

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



Mémoire de Fin d'Étude

Présenté à

L'Université Echahid Hamma Lakhdar d'El Oued

Faculté de Technologie

Département de Génie Electrique

En vue de l'obtention du diplôme de

MASTER ACADEMIQUE

Réseaux électriques

Présenté par

Boukhchache Zakaria et Mehda Lourabi

Thème

Mesure de la rigidité diélectrique d'un système éclateur à sphère

Soutenu le .. /05/2016. Devant le jury composé de :

Mr. Guia Talal	Maitre de conférences	Président
Mr. Khechekhouche Ali	Maitre de conférences	Rapporteur
Mr. Merazzega Ezzidine	Maitre de conférences	Examineur

Année Universitaire 2015/2016

REMERCIEMENT

Nous remercions Dieu le tout puissant de nous avoir prêté force patience et courage afin d'achever nos études en restant en bonne et parfaite santé.

Nous tenons à exprimer nos vifs remerciements à tous ceux qui ont contribué à élaborer ce modeste travail :

À monsieur Khechekhouche Ali notre encadreur pour ses conseils et directives.

À monsieur guia talal pour son aide.

Consacrer également ce travail à tous les amis, la famille et les proches.

Aux membres du jury qui on respecte leurs critiques et orientation.

Comme nous remercions profondément l'ensemble des enseignants qui ont veillé pour notre formation.

Et en fin nous remercions tous ceux qui nous ont aidés de près ou de loin pour mener à bien notre projet de fin de cycle.

Merci

Dédicace

Au-dessus de tout ce que je dédie ce travail tout mon cœur à l'esprit de la fin chère maman.

A fin d'étude je me permets de faire hommage de ce travail à tous qui m'ont aidé mes professeurs, mon encadreur « Mr. Khechekhouché Ali » pour sa modeste participation pour réaliser ce travail et d'avoir nous encadré.

Sans oublier mes parents et surtout ma fin chère maman et ma sœur « N.A.D.I.R.A » qui m'a guidé dans toutes les années et me donne toujours l'énergie pour réaliser mon but professionnel en avenir « Enchalah ».

Aussi à toute la famille : mes sœurs, mes frères j'aime beaucoup, je les souhaite la réussite dans la vie.

Je dédie ce travail à tous mes amis Belila Khaled, Mehda Lourabi, Ounissi Mounir, Djalel Cheriet, Fridjat Abdel sattar, Hamida Issam, Ounissi Anouar...etc.

Boukhchache Zakaria

Dédicace

Je dédie ce travail à :

- *Mes très chers parents, surtout ma mère qui était la source inépuisable de tendresse et qui m'a offert le soutien morale afin de réussir mes études*
- *Mes frères et et sœurs.*
- *M'ont aidé me professeur « Mr. Khechekhouché Ali »*
- *La fidèles amis dont citerais « Gater Chouayeb , Zidi yahya, Dahem Souhayeb, Jorni Med. Bachir , Mehda Badre Eldine , Mehda Mekdad , Mehda Issmaile , Bnine Bachire ».*
- *Mon partenaire: « Boukhchache Zakaria ».*
- *A tout la promotion 2016.*

Mehda Lourabi

Abstract

In this work to simulate the air breakdown voltage experimentally in high voltage laboratory, standard diameter of 10 Cm spheres are used for measurement of air breakdown voltages and electric field of the high voltage equipments. The above experiment is conducted at the normal temperature and pressure. Finite element method is also used for finding the electric field between standard sphere electrodes. The relative air density factor and maximum electric field are measured in MATLAB environment for different temperature and pressure. The electric field distribution for sphere gap arrangements is also calculated with the help of COMSOL. In addition the influence of the humidity on air breakdown test has been also considered in this study. Humidity correction factor also considered in this work for maintain constant air breakdown voltage. Finally, the experimental result has been compared with theoretical, and simulation results.

Résumé

Dans ce travail, pour simuler la tension de claquage de l'air expérimentalement en laboratoire haute tension, diamètre standard de 10 cm sphères sont utilisées pour la mesure des tensions de claquage de l'air et le champ électrique des équipements de haute tension. L'expérience ci-dessus est conduite à la température et à la pression normale. Méthode des éléments finis est également utilisée pour trouver le champ électrique entre les électrodes sphériques normalisées. Le facteur de densité relative de l'air et le champ électrique maximal sont mesurés dans MATLAB pour la température et la pression différente. La distribution du champ électrique pour les arrangements d'électrode de sphère est également calculée à l'aide de COMSOL. En outre, l'influence de l'humidité sur le test de répartition de l'air a également été prise en compte dans cette étude. Correction de l'humidité également pris en compte dans ce travail pour maintenir constante la tension de claquage de l'air. Enfin, le résultat expérimental a été comparé avec les résultats théoriques, et de simulation.

الملخص

في هذا العمل سنقوم بقياس جهد انكسار عازلية الهواء والحقل الكهربائي تجريبيا في مخبر الجهد العالي (مخبر جامعة الوادي). نستخدم في هذه التجربة كرتين قطرهما 10 سم ويتم قياس الجهد والحقل الكهربائي بين أقطابهما. حيث أجريت التجربة في درجة حرارة عادية وضغط عادي. أيضا يتم استخدام طريقة العناصر المحددة للعثور على الحقل الكهربائي وعامل كثافة الهواء بين أقطاب الكرات وذلك من خلال برنامج (ماتلاب) وبالتحديد في تطبيق (كمصول). بالإضافة الى ذلك يتم اختبار تأثير الرطوبة ومعامل تصحيح الرطوبة على الجهد. وأخيرا يتم مقارنة النتائج العملية والنظرية والمحاكاة.

Liste des figures

Chapitre I

Tension de claquage des matériaux diélectrique

- Fig. I.1.Schéma d'une cellule pour l'établissement de la loi de Paschen.....(4)
- Fig. I.2.Courbe de Paschen pour l'air en échelles logarithmiques, Température 20°C..(5)
- Fig. I.3.Courbe de Paschen pour le SF6 en échelles logarithmiques,Température 25°C(6)
- Fig. I.4.Premier coefficient de Townsend pour divers gaz.....(7)
- Fig. I.5.arrangement d'électrode pointe-pointe.....(10)
- Fig. I.6.arrangement d'électrode pointe-plan.....(11)
- Fig. I.7.arrangement d'électrode plan-plan.....(12)
- Fig. I.8.électrode sphère-sphère vertical.....(13)
- Fig. I.9.électrode sphère-sphère horizontal.....(14)
- Fig. I.10.arrangement d'électrode sphère- sphère.....(14)
- Fig. I.11.arrangement d'électrode. sphère- plan.....(15)

Chapitre II

Etude Expérimentale

- Fig.II.1. Panneau de contrôle utilisé pour effectuer le test de tension de l'air.....(17)
- Fig.II.2. Transformateur à haute tension utilisé pour l'essai de claquage de l'air.....(18)
- Fig.II.3. Montage expérimental en haute tension laboratoire d'essai pour l'étude de la tension de claquage de l'air en utilisant la méthode éclateur à sphère.....(20)

Chapitre III

Résultats et Discussions

- Fig.III.1.Comparaison entre sphère-gap et la tension de claquage expérimentale, simulation et théorique.....(30)**
- Fig.III.2.Comparaison des résultats expérimental, théoriques et simulation de la distribution du champ électrique pour le système sphère-sphère ($\varphi = 10\text{cm}$) différentes écartement des électrodes.....(30)**
- Fig.III.3.Variations du rayon de sphère avec la tension de claquage.....(31)**
- Fig.III.4.La distribution du champ électrique avec variation du rayon de sphère.....(32)**
- Fig.III.5.Variation de la température en fonction du facteur de densité relative avec simulation.....(33)**
- Fig.III.6.Variation du champ électrique en fonction de température.....(33)**
- Fig.III.7.La relation entre la température négative et champ électrique maximale.....(34)**
- Fig.III.8.Facteur de densité relative de l'air en fonction de pression.....(35)**
- Fig.III.9.Champ électrique maximal en fonction de la pression.....(36)**
- Fig.III.10.La relation entre l'humidité et la tension de claquage.....(37)**
- Fig.III.11. la relation entre l'humidité et le facteur de correction de l'humidité.....(38)**
- Fig.III.12.Tension de claquage en fonction de distance entre l'électrode pour différentes systèmes.....(39)**
- Fig.III.13.Electrode sphère-sphère dans les simulations en utilisant COMSOL.....(40)**
- Fig.III.14.Le champ électrique entre l'électrode sphère-sphère dans les simulations.....(40)**
- Fig.III.15.Répartition du champ électrique maximale entre les électrodes sphériques en utilisant la méthode des éléments finis.....(41)**
- Fig.III.16.Distribution du champ électrique maximale en fonction de distance inter-électrodes.....(41)**

Liste des Tableaux

Chapitre I

Tension de claquage des matériaux diélectrique

Tableau 1 : Minimum de Paschen.....(6)

Chapitre III

Résultats et Discussions

Tableau 1: Valeurs mesure de tension de claquage et le champ électrique entre les sphères.....(29)

Tableau 2 : mesure de la tension de claquage et le champ électrique entre les sphères....(32)

Tableau 3 : Facteur de densité relative de l'air et champ électrique maximum pour différentes températures.....(32)

Tableau 4: mesure de champ électrique maximale pour température négative.....(34)

Tableau 5: Facteur de densité relative de l'air et le champ électrique maximale pour des différentes pressions.....(35)

Tableau 6 : Tension de claquage pour différente l'humidité.....(36)

Tableau 7 : Facteur de correction d'humidité pour différente humidité.....(37)

Tableau 8 : Mesure de la tension de claquage dans différents systèmes en pratique.....(38)

Liste des symboles

J_s : Courant de saturation.

