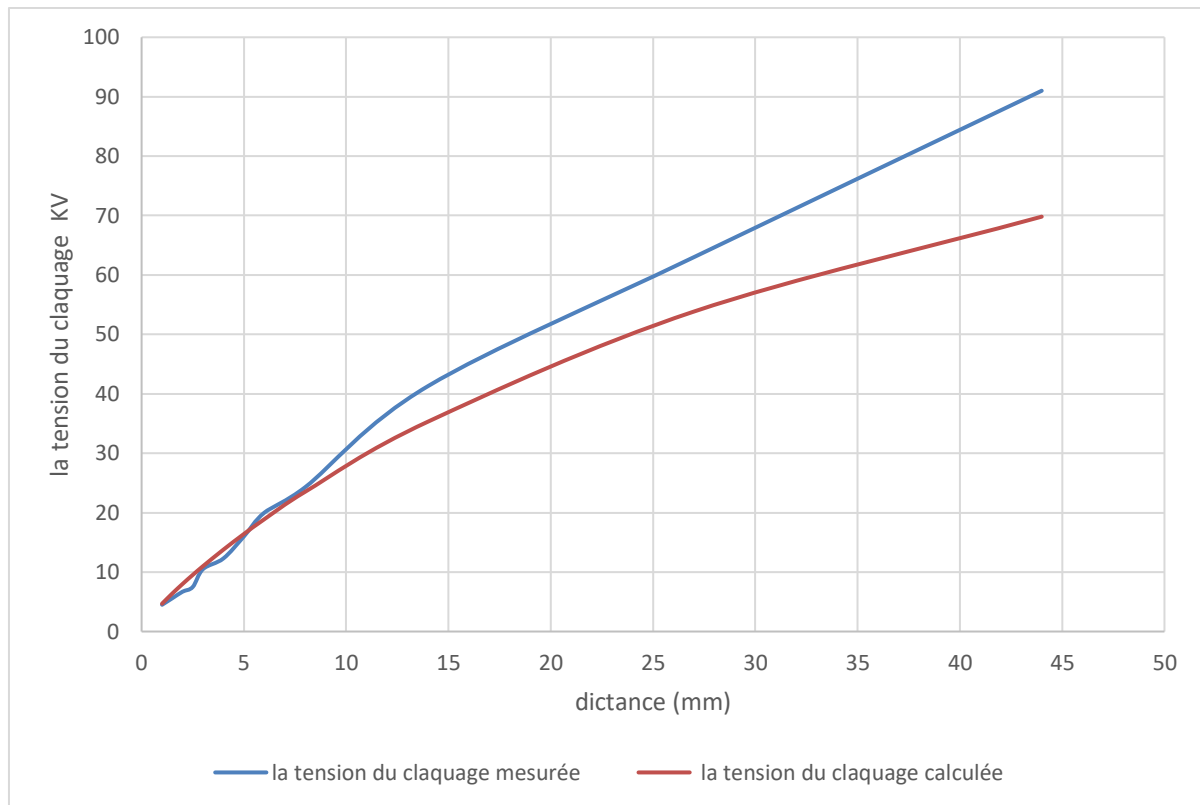
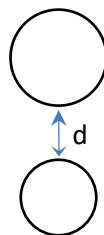


Figure III.05 : Tension de claquage en fonction de la distance inter électrodes Sphère-plan

La figure ci-dessus montre que plus la distance entre l'électrode augmente, plus la tension de claquage est élevée. Dans ce cas, il existe une différence relativement notable entre les valeurs mesurées et calculées. En effet, à une distance de 8 mm; Il y a une différence entre les mesures et le calcul. Cette différence augmente avec l'augmentation de la distance. Par exemple, nous avons une différence de 21 kV pour une distance de 44mm.

III.3.3. Configuration Sphère (grande) -Sphère (petit)

Le système d'électrode est constitué de deux Sphères non identiques une de diamètre $r = 50$ mm, et l'autre de diamètre $r = 25$ mm



Dans le tableau suivant on présente les tensions de claquage mesurées

Tableau III.3 : les tensions de claquage mesurées dans le cas Sphère (grande) -Sphère (petit)

Distance(mm)	Tension de claquage U_c (kV)
1	2,4
1,5	5,3
2	7,8
2,5	8,2
3	10,1
4	12,3
5	17,1
6	18,6
8	25,2
14	35,1
27	64
44	92

Dans la figure suivante on représente la tension du claquage mesurée en fonction de la distance inter électrode

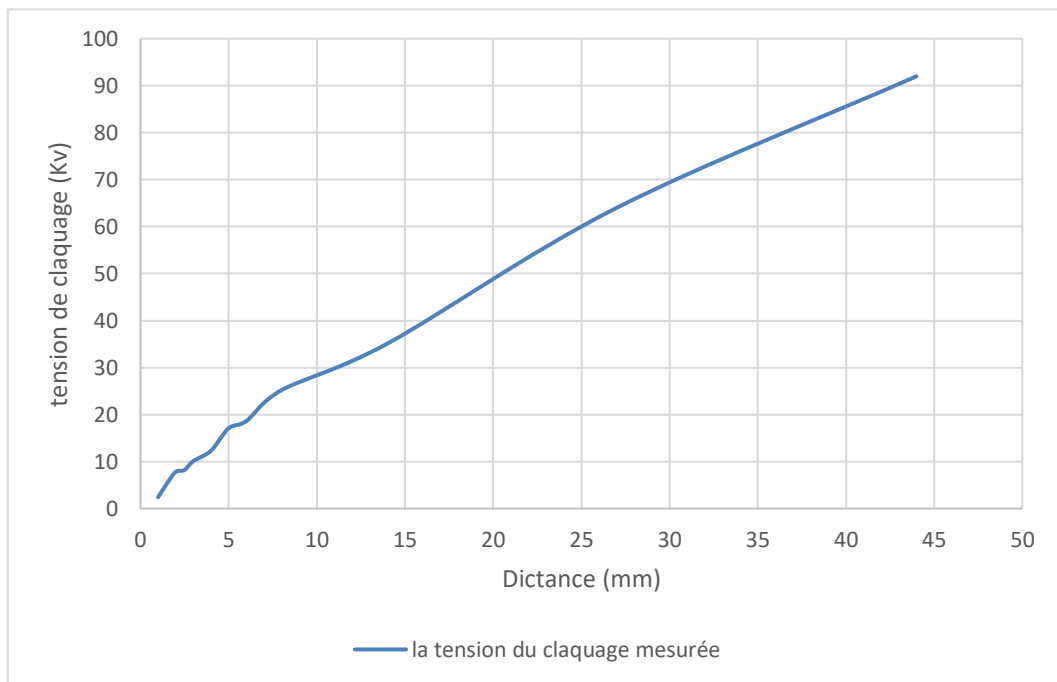
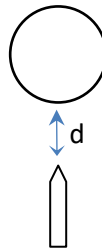


Figure III.06 : Tension de claquage en fonction de la distance inter électrodes Sphère- Sphère p

La figure ci-dessus montre que la tension de claquage augmente à mesure que la distance entre les électrodes augmente. On peut conclure du Tableau III.3 que la valeur de la rigidité diélectrique est proportionnelle à toutes les distances entre les électrodes, presque constante, et la valeur moyenne est de 3,02 kV/mm

III.3.4. Configuration Pointe – Sphère (grande)

Dans ce cas, le système d'électrode est constitué d'une sphère de rayon $r = 100$ mm et une tige pointe.



Dans le tableau suivant on présente les tensions de claquage mesurées

Tableau III.4: les tensions de claquage mesurées dans le cas Sphère (grande) – Pointe.