α : Premier coefficient de Townsend.

γ : Deuxième coefficient de Townsend.

ϵ^r : La permittivité relative.

P_{cc} : La résistance en tension continue.

$\text{tg}\delta$: Le facteur de pertes diélectriques en tension alternative.

E_r : La rigidité diélectrique.

E_d : La décharge disruptive ou claquage.

h : L'humidité.

E_{moy} : Le champ électrique moyenne .

V : La tension appliqué.

A : La distance inter-électrode.

E_{max} : Le champ électrique maximal.

S : Ecart espacement situés entre électrodes.

δ : Le facteur de densité de l'air.

P : La pression atmosphérique.

t : la température.

r : le rayon de l'électrode.

B : Le rayon entourant le cylindre métallique.

C : Un facteur.

K : Facteur de correction de l'humidité.

SOMMAIRE

Introduction générale.....(1)

Chapitre I

Tension de claquage des matériaux diélectrique

I-1.Introduction.....(3)

I-2.Tension de claquage dans les gaz.....(3)

I-3. Tension de claquage d'air.....(8)

I-4.Tension de claquage des diélectriques liquides.....(8)

I-5.Tension de claquage des diélectriques solides.....(9)

I-6.Défférente systèmes en haute tension(10)

 I-6-1.Système pointe-pointe.....(10)

 I-6-2.Système pointe-plan.....(11)

 I-6-3.Système plan-plan.....(12)

 I-6-4.Système sphère-sphère.....(13)

 I-6-5.Système sphère- plan.....(14)

I-7.Conclusion.....(15)

Chapitre II

Etude Expérimentale

II-1.Introduction.....(16)

II-2.Appareil requis pour la mesure de tension de claquage.....(16)

II-3.Description de l'équipement utilisé pour la mesure de tension de claquage de l'air..(16)

 II-3-1.Panneau de contrôle.....(16)

 II-3-2.Disjoncteur.....(17)

 II-3-3.Transformateur à haute tension.....(18)

 II-3-4.Filtre à haute tension.....(19)

 II-3-5.diviseur de tension.....(19)

II-4. Procédure expérimentale pour la nécessaire de la tension de claquage de l'air.....(19)
II-5. Etude théorique de tension de claquage d'air.....(21)
II-6. Etude de simulation de tension de claquage d'air.....(24)
II-7. Méthode des éléments finis pour champ électrique.....(25)
II-8. Effet de l'humidité sur la tension de claquage d'air.....(27)
II-9. Effet de Facteur de correction de l'humidité de la tension de claquage.....(28)
II-10. Conclusion.....(28)

Chapitre III

Résultats et Discussions

III-1. Introduction.....(29)
III-2. Résultats et discussions.....(29)
 III-2-1. Effets de la distance entre les sphères sur la tension et le champ électrique maximale(29)
 III-2-2. Effets de diamètre de sphère sur la tension de et le champ électrique maximale.....(31)
 III-2-3. Effets de la température l'atmosphérique sur le facteur de densité relative de l'air et le champ électrique maximale.....(32)
 III-2-4. Effets de la température négative sur le champ électrique maximale.....(34)
 III-2-5. Effets de la pression sur le facteur de densité relative et le champ électrique maximale.....(35)
 III-2-6. Effets d'humidité sur la tension de claquage.....(36)
 III-2-7. Effets d'humidité sur le facteur de correction de l'humidité.....(37)
 III-2-8. Mesure de la tension de claquage pour différents systèmes d'électrodes.....(38)
III-3. Conclusion.....(42)
Conclusion générale.....(43)

Bibliographie



Introduction Générale

Introduction générale

La croissance rapide du secteur de l'énergie de la nation a donné l'occasion aux ingénieurs de puissance pour protéger l'équipement de puissance pour un fonctionnement fiable pendant leur durée de vie. On a vu des études menées par des ingénieurs de puissance que l'un des problèmes principaux de équipements en haute tension (HT) est la dégradation de l'isolation à savoir, la qualité de l'isolation des équipements de puissance. Comme les équipements électriques à haute tension sont principalement soumis à contraintes coups de tension, une action de commutation, un dispositif de protection est utilisé pour déterminer la distance de sécurité nécessaire pour le niveau d'isolation. Les éclateurs à sphère de configuration différente sont couramment utilisés à cet effet [2-5].

Les éclateurs à sphère sont utilisés pour les mesures de valeurs de crête des tensions élevées et ont été adoptées par la CEI et IEEE en tant que dispositif d'étalonnage. De nombreux matériaux sont utilisés pour fabriquer des sphères comme l'aluminium, l'acier, le laiton, les alliages légers, le bronze et le cuivre. La résistance de claquage électrique d'un espace à isolation gazeuse entre deux électrodes métalliques peut être considérablement améliorée lorsque l'un ou les deux des électrodes sont recouvertes d'un revêtement diélectrique. L'effet du revêtement dépend de la forme de l'électrode, la polarité de tension, pré-charge et de la durée et la forme de la tension appliquée [7]. Au cours des dernières décennies, grande quantité de travail de recherche a été fait pour comprendre les caractéristiques fondamentales de claquage électrique. Par conséquent, le claquage électrique caractéristique du petit espace d'air sous la différente tension appliquée à sa grande importance pour la conception de la ligne aérienne, l'équipement de sous-station et de divers équipements HT d'air isolé. Dans cette étude pour simuler la tension de claquage de l'air expérimentalement en laboratoire haute tension au (Université de El-Oued), Des sphères de diamètre 10 cm en aluminium sont utilisé pour la mesure des tensions de claquage de l'air et le champ électrique des équipements de haute tension. L'expérience ci-dessus est conduite à la température et à la pression normale. En outre, l'influence de l'humidité sur le test de répartition de tension a également été prise en compte dans cette étude. La simulation d'une telle tension de claquage de l'air a été effectuée dans MATLAB. Enfin, le résultat expérimental a été comparé avec les résultats théoriques, et de simulation.

Le principal objectif de la thèse est :

- Mener l'expérience pratique de la tension de claquage de l'air dans le laboratoire haute tension, étude théorique, comprendre les caractéristiques de performance de la tension de claquage de l'air.
- Trouver la tension de claquage de l'air et le champ électrique en fonction de l'espace entre les électrodes sphériques.
- Utilisant la méthode des éléments finis pour la comparaison entre toutes les études.
- Étudier les caractéristiques de performance de la tension de claquage de l'air et le champ électrique par rapport au rayon des sphères et de l'humidité.
- Analyser les effets critiques du champ électrique maximal et le facteur de densité relative d'air avec l'effet de la température et de la pression atmosphère. Retrouver également le facteur de correction d'humidité.
- Pour observer l'efficacité du champ électrique maximal entre les deux électrodes sphériques normalisées en utilisant la méthode des éléments finis.

A large, horizontally-oriented oval with a light orange gradient and a thin dark orange border, centered on a white background.

CHAPITRE I

I-1.Introduction :

Dans les matériaux isolants électrons de valence sont étroitement liés à leurs atomes. Cependant, les isolateurs ne peuvent pas résister à des quantités indéfinies de tension. Avec suffisamment de tension appliquée, toute matière isolante finira par succomber à la «pression» électrique et le flux d'électrons se produira. Un isolateur est également appelé en tant que diélectrique, est un matériau qui résiste à l'écoulement de la charge électrique. Ces matériaux sont utilisés dans les équipements électriques comme isolants. Leur fonction est de soutenir ou de conducteurs électriques séparés sans laisser de courant à travers eux-mêmes [2]. Tension de claquage est connue comme une caractéristique d'un isolant, il peut définir la différence de tension maximale qui peut être appliquée sur le matériau avant que les conduites d'isolant et des effondrements. Tension de claquage est également appelée la «tension frappante» [7]. Les tensions de claquage de matériaux isolants sont divisées en quatre types comme l'air, des gaz, des liquides et des solides.

I-2.Tension de claquage dans les gaz :

Les gaz constituent un des éléments de base de l'isolation à haute tension des matériels électriques.

De tout temps, les bonnes qualités isolantes de l'air ont été utilisées aussi bien dans les applications de l'électricité statique que dans l'isolation des lignes aériennes.

Dans ces dernières décennies, la nécessité de diminuer sensiblement les dimensions des installations électriques pour des questions d'encombrement et de coût a conduit à recourir à d'autres gaz isolants tels que l'azote, le CO₂, le fréon et surtout l'hexafluorure de soufre (SF₆).

Parallèlement, malgré des difficultés pratiques importantes, on a utilisé les bonnes caractéristiques isolantes du haut vide ($10^{-5} - 10^{-7}$ ' mm Hg) dans la technique de coupure (disjoncteurs, relais Reed) [1].

Le comportement des isolants gazeux en haute tension doit être étudié dans deux buts:

- éviter le développement d'arcs, ou si cela n'est pas possible, limiter ses effets (distances d'isolement, cornes et raquettes d'amorçage en parallèle avec des chaînes ou des fûts d'isolateurs, interrupteurs, disjoncteurs, fusibles, etc.).

- connaître la physique des amorçages d'arc dans les gaz afin de faciliter leur amorçage dans les applications particulières (éclateurs d'amorçage de générateurs de choc, éclateurs de protection, para surtensions, parafoudres, tubes fluorescents, soudure électrique, électroérosion, etc.).

Les théories exposées ci-dessous sont valables pour des cas de décharges dans des gaz situés entre des électrodes planes-parallèles. Dans le cas d'électrodes de forme géométriques différentes, on recouvrera avantageusement à des facteurs de forme.

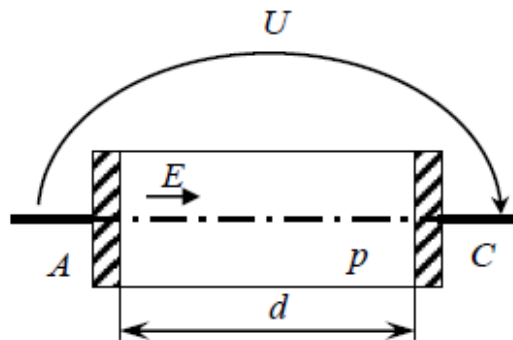
On étudiera tout d'abord séparément la décharge disruptive à basse pression ($< 0,1 \div 1$ atm. théorie de Townsend, puis à haute pression (> 1 atm, (plasma d'arc)).

Ces études seront faites dans le cas de distances d'éclatement (ou inter électrodes) courtes (max. 1 m.), l'extension de la théorie aux longs arcs étant traitée séparément.

Dans les gaz, les phénomènes de conduction sont du type ionique, c'est-à-dire qu'ils apparaissent si des ions positifs, négatifs et des électrons sont présents.

Loi de Paschen:

Le critère d'amorçage d'une décharge indépendante, correspondant à tous les cas d'amorçage de décharges disruptives courantes dans les phénomènes haute tension, fait l'objet de la loi de Paschen. Cette loi établit la relation liant la tension disruptive du gaz en fonction du type de gaz, de la géométrie et des conditions atmosphérique (p, t, h) (figI.1)[1].



p pression (N/m)

E champ électrique homogène

d distance inter électrode

entre l'anode (A) et la cathode (C)

Fig. I.1. Schéma d'une cellule pour l'établissement de la loi de Paschen.

La conduction du courant électrique dans les gaz est liée au déplacement d'ions positifs et d'électrons négatifs à l'intérieur de celui-ci sous l'effet du champ électrique E.

Les conditions qui déterminent l'intensité du courant sont:

- Si le gaz est non ionisé, aucun courant ne circule.
- Si le gaz est uniquement ionisé par les électrons négatifs dus a rayonnement cosmique ou à la radioactivité, le courant est de l'ordre de 10^{-15} (A) (décharge dépendante).
- Si le phénomène d'émission d'électrons secondaires négatifs entraînant un phénomène d'avalanche apparaît, le courant augmente fortement (décharge indépendante).

Courbes de Paschen :

Les figures I.2 et I.3 présentent les courbes de Paschen, respectivement pour l'air et le SF₆.

En comparant les figures I.4 et I.5 dans des conditions identiques, on constate que la rigidité diélectrique du SF₆ est environ trois fois plus élevée que celle de l'air [1].

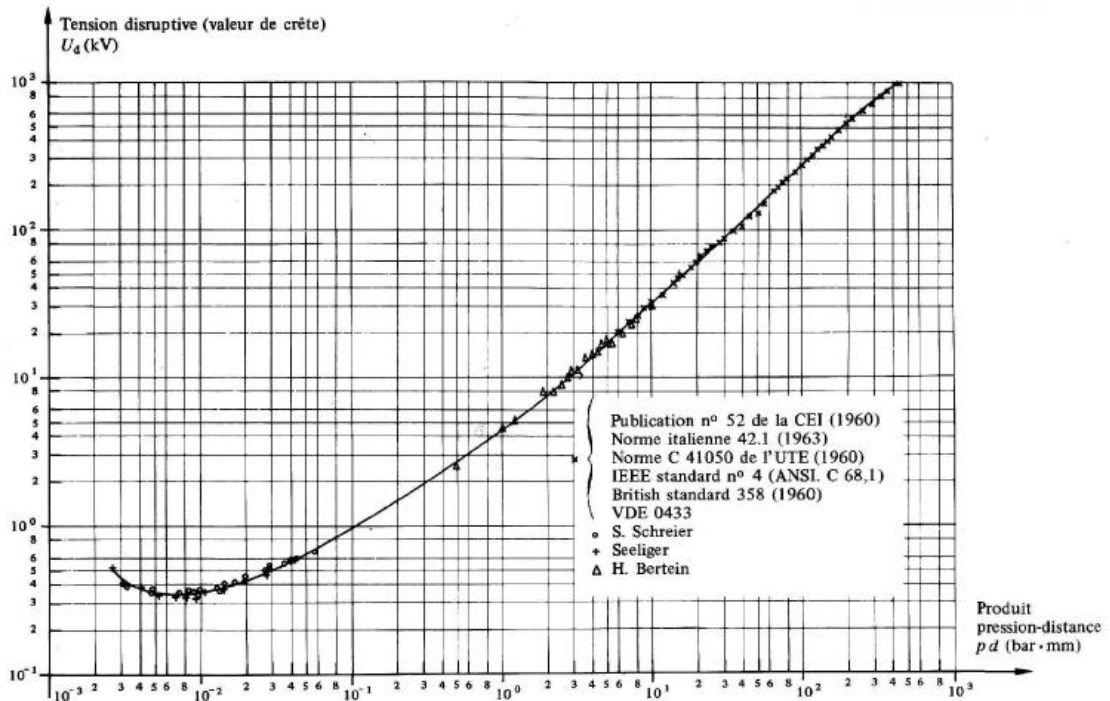


Fig. I.2 : Courbe de Paschen pour l'air en échelles logarithmiques, Température 20°C.

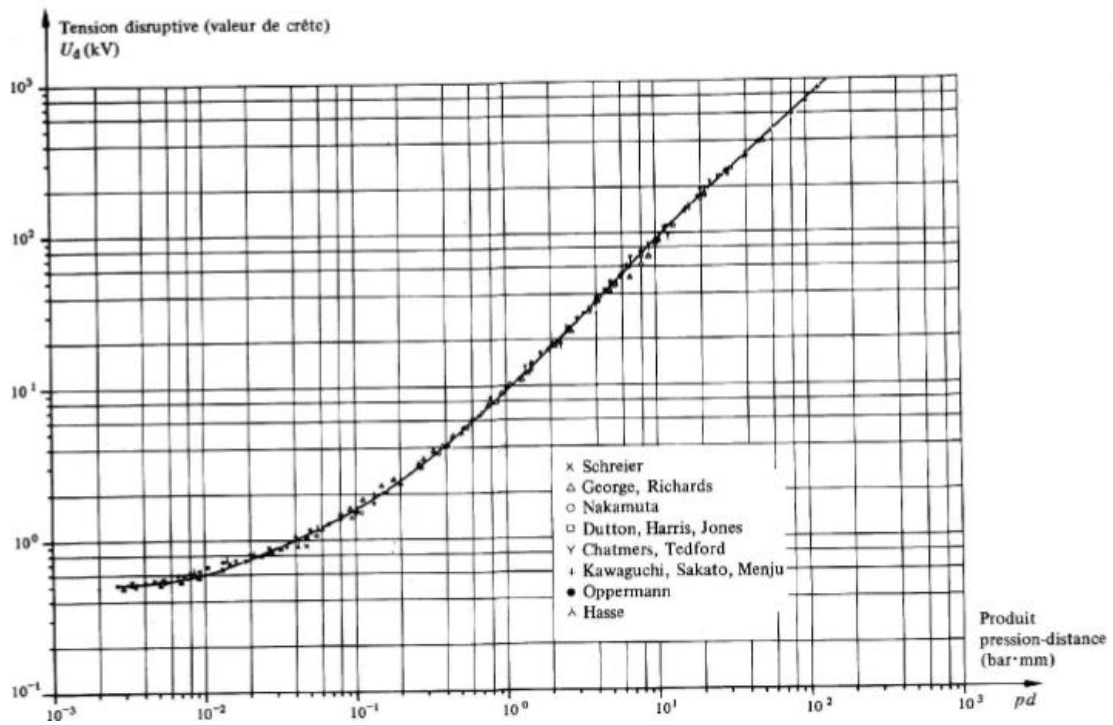


Fig. I.3 : Courbe de Paschen pour le SF6 en échelles logarithmiques, Température 25°C.

Gaz	Cathode	(U _d) min (volts)	(p _d)min (mmHg.cm)
He	Fe	150	2.5
Ne	Fe	244	3
Air	Fe	330	0.57
A	Fe	265	1.5
N ₂	Fe	275	0.75
Oz	Fe	450	0.7
Na	Fe	335	0.04
Hg	Fe	520	2
Hg	W	425	1.8
Hg	Hg	330	-
H ₂	Pt	295	1.25

Tableau 1 : Minimum de Paschen.