Distance(mm)	Tension de claquage $\hat{u}_c$ (kV)
1	4,6
1,5	5,9
2	6,2
2,5	7,3
3	8,1
4	9,1
5	11
6	12,1
8	12,5
14	16,7
27	26,1
44	38,5

Dans la figure suivante on représente la tension du claquage mesurée en fonction de la distance inter électrode

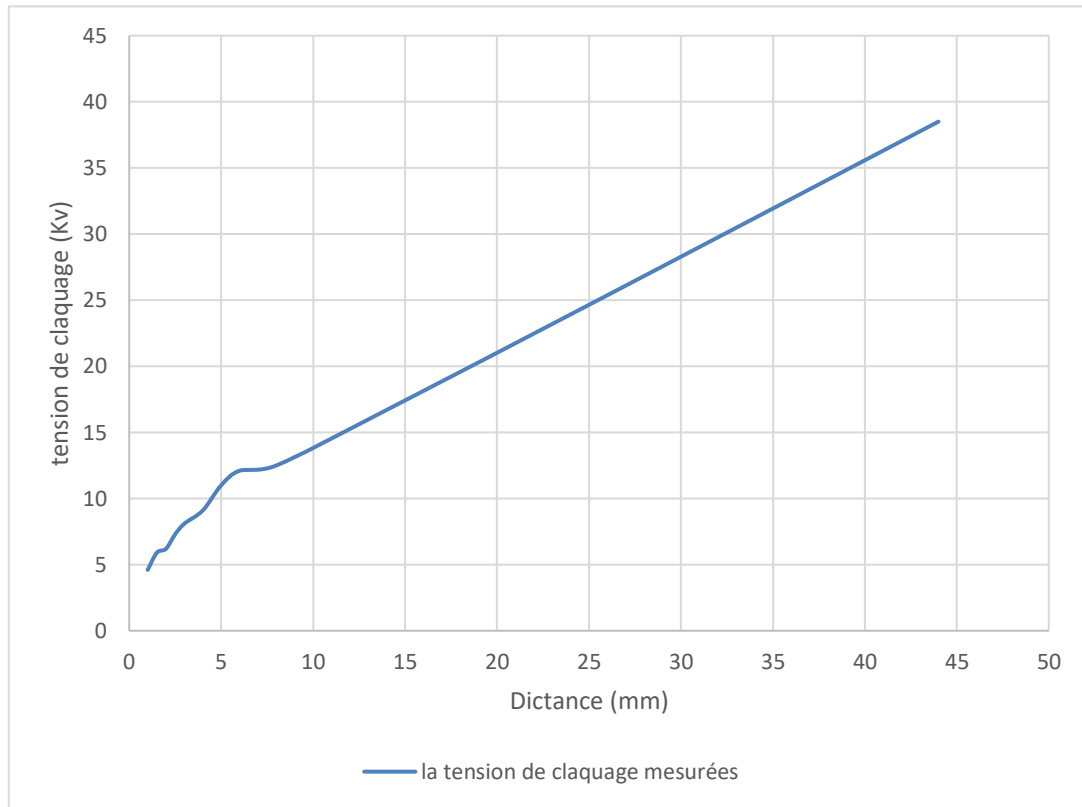


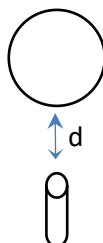
Figure III.07 : Tension de claquage en fonction de la distance inter électrodes pointe- Sphère

La figure ci-dessus montre que la tension de claquage augmente à mesure que la distance entre les électrodes augmente.

Cette configuration représente la simulation la parafoudre.

III.3.5. Configuration sphère – cylindre

Dans ce cas, le système d'électrode est constitué d'une sphère de rayon $r = 100$ mm et un cylindre



Dans le tableau suivant on présente les tensions de claquage mesurées

Tableau III.5: les tensions de claquage mesurées dans le cas Sphère (grande) – cylindre

Distance(mm)	Tension de claquage $\hat{u}_c$ (kV)
1	2,5
1,5	5,4
2	6,2
2,5	7,3
3	10,2
4	12
5	15,8
6	17,5
8	20,9
14	26,6
27	36,1
44	46,4

Dans la figure suivante on représente la tension du claquage mesurée en fonction de la distance inter électrode

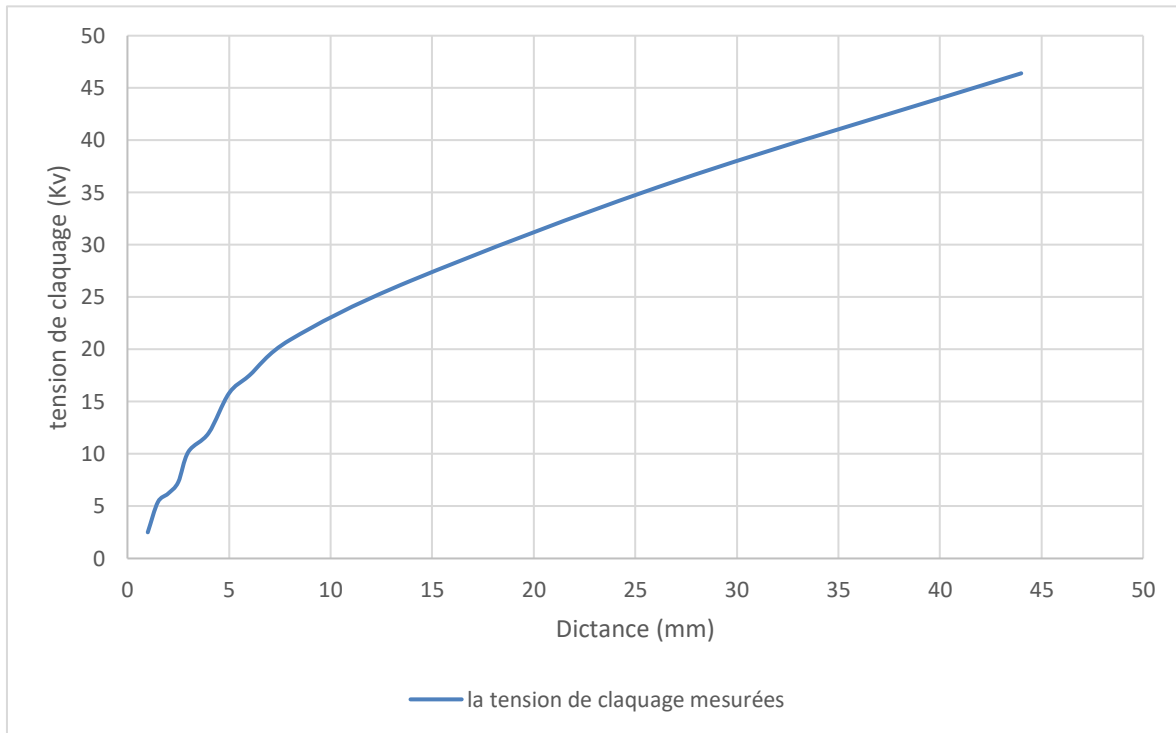


Figure III.08 : Tension de claquage en fonction de la distance inter électrodes Sphère-cylindre

La figure ci-dessus montre que la tension de claquage augmente à mesure que la distance entre les électrodes augmente. On peut conclure du Tableau III.5 que la valeur de la rigidité diélectrique est directement proportionnelle à la distance entre les électrodes.

Pour la même distance inter électrode, et afin de comparer la tension du claquage de l'air en fonction de la configuration du système d'électrodes, nous avons tracé la tension du claquage en fonction de la distance pour toutes les configurations.

Cette configuration représente la simulation de la Bougie d'allumage de voiture.

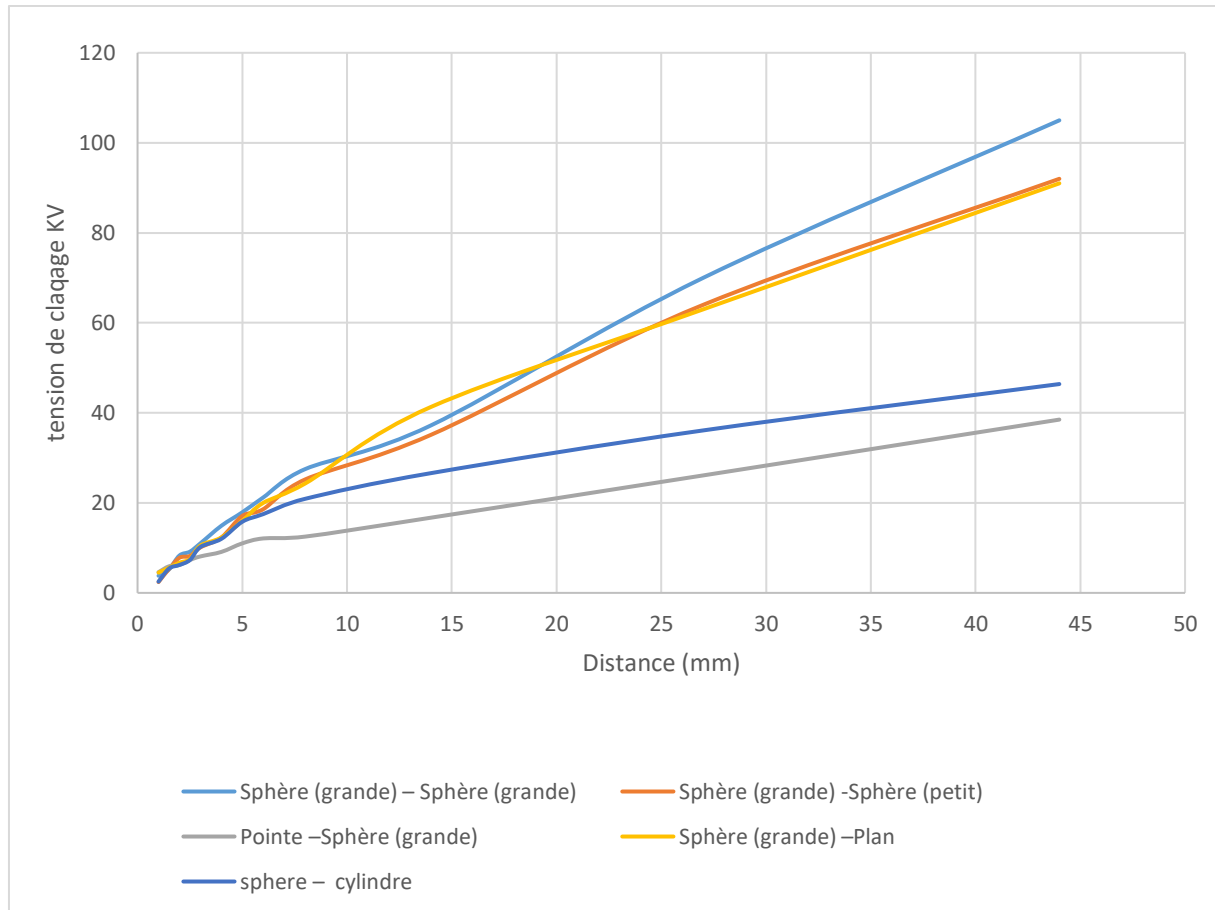


Figure III.09 : Tension de claquage en fonction de la distance inter électrode pour différente géométrie d'électrode.

Pour les cinq configurations, la figure ci-dessus montre que lorsque la distance entre les électrodes augmente, la tension de claquage augmente.

La géométrie des électrodes influe considérablement la tension du claquage. Pour la même distance l'intervalle d'air claque pour une tension relativement faible dans le cas du système électrodes pointe-sphère (grande) et sphère-cylindre à cause de la forte hétérogénéité. Cela est dû là l'effet de pointe (pouvoir des pointes). Dans ce cas, il y a une très grande concentration des lignes de champ électriques. La tension du claquage augmente dans les autres cas sphère-sphère, Sphère (grande) -Sphère (petit) et Sphère (grande) –Plan. Dans ces cas les lignes du champ ont relativement une répartition uniforme.

Si les électrodes ne sont pas identiques, la répartition du champ est d'avantage hétérogène par rapport au cas de deux électrodes identiques. Cela explique la croissance de la tension du claquage.

Afin de bien mettre en évidence l'influence de l'effet d'hétérogénéité, nous allons dans ce qui suit comparer la tension du claquage pour une même distance à savoir 27mm.

Dans la figure suivante on représente la tension de claquage mesurée pour chaque système où la distance est de 27mm entre les électrodes.

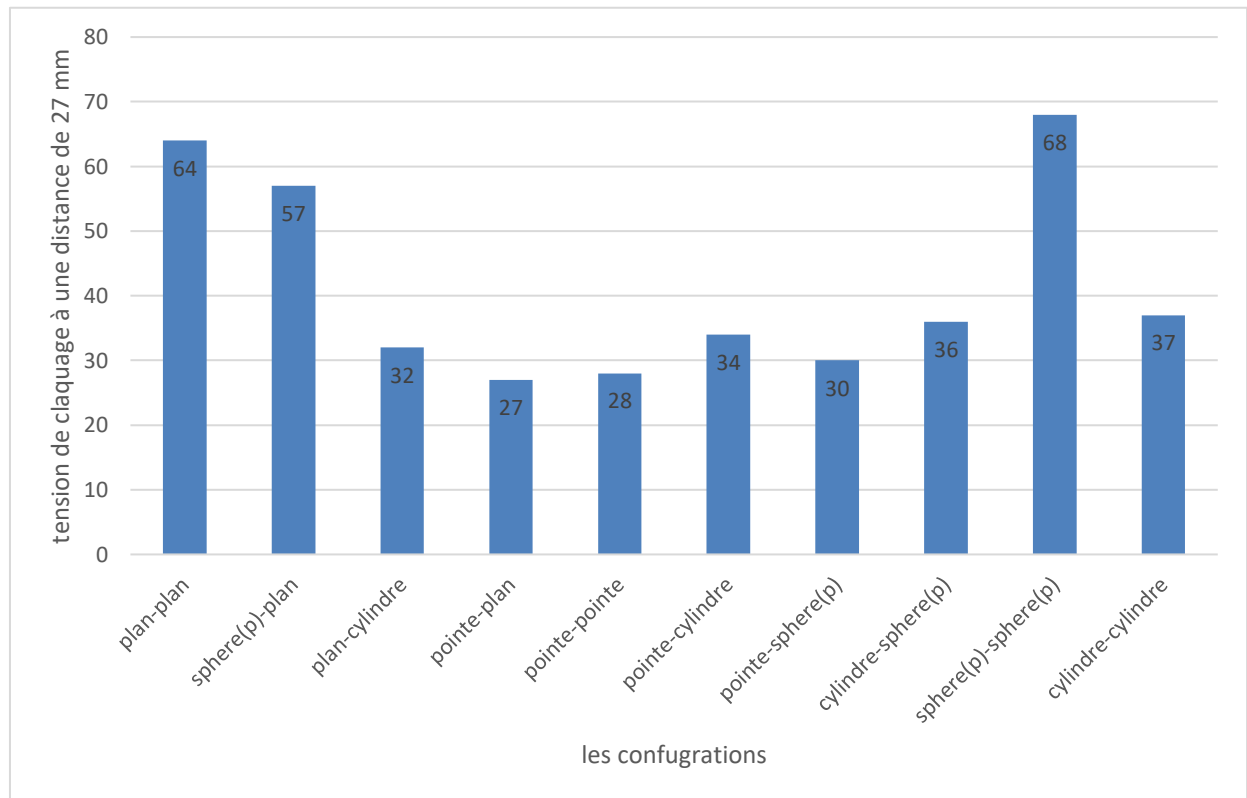


Figure III.10: : tension de claquage mesurée pour chaque système où la distance est de 27mm entre les électrodes.

L'effet d'hétérogénéité est bien clair. En effet nous avons une très forte hétérogénéité dans le cas de la configuration pointe-plan. Dans ce cas on enregistre une très faible tension du claquage. Dans le cas contraire, où une faible hétérogénéité se présente, le cas sphère-sphère petit modelé, on enregistre une très grande valeur du claquage.

La configuration plan-plan représente la simulation de condensateur.

III.4 Calcul par simulation du champ disruptif

En se basant sur la valeur de la tension du claquage, nous allons calculer le champ du claquage les différentes configurations en utilisant le logiciel Comsol. Aussi, nous avons simulé le système d'électrodes en deux dimensions pour faciliter l'étude.