Définition: décharge de Townsend :

Comme on l'on a vu dans les paragraphes consacrés à la loi de Paschen (à champ électrique élevé), l'augmentation de densité de courant à partir du seuil de saturation de la décharge non autonome peut être expliquée par l'ionisation du gaz par des électrons primaires entraînant le phénomène d'avalanche ionique.

Dans ce cas de décharge, la densité de courant ne répond plus à une loi d'Ohm, mais à une loi du type:

$$J = \left(\frac{J_S}{\alpha d}\right) [\exp(\alpha d) - 1] \tag{I-1}$$

Où

- J_S : courant de saturation.
- α : Premier coefficient de Townsend (voir Fig.I.4) correspondant au nombre macroscopique moyen de paires de ions formés par un électron sur un parcours de 1cm (exprime la notion d'avalanche); ci dépend de E, de p et de la nature du gaz.
- γ : est appelé deuxième coefficient de Townsend.

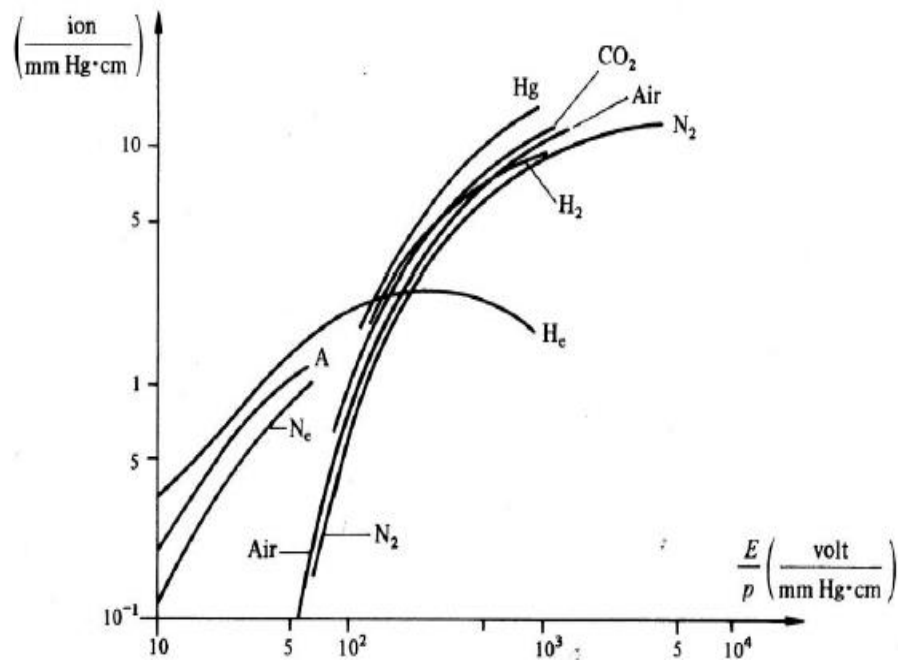


Fig. I.4. Premier coefficient de Townsend pour divers gaz.

La décharge de Townsend se situe entre 10^{-8} et 10^{-6} A, elle est peu lumineuse car elle transporte un courant peu intense. La luminosité est à peu près uniforme dans tout l'espace compris entre les électrodes.

I-3. Tension de claquage d'air :

La répartition dans l'air (claquage d'allumage) est la transition d'une décharge non-entretenu dans une décharge auto-entretenu. L'accumulation des courants élevés dans une dépression est due à l'ionisation dans laquelle les électrons et les ions sont créés à partir des atomes ou molécules neutres, et leur migration vers l'anode et la cathode conduit respectivement à des courants élevés. la théorie et la théorie Townsend Streamer sont présents deux types de théories qui expliquent le mécanisme de claquage dans des conditions différentes que la température, la pression, la nature des surfaces d'électrodes, configuration du champ de l'électrode et la disponibilité des particules conductrices initiales. Normalement milieu d'air est largement utilisé comme un milieu isolant dans les différents équipements électriques de puissance et sur les lignes de tête que sa résistance de claquage est de 30 kV / cm [2].

I-4. Tension de claquage des diélectriques liquides :

Les processus fondamentaux conduisant au claquage des isolants liquides sont encore mal connus. Ceci est lié en ` Grande partie au fait que la connaissance des propriétés physiques de l'état liquide est encore moins bien développée que dans les gaz elles solides. De nombreux chercheurs ont tenté d'appliquer aux liquides les théories proposées pour les gaz et les solides.

En 1937. Von Hippel proposait d'adopter les résultats acquis loris le domaine de la disruption des gaz, pour la compréhension du claquage électrique dans la phase condensée. C'est ainsi que 20 ans plus tard. Lewis et Adamczewski proposaient l'existence Vin processus d'ionisation du type a semblable à celui des gaz: théorie de claquage électronique basée sur les vibrations moléculaires et les électrons libres. Par la suite. Swan postulait qu'une émission électronique et une multiplication de charges jouaient un rôle essentiel dans le processus de claquage des liquides [1].

Ce modèle présente un certain nombre d'insuffisances, en particulier son incapacité d'expliquer le fait que la tension de claquage dépend de la pression comme l'ont rapporté Kock. et Higham. Cette dépendance de la pression, suggère 1 d'un changement de phase durant le claquage.

Ainsi, deux principaux mécanismes peuvent être présentés en ce qui concerne le claquage des diélectriques liquides :

- 1- mécanisme électronique.
- 2- mécanisme avec phase gazeuse.

I-5. Tension de claquage des diélectriques solides :

Les isolants solides sont des éléments de base des isolations à haute tension. Ils comportent en plus les gaz la particularité d'assurer la rigidité mécanique des matériels électriques.

Par la suite, on ne se préoccupera que des propriétés électriques des matériaux isolants, en faisant remarquer toutefois que les propriétés physiques vont parfois à l'encontre l'une de l'autre sur le plan de l'utilisation pratique, ce qui peut présenter de graves inconvénients. Par exemple, une bonne isolation électrique correspond en général à une bonne isolation thermique, ce qui pose des problèmes d'échauffement du matériel isolant [1].

De tout temps des produits naturels tels que le bois sec, le soufre, les résines naturelles, l'ambre, le caoutchouc, etc., ont été utilisés pour l'isolation solide. A partir du 18^{ème} siècle on a recouru également à des isolants solides synthétiques tels que le verre, le papier, et de nos jours aux résines phénoliques (bakélite, délite, etc.), au pressant, aux résines synthétiques (époxy, polyester, silicone, etc.), au polyéthylène, au polypropylène, aux EPDM, etc. il est à remarquer que certains de ces produits, particulièrement ceux présentant une porosité, se comportent mieux sous l'effet du champ électrique s'ils sont imprégnés par des diélectriques liquides tels que les huiles naturelles (ricin, etc.), les huiles minérales (sous-produits du pétrole) et les imprégnants synthétiques (polychlorobiphényles (PCB), isopropylbiphényle (Wemcoll), néo caprate de benzène (NCB), huiles silicones, etc.).

Les caractéristiques des éléments d'un isolant du point de vue électrique sont:

- la permittivité relative ϵ^r .
- la résistance en tension continue $P_{cc}(\Omega m)$.
- le facteur de pertes diélectriques en tension alternative $\text{tg}\delta$.
- la rigidité diélectrique E_r (V/m).
- la décharge disruptive ou claquage E_d (V/m).

I-6. Différents systèmes en haute tension :

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

I-6-1. Système pointe-pointe :

L'utilisation de pointes métalliques pour l'étude des décharges est assez courante. Cela est dû à l'effet de pointe, qui permet d'obtenir localement un champ intense (au niveau des pointes et des angles métalliques). Ce champ intense favorise le claquage électrique des gaz.

L'utilisation de pointes a l'avantage de stabiliser le lieu de la décharge puisqu'on est sûr du point de départ et du point d'arrivée de celle-ci (mais rien n'impose que le trajet entre ces deux points soit une ligne droite). Ce sont souvent des décharges entre deux électrodes métalliques ; on n'utilise que rarement cette configuration avec des décharges à barrière diélectrique [3].

La tension de claquage en écart situés entre les électrodes est :

$$V = \delta(A + BS)4\sqrt{5.5 * 10^{-2}(h + 8.65)} \text{ KV} \quad (\text{I-2})$$

Où, h l'humidité en gm/m^3 , B indépendant de la polarité de tension, A la polarité dépendant de l'électrode de tension, S est l'écart espacement situés entre électrodes.



Fig. I.5. arrangement d'électrode pointe-pointe.

I-6-2. Système pointe-plan :

Ce sont des arcs dont le chemin peut être instable ; c'est à dire que l'on connaît de manière certaine le point de départ de l'arc mais qu'on ne peut pas prédire quel sera le point d'arrivée sur le plan ni même le chemin parcouru. On peut distinguer trois types de décharge pointe plan: les arcs transférés, les arcs non transférés et les arcs glissants, qui ont des utilisations industrielles différentes. Les arcs transférés ou non transférés sont utilisés tous les deux en sidérurgie pour obtenir des gaz à de très hautes températures, à l'aide de courants importants (plusieurs centaines d'Ampères) [3].

La valeur moyenne du champ électrique est

$$E_{moy} = \frac{V}{A} \quad (I-3)$$

Facteur du champ électrique

$$n = \frac{E_{max}}{E_{moy}} = \frac{2A}{r \cdot \ln \frac{4A}{r}} \quad (I-4)$$

Ou, V est la tension appliqué, A est la distance inter-électrode, E_{max} est le champ électrique maximal, E_{moy} est le champ électrique moyen.



Fig. I.6. arrangement d'électrode pointe-plan.

I-6-3. Système plan-plan :

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

Dans la plupart des cas, on utilise des électrodes qui sont recouvertes d'une couche de diélectrique côté décharge. Avec ce type de dispositif, il est beaucoup plus facile d'obtenir une décharge homogène sur tout le plan. Ce type de décharge met en jeu des tensions importantes (dizaine(s) de kV) et des courants relativement faibles (quelques centaines de mA pour des sections de l'ordre de 10 cm²). On utilise ces décharges à barrière diélectrique, entre autre, pour la production d'ozone [3].



Fig. I.7. arrangement d'électrode plan-plan.

La tension de claquage en écart situés entre les électrodes plan-plan est [06]:

$$V = 24.22 S + 6.08\sqrt{S} \quad (I-5)$$

Ou' S le est écart espacement situés entre électrodes.

I-6-4. Système sphère-sphère :

L'éclateur à sphères peut en principe être utilisé directement pour mesurer une tension : soit deux objets entre lesquels existe une certaine différence de potentiel. Si on connecte ces objets aux deux pôles d'un éclateur « suffisamment écarté », rien ne se passe. Ensuite, on rapproche les deux sphères de l'éclateur jusqu'à ce qu'une étincelle éclate ; l'écartement atteint à ce moment permet de connaître la valeur de la tension [4].

En pratique, toutefois, l'éclateur n'est utilisé de cette façon que pour l'étalonnage des voltmètres à haute tension.

Il Ya deux types d'électrode sphère- sphère :

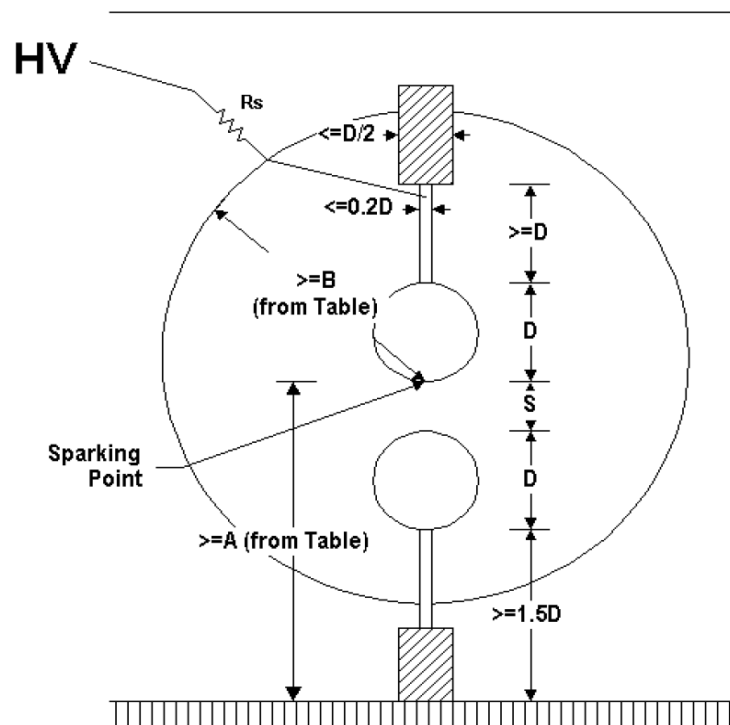


Fig. I.8. électrode sphère-sphère vertical.

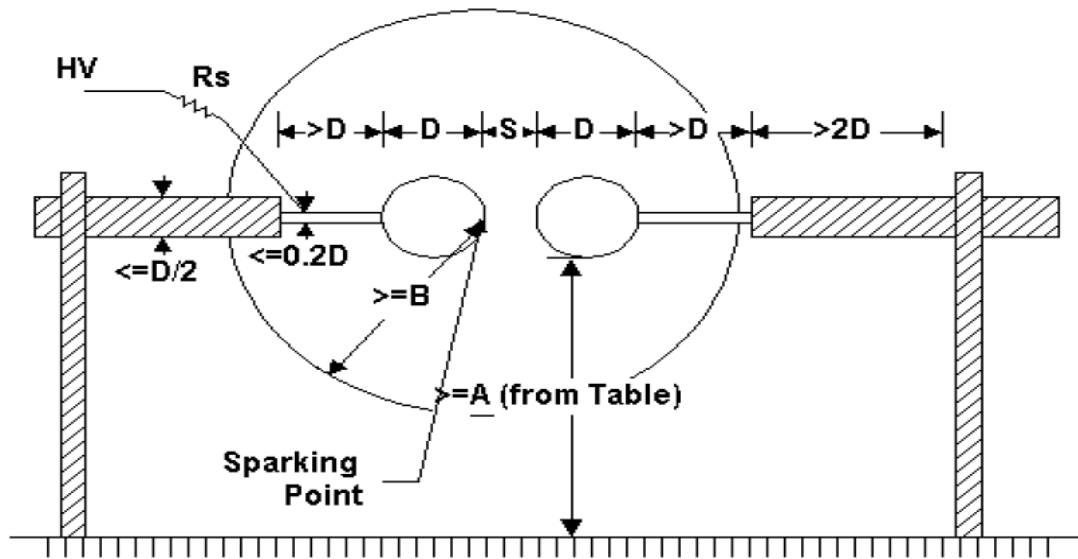


Fig. I.9.électrode sphère-sphère horizontale.



Fig. I.10.arrangement d'électrode sphère- sphère.

I-6-5.Système sphère- plan :

Un système d'électrodes sphère-plan a été conçu et utilisé pour la mesure de la tension de claquage et le champ électrique dans tous les types de matériaux isolants. Cet agencement d'électrodes est considéré comme un champ non uniforme, parce que les surfaces des deux électrodes ne sont pas similaires [2].

La valeur maximale du champ électrique entre l'électrode est :

$$E_{max} = 0.9 \frac{V}{x} \frac{a+x}{a} \quad (I-6)$$

Ou, V est la tension appliquée, x la distance entre les sphères et plan, a est la réduits de la sphère.



Fig. I.11.arrangement d'électrode. sphère- plan.

I-7.Conclusion :

Dans ce chapitre, nous avons noté qu'il existe quatre types d'isolants (air-gaz-liquides et solides), comme nous avons noté déférente type de tension de claquage électrique (pointe-pointe, pointe-plan, plan-plan, sphère-sphère, sphère- plan).

A large, horizontally-oriented oval with a light orange gradient and a thin dark orange border. The text "CHAPITRE II" is centered within this oval.

CHAPITRE II

II-1.Introduction :

Ce chapitre traite de la configuration de l'expérience pour la tension de claquage de l'air à l'aide d'un dispositif d'électrode sphère- sphère. Dans ce chapitre, l'appareil nécessaire pour la mesure de la tension de claquage de l'air, la description de l'équipement utilisé pour le test de claquage de l'air, schéma de tension de claquage de l'air et la procédure expérimentale pour conduire la tension de claquage de l'air est discutée.

II-2.Appareil requis pour la mesure de tension de claquage:

Pour effectuer le test de claquage de l'air en utilisant électrode standard sphère-sphère dans le laboratoire haute tension (Université de El-Oued) de l'appareil suivant :

- 1-Panneau de contrôle.
- 2-Disjoncteur.
- 3-Transformateur à haute tension.
- 4-Filtre à haute tension.
- 5-diviseur de tension.
- 6-électrode sphère-sphère.

II-3.Description de l'équipement utilisé pour la mesure de tension de claquage de l'air :

La description de tous les équipements utilisés pour la mesure de la tension de claquage de l'air est donnée ci-dessous.

II-3-1.Panneau de contrôle :

Il est celui de la partie intégrante importante pour conduire la tension de claquage de l'air en utilisant la méthode éclateur à sphère standard. Le panneau de commande se compose de tous les instruments de mesure, y compris la sécurité, le contrôle de commutation tels que voltmètre, ampèremètre, disjoncteur, alarme etc., qui est représenté sur la Fig.II.1. La fonction principale du panneau de commande est de contrôler tous les équipements sous test.



Fig.II.1. *Panneau de contrôle utilisé pour effectuer le test de tension de l'air.*

En changeant le bouton de la tension appliquée du régulateur de tension est changé sur les objets de test. Dans cette expérience, la distance d'écart entre les sphères est en train de changer à partir du panneau de commande en contrôlant la vitesse du moteur relié à la boîte de vitesses de l'électrode de sphère mobile. Au cours de l'expérience, la tension de claquage à la distance d'espacement particulier entre les électrodes sphériques sont affichées dans le panneau de commande.