Pour la simulation du système que nous voulons étudier, nous suivons les étapes suivantes

- Choisir un domaine d'études (électricité statique).
- Créez la géométrie des électrodes (la distance entre les électrodes est importante).
- Identification des matériaux (Le domaine constitué par l'air de permittivité epsilon égale à 1.)
- Donner la valeur de la tension de chaque électrode (tension de claquage à l'une des électrodes).
- Maillage de notre modélisation (Les mailles ont une forme triangulaire).
- Calculer l'étude sélectionnée.
- Présentation des résultats de l'étude sous forme de graphique.

Dans la figure suivante on représente la géométrie dans le cas de configuration sphère-cylindre.

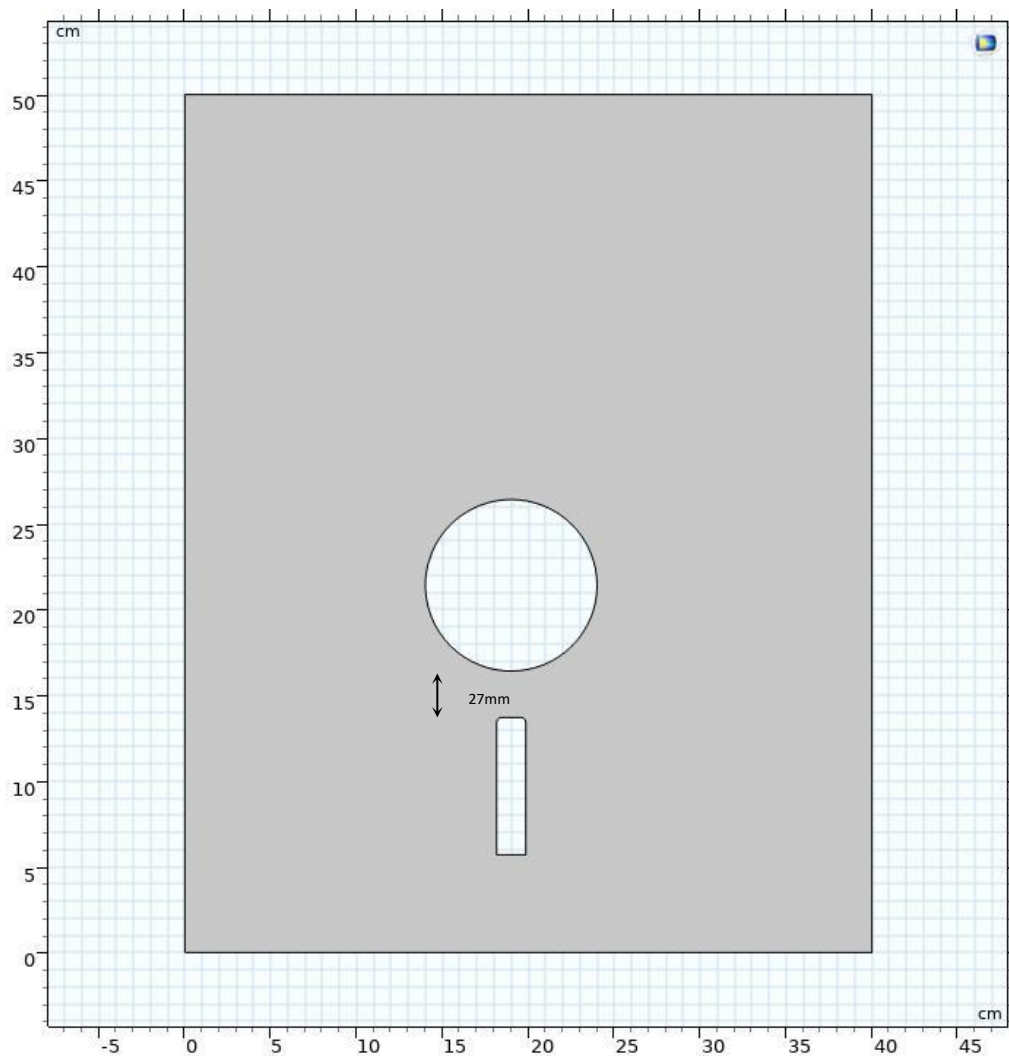


Figure III.11: Géométrie du système (sphere-cylinder).

- Paramètre de maillage :

Dimensions maximale de l'élément : 1 cm

Dimensions minimale de l'élément : 0.00375 cm

- La méthode de calcul utilise dans le logiciel Comsol est la méthode des éléments finis.

La figure suivante montre : Le maillage de la modélisation de système Sphère- Sphère P.

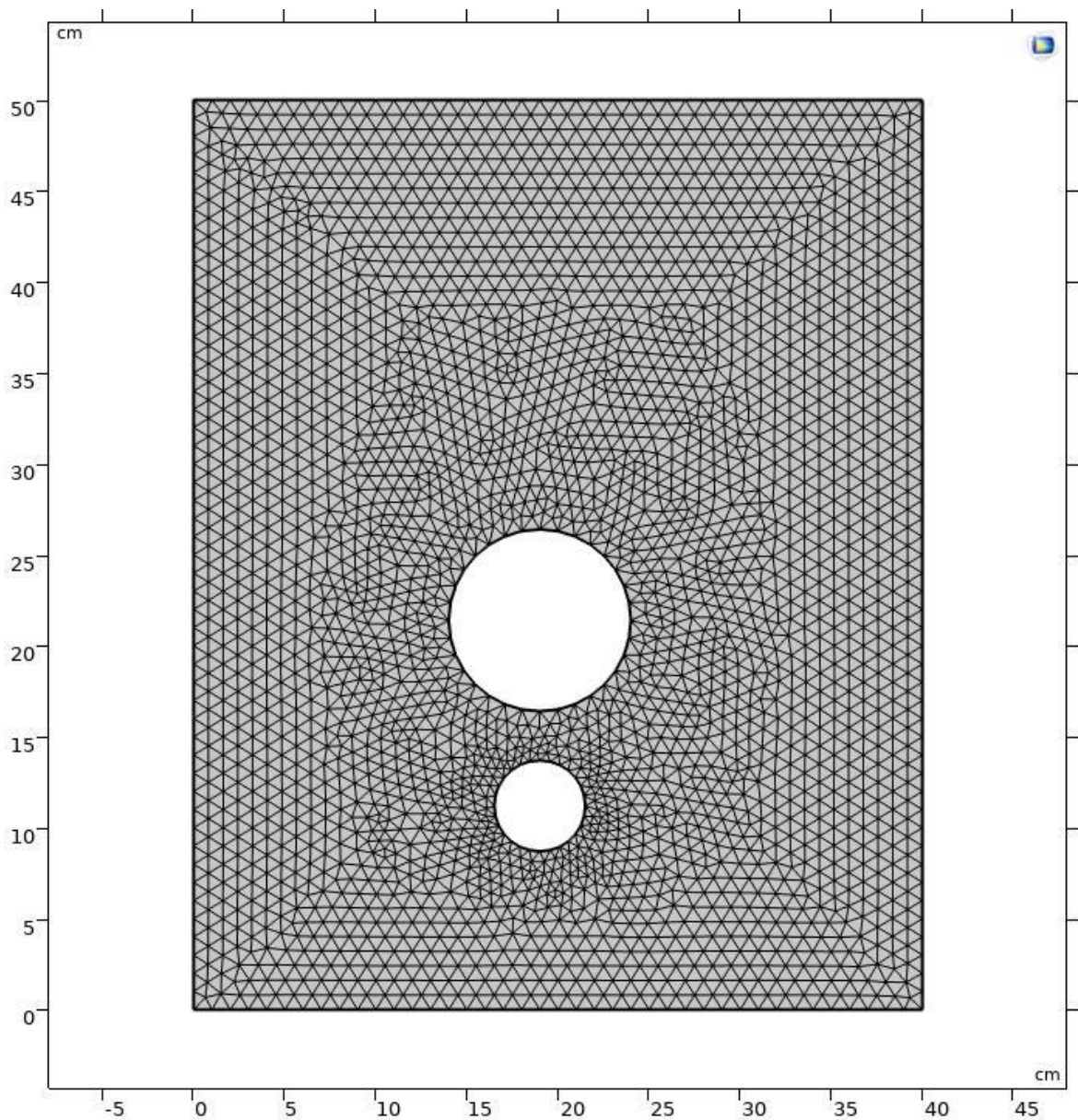


Figure III.12: Le maillage de la modélisation de système Sphère- Sphère P.