II-3-2.Disjoncteur :

Un disjoncteur est un interrupteur électrique à commande automatique destiné à protéger un circuit électrique contre les dommages causés par une surcharge ou un court-circuit. La fonction principale du disjoncteur est d'identifier des défauts dans le circuit et l'isoler. Dans les circuits à haute tension défauts se produisant principalement des défauts symétriques, asymétriques défauts et les défauts de terre. Une fois qu'un défaut est détecté et les contacts dans le disjoncteur doit s'ouvrir pour interrompre le circuit, de l'énergie emmagasinée mécaniquement contenue dans le disjoncteur est utilisé pour séparer les contacts et, bien que partie de l'énergie requise peut être obtenue à partir du courant de défaut lui-même. Les contacts du disjoncteur doivent porter le courant de charge sans échauffement excessif, et doivent également résister à la chaleur de l'arc produit lors de la coupure du circuit. Des contacts sont en cuivre ou en alliages de cuivre, alliages d'argent, et d'autres matériaux. La durée de vie des contacts est limitée par l'érosion due à l'interruption de l'arc. Disjoncteurs miniatures et haute tension ont des contacts remplaçables. Lorsqu'un courant est interrompu, un arc est généré. Cet arc doit être contenu refroidi et éteint de manière contrôlée, de sorte que l'écart entre les contacts peut encore

supporter la tension dans le circuit d'alimentation. Par conséquent, une fois que la condition de défaut a été effacée, les contacts doivent être à nouveau fermés pour rétablir le courant au circuit interrompu. Les disjoncteurs sont faits dans différentes tailles, à partir de petits appareils qui protègent un appareil ménager individuel à grande appareillage conçu pour protéger les industries des circuits d'alimentation haute tension. Ces disjoncteurs haute tension améliorent la stabilité et la disponibilité du système.

II-3-3. Transformateur à haute tension :

Un transformateur est un dispositif statique. Il transfère l'énergie électrique d'un circuit à un autre circuit à travers des conducteurs à couplage inductif les bobines de transformateurs. Un courant variant dans l'enroulement primaire crée un flux magnétique variable dans le noyau du transformateur et donc un champ magnétique variable à travers l'enroulement secondaire. Ce champ magnétique variable induit une force électromotrice variable (FEM) dans l'enroulement secondaire. Cet effet est appelé induction mutuelle. Dans cet agencement haute tension transformateur élévateur ayant la puissance nominale de 5 kVA, 220V / 100kV est utilisé qui est représenté sur la figure.II.2. Lorsque la tension augmente, le courant diminue dans la même proportion.



Fig.II.2. Transformateur à haute tension utilisé pour l'essai de claquage de l'air.

II-3-4. Filtre à haute tension :

En haute tension des réseaux électriques sont subies principalement harmoniques d'ordre supérieur dans l'approvisionnement, de réduire ces harmoniques filtres à haute tension sont le plus souvent utilisés. En raison des harmoniques d'ordre supérieur; augmentation des pertes, des problèmes de résonance entre les parties inductifs et capacitifs du réseau d'alimentation, à la surcharge des condensateurs, conduisant à un vieillissement défectueux et prématurée, l'interférence avec les télécommunications et les ordinateurs, les perturbations dans les systèmes de télécommande centralisée et des courants élevés à neutre "de problèmes sont survenus. Ces filtres ont plusieurs avantages tels que le facteur de puissance plus élevée, une stabilité améliorée et des pertes de tension de réseau, le filtrage des harmoniques dans le système, d'éviter les problèmes de résonance et l'amplification des perturbations électriques.

II-3-5. diviseur de tension :

Le diviseur de tension est également une partie importante de l'expérience utilisée pour la mesure de la haute tension. Diviseur de tension est également connu comme un diviseur de potentiel. Ceci est un circuit linéaire simple qui produit une tension de sortie (V_{sort}) qui est une fraction de la tension d'entrée ($V_{\text{entré}}$). Division de tension se réfère à la séparation d'une tension entre les composantes du diviseur. Il est couramment utilisé pour créer une tension de référence ou pour obtenir un signal basse tension proportionnelle à la tension à mesurer, et peut également être utilisé comme atténuateur de signal à basse fréquence. Diviseur potentiel est utilisé pour mesurer des tensions dans les équipements électriques, le gain raisonnable sans perte de stabilité du circuit.

II-4. Procédure expérimentale pour la nécessaire de la tension de claquage de l'air :

Pour effectuer le test de tension de claquage d'air entre l'électrode de sphère tout l'instrument de mesure est normalisé selon IS 2071. Le dispositif expérimental pour l'étude de la répartition de l'air entre l'électrode deux sphères sont présentées dans Fig.II.3.

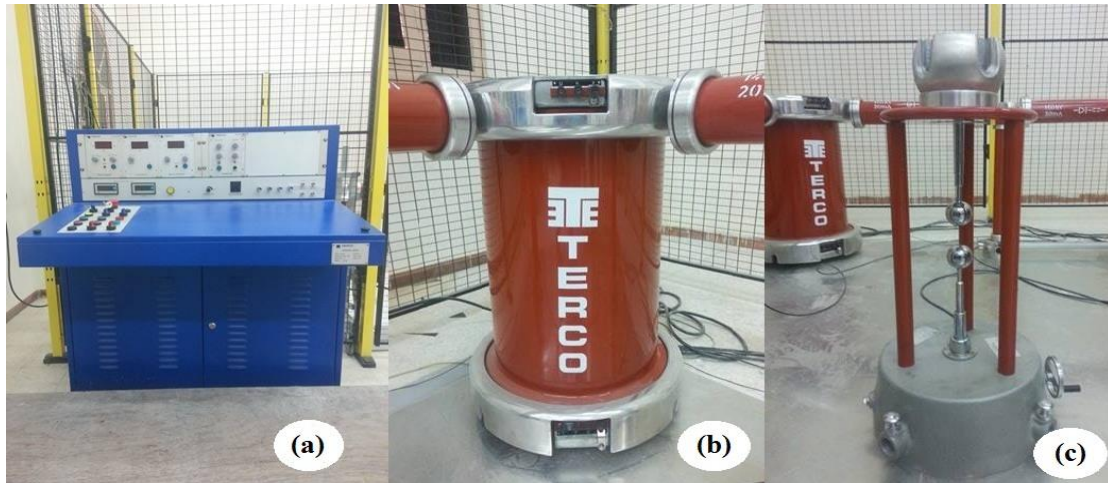


Fig.II.3. Montage expérimental en haute tension laboratoire d'essai pour l'étude de la tension de claquage de l'air en utilisant la méthode éclateur à sphère.

(a) le panneau de contrôle pour effectuer le test de ventilation d'air (b) la transformatrice haute tension (c) Deux sphères sont disposées verticalement ayant 10 cm de diamètre chacun.

Le schéma de montage expérimental de test de tension de claquage de l'air en utilisant la méthode de l'écart de la sphère standard est représenté sur la figure.II.4.

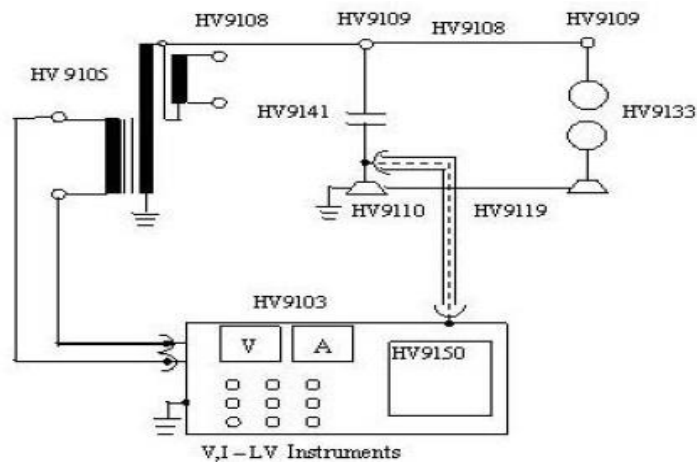


Fig.II.4. Schéma l'unité de source pour mesure de tension disruptive en utilisant la méthode électrode à sphère.

Dans cette étude, deux électrodes sphériques identiques ont été utilisées pour l'étude expérimentale de l'entrefer court. Les électrodes sphériques sont alignées verticalement. L'électrode de sphère inférieure qui est au-dessus du plan de masse est mise à la terre alors que la partie supérieure de la sphère électrode est connectée avec le connecteur haut tension.

L'électrode de la sphère utilisée a un diamètre de 10 cm, et l'électrode est faite d'un matériau en aluminium avec revêtement de nickel et de l'air agit comme un moyen d'isolation entre les électrodes sphériques. Avant de procéder à l'essai, les deux électrodes sphériques sont nettoyées avec du chlorure de tétra de carbone (CCl₄), de sorte qu'il est libre de flotter les particules de poussière, de fibres. L'électrode de la sphère supérieure est reliée à la borne de haute tension et l'électrode inférieure est reliée à la borne de masse. Avec l'application de la haute tension entre les électrodes sphériques, d'un champ électrique non uniforme est généré comme les surfaces des électrodes sphériques ne sont pas uniformes. L'électrode haute tension est alimenté par le transformateur 50 Hz avec une puissance de 5 kVA, avec un taux de transformation de 220 V / 100kV.

Les tensions de test sont appliquées à travers l'unité de filtration pour isoler le bruit du transformateur du circuit de mesure et un dispositif de limitation de courant pour protéger en cas de panne complète et empêcher le courant à haute fréquence à la tête haute tension. Au début de la panne du circuit est immédiatement déconnecté de l'alimentation et de la tension de claquage est enregistrée. Dispositif d'accouplement avec un câble de liaison est associé au circuit de mesure pour la mesure de l'amplitude à haute tension appliquée. L'étude expérimentale a été menée pour le test de ventilation d'air entre les électrodes sphériques à la température normale de 25 °C, la pression atmosphérique de 760 mm de Hg et aussi l'humidité de l'air a été enregistrée 35% au cours de l'expérience. Pour chaque 1 cm d'écart entre les électrodes sphériques, la tension de claquage de l'air est enregistrée dans cette étude. L'écart entre les électrodes sphériques est varié de l'ordre de 1cm à 5 cm.