Afin de calculer le champ de claquage, nous avons fixé la distance entre les électrodes de chaque modélisation de 27 mm et entré la tension de claquage correspondant à cette distance. Le calcul par simulation nous permet d'avoir la distribution du champ électrique et nous pouvons obtenir facilement la valeur maximale du champ électrique. Qui correspond à la valeur disruptive.

- **Modélisation de la configuration sphère (grand) - sphère (grand)**

La figure ci-dessous montre la distribution des lignes du champ électrique et la valeur maximale du champ électrique de système sphere-sphere.

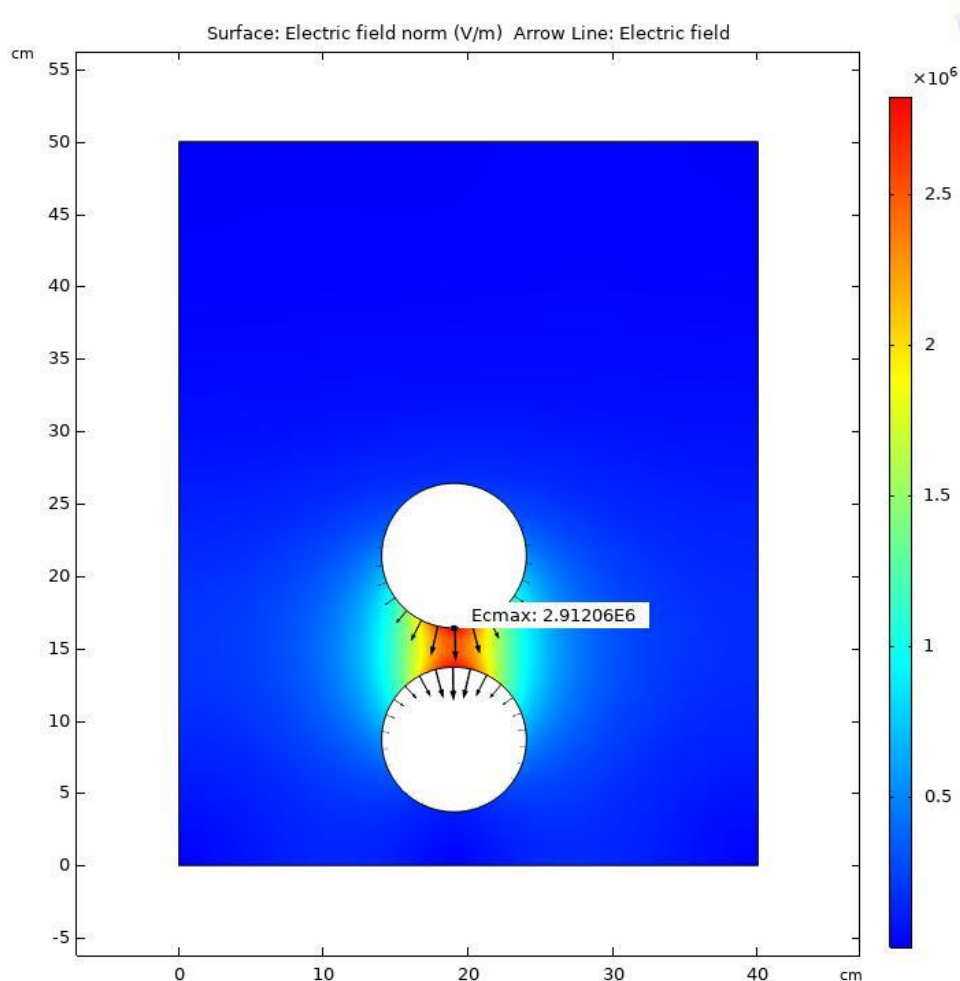


Figure III.13: Répartition la distribution champ dans le système sphère-sphère.

La figure ci-dessus montre une zone où la distribution du champ électrique est intense. Cette zone correspond aux points où le rayon de courbure est faible, c'est l'effet de point. Dans ce cas, la valeur du disruptif est 2.91 kV/mm

- **Modélisation de la configuration sphère (grand) - plan:**

La figure ci-dessous montre la distribution et les lignes du champ électrique et la valeur maximale du champ électrique de système sphère-plan.

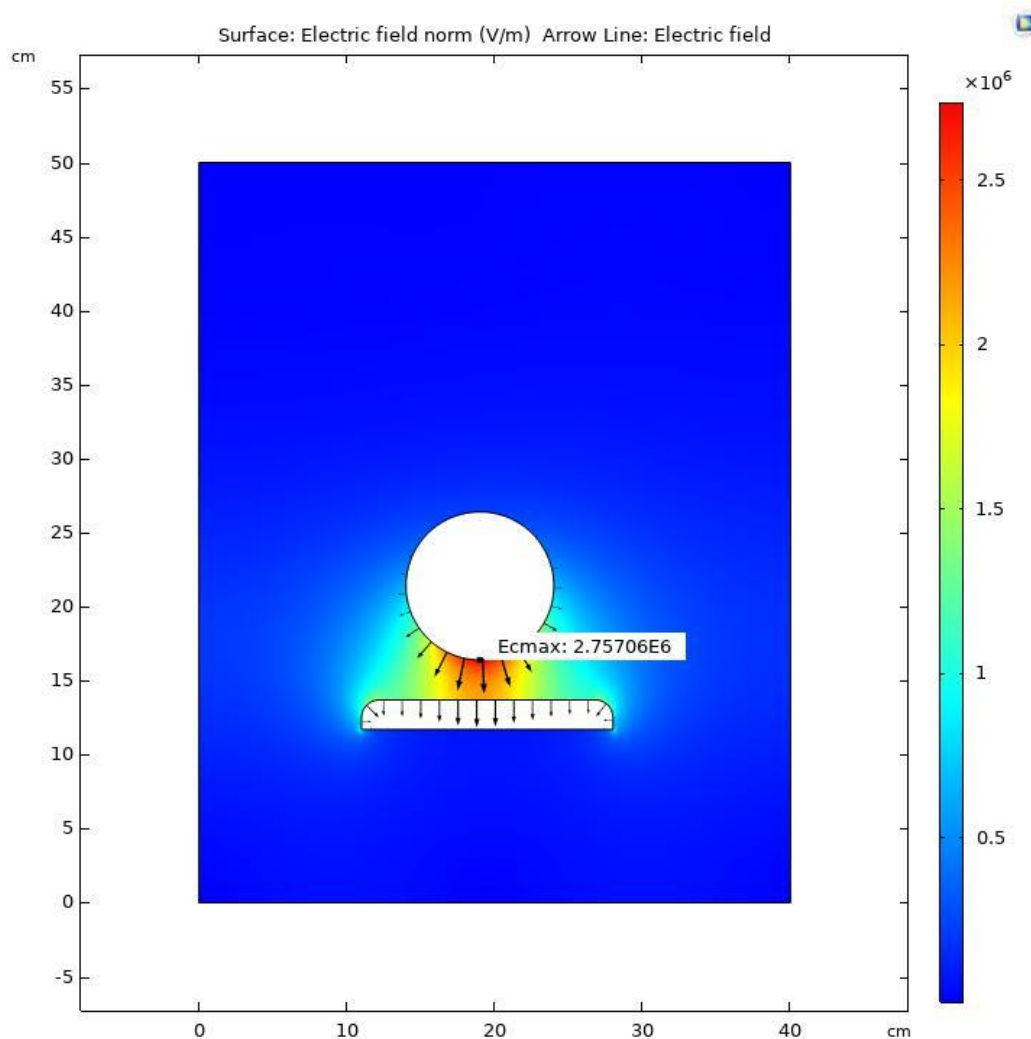


Figure III.14: Répartition la distribution de champ dans le système sphère-plan.

La figure ci-dessus montre la distribution du champ électrique intensément au point le plus bas de la sphère sur laquelle la tension a été appliquée, et nous voyons que la distribution du champ électrique est moins dans le centre plan et diminue progressivement sur les bords car le plan n'a pas de pointe acérée. Dans ce cas, la valeur du disruptif est 2.75 kV/mm

• **Modélisation de la configuration sphère (grand) - sphère (petit):**

La figure ci-dessous montre la distribution et les lignes du champ électrique et la valeur maximale du champ électrique de système sphère G- sphère P.

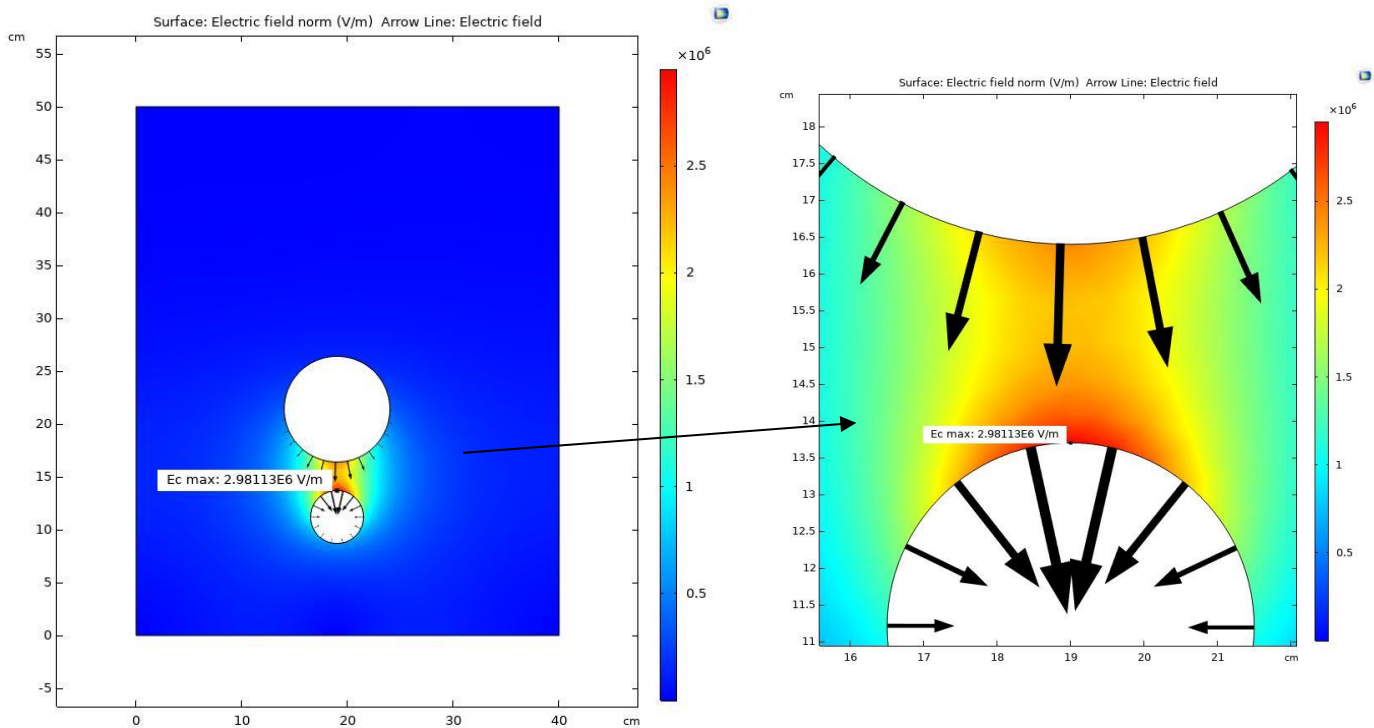


Figure III.15: Répartition la distribution de champ dans le système sphère G-sphère P.

La figure ci-dessus montre que la distribution du champ électrique est plus intense au niveau de la petite sphère à cause du faible rayon de courbure. Dans ce cas, la valeur du disruptif est 2.98 kV/mm.

• **Modélisation de la configuration sphère (grand) - pointe:**

La figure ci-dessous montre la distribution et les lignes du champ électrique et la valeur maximale du champ électrique de système sphère-pointe.

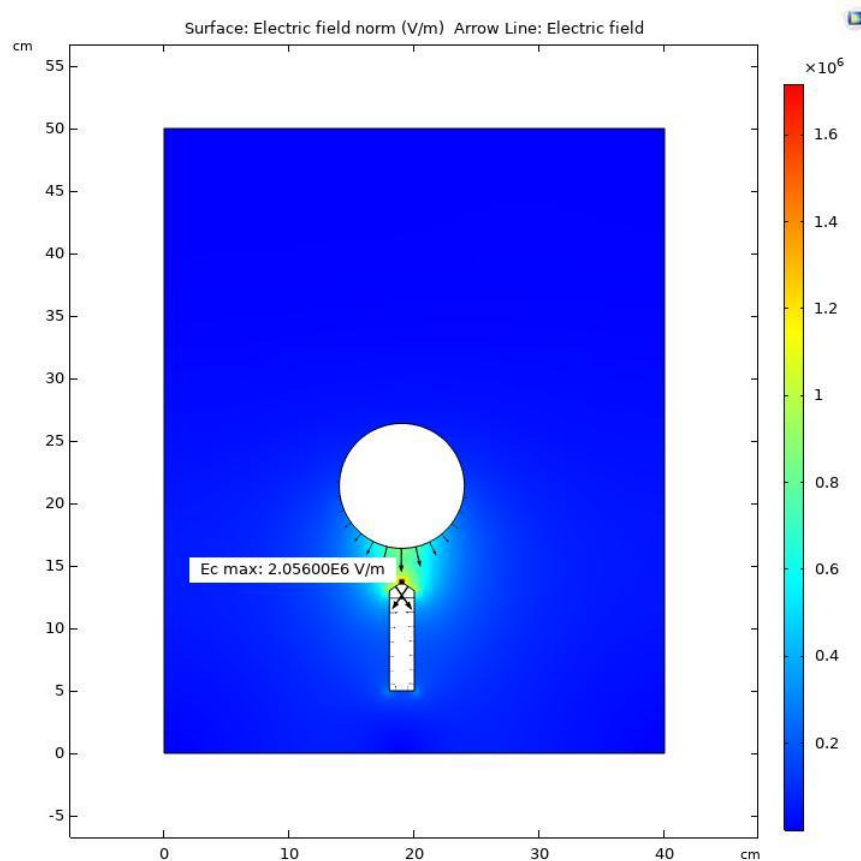


Figure III.16: Répartition la distribution de champ dans le système sphère G- pointe.

La figure ci-dessus montre clairement la forte distribution du champ électrique à la pointe, qui est une faible valeur du champ disruptif par rapport aux cas précédents. Dans ce cas, la valeur du disruptif est 2.05 kV/mm.

Modélisation de la configuration pointe - pointe:

La figure ci-dessous montre la distribution et les lignes du champ électrique et la valeur maximale du champ électrique de système pointe -pointe.