II-5. Etude théorique de tension de claquage d'air :

La mesure des tensions et des courants élevés sont plus complexes et ces équipements ont grande capacité parasite et un grand gradient de tension. Équipements à haute tension sont protégés contre les surtensions. Méthode de l'écart de Sphère est celle de la méthode standard pour la mesure des valeurs de crête des AC, des tensions continues dans les circuits hauts tension. La distance d'espacement entre les sphères ne doit pas dépasser le rayon de la sphère. En courte durée de temps, nous pouvons mesurer la tension de claquage en utilisant cette méthode. Électrodes Sphère sont faites avec de nombreux matériaux tels que l'aluminium, l'acier, le laiton, les alliages légers, le bronze et le cuivre [15].

La résistance au claquage électrique d'un espace à isolation gazeuse entre deux électrodes métalliques peut être considérablement améliorée lorsque l'un ou les deux des électrodes sont recouvertes d'un revêtement diélectrique, que l'on appelle l'isolation hybride. L'effet du revêtement dépend de la forme de l'électrode, la polarité de tension, pré-charge et de la durée et la forme de la tension appliquée. Barrières diélectriques dans des espaces d'air et d'huile sont bien connues pour apporter une amélioration à la résistance électrique de claquage et largement utilisé dans l'ingénierie de haute tension. Par exemple, dans l'huile isolée transformateurs de puissance. Obstacles permet de prévenir le court-circuit causés par le pontage des particules dans l'huile du transformateur, ce qui augmente la résistance à la tension par rapport à un espace d'huile sans obstacles.

Dans cette méthode, l'air agit comme un milieu isolant entre les sphères. L'air atmosphérique est la combinaison de différents types de molécules de gaz qui agissent sur la tension de claquage du système. En augmentant la tension appliquée entre les lacunes de la sphère de la répartition de l'air a lieu à une certaine tension appliquée qui est appel comme tension de claquage. L'influence des objets mis à la terre et les tiges, reliant les sphères à l'alimentation en haute tension et à la masse, à la tension de claquage et le champ entre les sphères égales a été rapportée pour être de petite taille (quelques pour cent) et dépendait des dimensions des sphères, la séparation de l'écart, et les tiges [6-15].

Pour mener l'expérience pratique de la tension de claquage de l'air dans le laboratoire haute tension, l'étude théorique est le plus important pour la compréhension des caractéristiques de performance de la tension de claquage de l'air. La tension entre les sphères a augmenté jusqu'à ce qu'une étincelle passe entre les deux sphères. La valeur de la tension nécessaire pour déclencher plus (décomposition) dépend de la rigidité diélectrique de l'air, la taille des sphères, la distance entre les sphères, l'humidité de l'air et de nombreux autres facteurs. La tension de claquage d'un écart de la sphère augmente en augmentant la quantité de pression et diminue en augmentant la quantité de la température.

Le facteur de densité de l'air

$$\delta = \frac{293P}{760(273+t)} \quad (\text{II-1})$$

Où, la pression atmosphérique est "P" en mm de Hg et la température est "t" en °C et la tension de claquage de l'air entre l'écart de la sphère

$$V = \frac{27.2\delta r(1+\frac{0.54}{\sqrt{\delta r}})\frac{s}{r}}{0.25(\frac{s}{r}+1+\sqrt{(\frac{s}{r}+1)^2+8}} \quad \text{(II-2)}$$

Où, écart entre les électrodes sphériques est 's' en cm et le rayon de l'électrode est 'r' en cm, $\frac{V}{d}$, champ électrique dans l'espace est le cas, la distance entre l'électrode de champ est 'd' en cm. Certains des autres facteurs qui influent sur la valeur de claquage de l'air sont brièvement discutées dans ci-dessous [7-8].

(a)- Impact sur les objets à proximité mis à la terre :

L'impact sur l'objet à proximité mis à la terre sur la répartition de la tension directe des lacunes horizontales a été étudié par E. Kuffel et maris. La tension de claquage réduite de façon importante surtout lorsque la longueur de l'intervalle dépasse le rayon de la sphère. Les expériences ont été menées sur 5 cm sphère de diamètre et écart entre les électrodes sphériques est varié de l'ordre de 1cm à 5 cm. La réduction de la tension de claquage pour une donnée S/D équipé étroitement dans une relation empirique de la forme

$$\Delta V = m \ln \frac{B}{D} + C \quad \text{(II-3)}$$

Où, ΔV est le pourcentage de réduction de la tension dans la tension de claquage, B est le rayon entourant le cylindre métallique, et m et C sont des facteurs qui dépendent du rapport S / D [7].

(b)- Impact sur les particules de poussière :

Quand une particule de poussière est flottante entre les électrodes lacunes dans ces résultats errants rupture des configurations d'électrodes homogènes ou inhomogènes légèrement. Lorsque la particule de poussière est en contact avec une électrode sous l'application d'une tension continue, il se charge de la polarité de l'électrode et s'attirés par l'électrode opposée à cause de la forces sur le terrain et la ventilation est déclenchée peu avant l'arrivée. les lacunes de Sphère soumis à des tensions alternatives sont également sensibles aux particules de poussière, mais la probabilité d'errance claquage est moins. Sous tensions continues errantes pannes survenir en quelques minutes, même pour des tensions aussi basses que 80% des tensions de claquage nominales. Ceci est un problème majeur, avec des mesures de haute tension à courant continu avec les lacunes de la sphère [7].

Dans cette méthode champ électrique maximale est

$$E_{max} = 27.9\delta(1 + 0.533\sqrt{\delta r}) \quad (\text{II-4})$$

Selon CEI 60052 (2002) les valeurs de tension de claquage U (kV) mesurée dans des conditions réelles avec la température t ($^{\circ}\text{C}$), la pression P (mmHg) et l'humidité absolue h (%) ont été signalés à l'atmosphère standard de référence tel que défini par

$$U = \frac{V}{\delta * K} \quad (\text{II-5})$$

Comme la tension de claquage de l'air est aussi dépend de l'humidité dans l'air, compte tenu du facteur d'humidité (k) dans cette étude, la tension de claquage de l'air modifié.

$$V = \delta * \left[1 + \left(0.002 * \left(\frac{h}{\delta} - 8.5 \right) \right) \right] * U \quad (\text{II-6})$$

où, $K = \left[1 + \left(0.002 * \left(\frac{h}{\delta} - 8.5 \right) \right) \right]$ et "U" est la tension à l'atmosphère de référence standard [8-9].

II-6. Etude de simulation de tension de claquage d'air :

Le présent travail de recherche axé sur la validation expérimentale des caractéristiques de claquage de l'air à haute tension laboratoire d'essai et une comparaison approfondie est faite avec les calculs théoriques avec les résultats de la simulation par ordinateur. Le présent travail de recherche comprend la comparaison des résultats expérimentaux avec les résultats obtenus à partir des formulations empiriques (Eq (II-1),(II-2) et (II-6) avec l'environnement MATLAB. Pour simuler le test de répartition pratique de l'air les paramètres d'entrée tels que le diamètre de la sphère, l'écart entre les électrodes de la sphère, la pression atmosphérique, la présence d'humidité dans l'air et de la température sont prises 25°C , allant de 1 cm à 5 cm, 760mm de Hg, 32 % et 25°C respectivement.

Dans cette étude, les paramètres inconnus, tels que la tension de claquage de l'air et le champ électrique pour chaque tranche de 1 cm d'écart entre les électrodes sphériques sont calculées et en outre par rapport à l'étude expérimentale. Comme la tension de claquage de l'air et le champ électrique est la fonction de la géométrie de l'électrode, l'autre rayon d'électrodes de

sphère (à savoir, 2.5cm, 5cm) sont également pris en compte dans la simulation par ordinateur. Dans cette simulation, étudier le maximum.

Champ électrique et par rapport facteur de densité de l'air sont déterminées à chaque température (10°C à 50°C; -10°C à -50°C) et de pression (710-760 torr.) de l'atmosphère. Correction de l'humidité, la tension de claquage de l'air et le champ électrique maximale se trouvent à une humidité différente de l'air dans l'atmosphère.

II-7.Méthode des éléments finis pour champ électrique :

Méthode des éléments finis est utilisée dans une grande variété de problèmes d'ingénierie tels que la mécanique des solides, la dynamique, les problèmes de chaleur, les fluides et les problèmes électrostatiques. L'analyse par éléments finis coupe une structure en plusieurs éléments (pièces de la structure). Ce processus se traduit par un ensemble d'équations algébriques. Le comportement du champ électrique est basé sur la nature des électrodes (uniforme ou non uniforme). Méthode des éléments finis utilise le concept de morceau sage interpolation polynomiale. Par des éléments de liaison ensemble, la quantité de champ électrique devient interpolée sur la structure entière en pièce sage mode. Dans cette méthode, les structures indéterminées sont résolues. Il peut être manipulé chargements complexes comme la charge nodal (point de charge), la charge de l'élément (de pression, les forces thermiques et d'inertie) et le temps ou la fréquence de chargement dépendent [10].