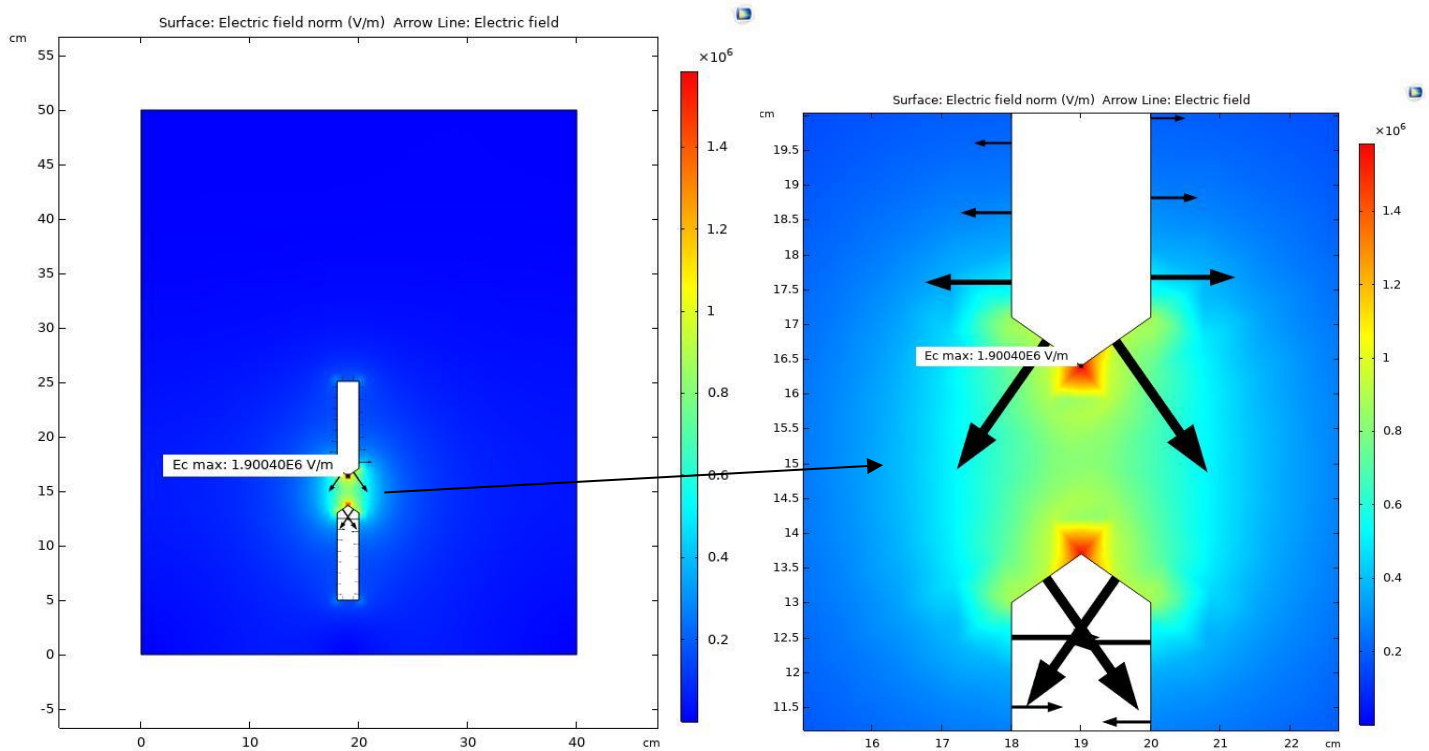


Figure III.17: Répartition la distribution de champ dans le système pointe- pointe.

L'effet de point est très clair dans ce cas. La valeur max du disruptif est 1.9 kV/mm.

Modélisation de la configuration sphère (grand) – cylindre :

La figure ci-dessous montre la distribution et les lignes du champ électrique et la valeur maximale du champ électrique de système sphère-cylindre.

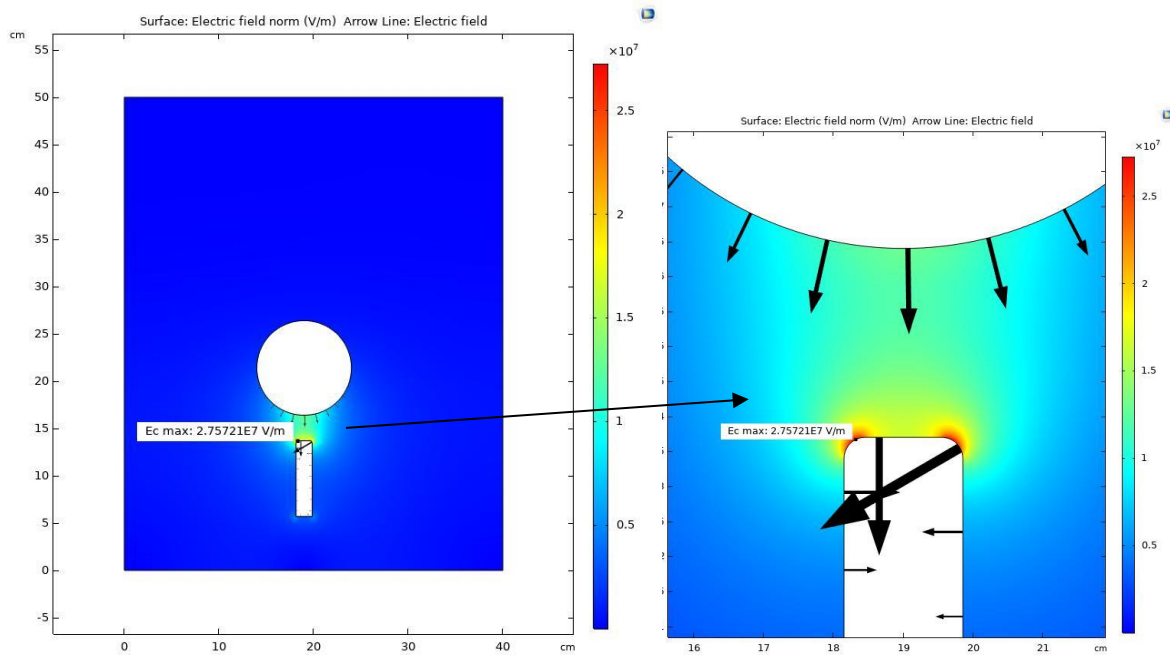


Figure III.18: Répartition la distribution de champ dans le système sphère G - cylindre.

La figure ci-dessus montre la distribution du champ électrique intensément aux bords supérieurs du cylindre. Dans ce cas, la valeur du disruptif est 2.75 kV/mm.

Modélisation de la configuration pointe – cylindre :

La figure ci-dessous montre la distribution et les lignes du champ électrique et la valeur maximale du champ électrique de système pointe -cylindre.

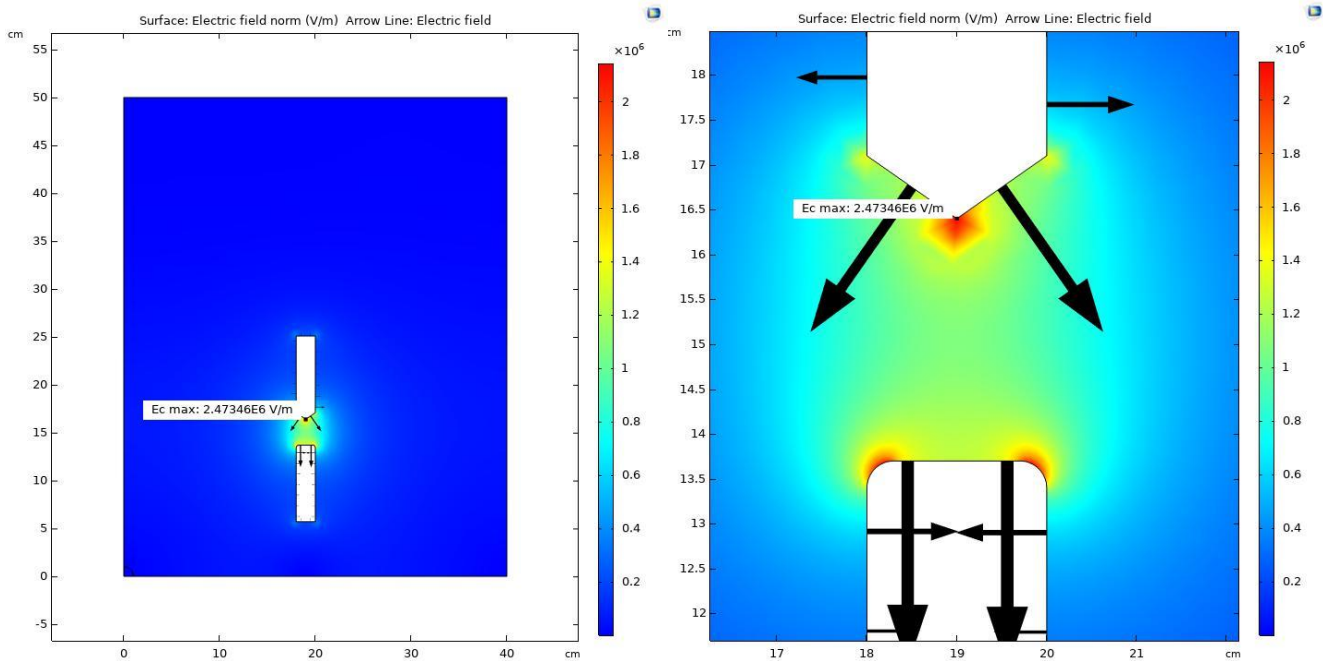


Figure III.19: Répartition la distribution de champ dans le système pointe - cylindre.

La figure ci-dessus montre la distribution du champ électrique intensément aux bords supérieurs du cylindre et le point. Dans ce cas, la valeur du disruptif est 2.47 kV/mm.

• **Rigidité diélectrique extraite de la simulation:**

Tableau III.6: les valeurs de champ disruptif pour déférente configuration

configuration	Distance	E disruptif kv/mm
sphère (grand) - sphère (grand)	27 mm	2.91
sphère (grand) – plan		2.75
sphère (grand) - sphère (petit)		2.98
sphère (grand) – pointe		2.05
Pointe-pointe		1.9
sphère (grand) – cylindre		2.75
Pointe-cylindre		2.47

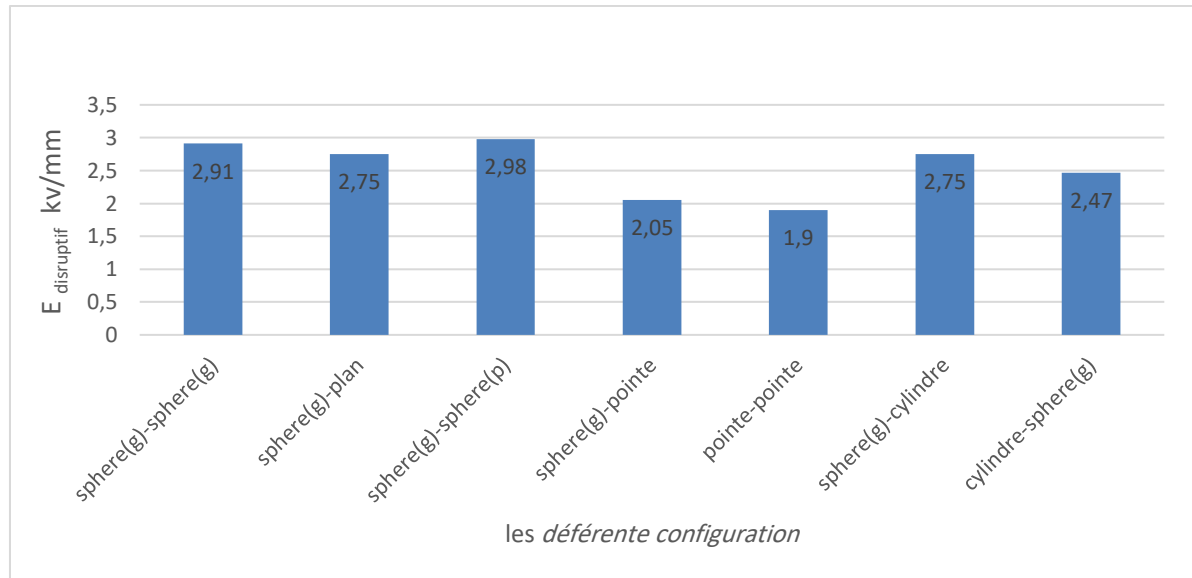


Figure III.20: les valeurs de champ disruptif pour déférente configuration.

L'effet d'hétérogénéité est bien clair. En effet nous une très forte hétérogénéité dans les cas de la configuration pointe-sphère et pointe-pointe. Dans ces cas on enregistre un très faible champ disruptif. Dans les cas contraires, ou une faible hétérogénéité se présente, les autres cas, on enregistre une très grande valeur du champ disruptif.

III.5 Conclusion

Enfin, à travers les résultats de mesure en laboratoire ou les résultats de calcul issus de la simulation, on peut dire que la tension de claquage de l'air de l'air ainsi que le champ disruptif sous tension alternative changent avec le changement de la distance entre les électrodes, et la géométrie des électrodes. La tension du claquage, et le champ disruptif augmente lorsque la distance augmente. Ces grandeurs caractéristiques de l'air diminuent davantage si les électrodes présentent plus d'hétérogénéité.

Il existe d'autres facteurs d'influence tels que la pression atmosphérique, la température et l'humidité.

Conclusion générale

Afin de transmettre une grande quantité de puissance, il est préférable d'augmenter la tension et diminuer le courant pour réduire la perte de puissance et le coût total de transmission. Cependant, la transmission à haute tension provoquera de nombreux phénomènes indésirables, tels que le claquage, contournement, effet de pointe... Afin d'étudier ces phénomènes, de la haute tension peuvent être générés en laboratoire. En fait, de nombreuses technologies et composants ont été développés pour générer de tension élevé de différentes formes. On peut citer les transformateurs élévateurs et les multiplicateurs de tension.

Ce travail nous a permis d'utiliser le matériel du laboratoire de recherche pour générer une haute tension. Ce qui nous a beaucoup aide à approfondir nos compréhensions dans le domaine de la haute tension et les phénomènes qui y sont associés. Elle nous a également permis de comprendre les mesures es de sécurité du personnel et des équipements.

Nous avons également utilisé le programme COMSOL Multiphysics pour simuler des phénomènes physiques. Nous avons eu une nouvelle expérience avec l'utilisation des logiciels de simulation et nous en avons extrait des résultats précis afin de pouvoir les comparer avec les résultats du laboratoire.

Nous extrayons de notre étude la notion d'effet d'hétérogénéité, nous avons une très forte hétérogénéité dans les cas avec configuration de pointe et de cylindre. Dans ces cas, un champ disruptif très faible est enregistré, de même que la tension de claquage. Dans les cas de configuration de sphère et de plan, où l'hétérogénéité est faible, on enregistre des importantes valeurs de champ disruptif et de la tension de claquage.

Comme perspective, nous proposons de prendre en compte les conditions atmosphériques de la mesure : Température, Pression et Humidité aussi facteurs liés à la fabrication du matériau.

Référence bibliographique

- [1] D. Benyoucef, *Cours: Techniques de la Haute Tension*. 2013. doi: 10.13140/2.1.4963.1040.
- [2] KADI Hocine, « Influence de l'effet couronne sur les surtensions dans les lignes et les transformateurs de haute tension », UNIVERSITE MOULOUD MAMMERI DE TIZI-OUZOU, TIZI-OUZOU.
- [3] « cours-techniques_de_la_haute_tension.pdf - Google Search ». https://www.google.com/search?client=firefox-b-d&q=cours-techniques_de_la_haute_tension.pdf (consulté le avr. 24, 2021).
- [4] « Claquage (électronique) », *Wikipédia*. déc. 22, 2020. Consulté le: avr. 25, 2021. [En ligne]. Disponible sur: [https://fr.wikipedia.org/w/index.php?title=Claquage_\(%C3%A9lectronique\)&oldid=177937942](https://fr.wikipedia.org/w/index.php?title=Claquage_(%C3%A9lectronique)&oldid=177937942)
- [5] « Diélectrique », *Wikipédia*. avr. 26, 2021. Consulté le: avr. 30, 2021. [En ligne]. Disponible sur: <https://fr.wikipedia.org/w/index.php?title=Di%C3%A9lectrique&oldid=182301639>
- [6] « [PDF] Cours en electricite haute tension | Cours electricite », *cours-gratuit.com*. <https://www.cours-gratuit.com/cours-electricite/cours-en-electricite-haute-tension/startdown> (consulté le avr. 24, 2021).
- [7] « Loi de Paschen », *Wikipédia*. mai 07, 2019. Consulté le: avr. 30, 2021. [En ligne]. Disponible sur: https://fr.wikipedia.org/w/index.php?title=Loi_de_Paschen&oldid=159069528
- [8] https://fr.wikipedia.org/wiki/Rigidit%C3%A9_di%C3%A9lectrique