La modélisation et l'analyse de la distribution du champ électrique dans l'électrode sphère-sphère se fait en utilisant le logiciel COMSOL. Dans ce logiciel pour construire l'arrangement gap sphère en utilisant tous les paramètres numériques et physiques nécessaires. Et découvrez le champ électrique maximal entre les électrodes sphériques. L'appareil représenté sur la Fig.II.3, se compose principalement de deux électrodes sphériques fixées verticalement séparées par un intervalle. Les électrodes servent d'électrodes qui sont connectées à un transformateur à haute tension entraîné par la source d'alimentation en fréquence convertible. Deux sphères ont été réalisés en aluminium. Les deux domaines sont situés dans la région centrale en ajustant le diamètre et l'écart entre les électrodes. Deux sphères sont disposés avec précision avec leurs axes verticaux parallèles au champ électrique appliqué. Dans les expériences, la force d'attraction entre les deux sphères a été mesurée. Ce logiciel offre une vaste gamme d'applications de simulation pour contrôler la complexité à la fois la modélisation et de l'analyse d'un système. De même, le niveau de précision désiré requis et les besoins en temps de

calcul associés peuvent être gérés simultanément à l'adresse de la plupart des applications d'ingénierie. Méthode des éléments finis permet des conceptions entières à être construits, optimisés et affinés avant la conception est fabriquée. Les effets 2D et 3D du champ électrique ont également découvert dans ce logiciel. Cette méthode est utile pour dessiner les tracés linéaires entre les différents paramètres. Ligne trace des changements en ce qui concerne la place du champ électrique entre les électrodes sphériques.

➤ *Simulation de champ électrique :*

La simulation de champs électriques dans trois configurations différentes est observée à l'aide du logiciel COMSOL multi-physique [11]. Dans électrostatiques, les équations de Maxwell et l'équation constitutive réduisent à la forme suivante

$$\nabla * E = 0 \quad (\text{II-7})$$

$$\nabla * D = \rho \quad (\text{II-8})$$

$$D = \varepsilon E \quad (\text{II-9})$$

où E est l'intensité du champ électrique, D est le déplacement électrique, ρ est la densité de charge d'espace, ε est la constante diélectrique du matériau. Sur la base de l'équation. (II-7), l'intensité du champ électrique est introduite par le gradient négatif du potentiel scalaire électrique V en forme suivante

$$E = -\nabla * V \quad (\text{II-10})$$

Équations en utilisant du (II-8) et (II-9) à (II-7), l'équation de Poisson scalaire est obtenu sous forme suivante

$$-\nabla * (\varepsilon \nabla V) = -\nabla * (\varepsilon_0 \varepsilon_r \nabla V) = \rho \quad (\text{II-11})$$

où, ε_0 est la permittivité de l'espace libre, $\varepsilon_r = \varepsilon_r(E, x, y, z)$ est la permittivité relative et ρ est la densité de charge d'espace. E si la permittivité est constante comme dans le diélectrique isotrope,

$$\Delta V = -\rho \varepsilon \quad (\text{II-12})$$

Pour la charge d'espace libre ($\rho = 0$) des champs, le champ est exprimée par Laplace "s équation $\Delta V = 0$.

Dans cette étude, la solution du problème est obtenue à partir d'une solution de l'équation de Laplace en coordonnées rectangulaires.

$$\nabla^2 V = \frac{\partial^2 V}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 V}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 V}{\partial z^2} \quad (\text{II-13})$$

V = Tension de claquage sur l'électrode supérieure,

$V=0$ Volt (sol) sur l'électrode inférieure,

$\frac{\partial V}{\partial n}=0$ sur toutes les autres limites extérieures et sur l'axe de symétrie.

II-8. Effet de l'humidité sur la tension de claquage d'air :

La tension de claquage de l'air est influencée par l'effet de l'humidité. Dans l'air, ce qui l'humidité augmente la tension de claquage. Augmente L'effet est plus perceptible dans le champ uniforme et moins importante dans les espaces non uniformes [tels que les lacunes de la sphère où l'écart est une fraction importante du diamètre de la sphère ou en aiguille ou tige lacunes]. a été trouvé que l'effet soit maximal dans certains endroits et minimum dans certains endroits. La relation entre la tension de claquage et à l'humidité est pratiquement linéaire d'espacement inférieur à celui qui donne l'effet maximal d'humidité. Dans cet effet de l'humidité AC tension de claquage est légèrement inférieure à la tension et claquage de l'air DC tension augmente avec la pression partielle de vapeur d'eau. Isolants liquides tirent leur rigidité diélectrique de la densité beaucoup plus élevée par rapport aux gaz [1]. Le processus de répartition prévoit les impacts suivants:

- ❖ la livraison de l'humidité des porteurs de charge et donc diminue la tenue diélectrique.
- ❖ Le vieillissement par des produits tels que des acides aussi fournir des porteurs de charge par dissociation. En outre, ils sont tensio-actifs, ce qui diminue la tension superficielle. Ainsi, ils soutiennent l'évolution de la bulle suivante dans une rigidité diélectrique diminué.
- ❖ Avec une pression croissante de la tension de claquage devrait augmenter. Pour des pressions inférieures à la pression atmosphérique, la tension de claquage devrait diminuer.
- ❖ Une tension de claquage de l'air diminué est attendu d'elles sont très conducteur ou humide.

L'effet de l'humidité augmente avec la taille des sphères et est le plus important pour les électrodes de champ uniforme. Variations de tension de claquage de l'air pour une augmentation de changement d'humidité donné avec la longueur de l'écart. L'augmentation de la tension de claquage avec une augmentation de la pression partielle de vapeur d'eau et cette augmentation de

la tension avec l'augmentation de longueur de brèche est due aux valeurs relatives des coefficients d'ionisation dans l'air. Les particules d'eau se fixent facilement des électrons libres, en formant des ions négatifs. Ces ions ralentissent donc vers le bas et sont incapables d'ioniser les molécules neutres dans des conditions de terrain dans lequel les électrons seront facilement ionisés. Humidité influence également sur le champ électrique maximum et facteur de correction d'humidité [12-13].

II-9. Effet de Facteur de correction de l'humidité de la tension de claquage:

La tension de claquage obtenue dans l'air sera affectée par les conditions atmosphériques telles que la température et l'humidité absolue. Selon CEI 60052 (2002), l'humidité absolue et la densité relative de l'air sont les effets sur la tension de claquage de l'air dans la méthode de l'écart de la sphère standard. Dans ce travail détermine le facteur de correction d'humidité. Les configurations de gap utilisé dans ce présent travail avaient des lacunes sphère-sphère en aluminium revêtu de nickel

Avec le diamètre de 10 cm. Le facteur de correction d'humidité est utile pour corriger la tension de claquage à chaque valeur de l'humidité.

Dans ce travail, prise d'humidité varie entre 1% à 32% et de trouver le facteur d'humidité correspondant. Ce travail étudie l'influence de l'humidité sur la tension de claquage en courant alternatif et détermine le facteur de correction d'humidité est appropriée pour une application dans toutes les conditions atmosphériques. Dans la mesure du facteur de correction d'humidité les paramètres d'entrée sont la température est 25°C, la pression est de 760 mm de hg et écart entre les électrodes sphériques est 4cm prise.

Facteur de correction d'humidité de l'écart sphère-sphère

$$K = \left[1 + \left(0.002 * \left(\frac{h}{\delta} - 8.5 \right) \right) \right] \quad (\text{II-14})$$

Où, h est l'humidité de l'air et δ est le facteur de densité relative de l'air [8-9-14].

II-10. Conclusion :

Dans ce chapitre, nous avons mentionné les nécessaire appareils pour faire le travail dans laboratoire, mesure la tension de claquage et le champ électrique.

A large, horizontally-oriented oval with a light orange gradient and a thin dark orange border. The text "CHAPITRE III" is centered within this oval.

CHAPITRE III

III-1.Introduction :

Dans ce chapitre, en traite des résultats et discussion et les résultats sont fournis sous forme de tableau, ainsi que la forme graphique pour clarifier l'objectif de la thèse. Il est couvre également la différente performance de la tension de claquage de l'air avec des différents configurations.

III-2.Résultats et discussions :

III-2-1.Effets de la distance entre les sphères sur la tension et le champ électrique maximale:

Pour simuler les caractéristiques de la tension de claquage de l'air (TDC) et le champ électrique maximal entre les sphères conductrices, deux électrodes sphériques sont pris en compte en utilisant la simulation MATLAB. L'objectif principal de l'analyse est la variation de tension de claquage par rapport à écartement des électrodes avec des diamètres différents. Cette caractéristique fournit des informations importantes sur la capacité supportée par l'isolateur pour soutenir la haute étincelle sur la tension. La tension de claquage de l'air entre les électrodes sphériques sont mesurées dans le laboratoire haute tension d'EL-OUED et l'intensité du champ électrique et l'erreur TDC correspondantes sont calculées à partir des résultats théoriques, simulation et expérimentale qui est représenté dans le tableau 1.

Sphère gap (cm)	TDC Pratique (kV)	TDC Théorique (kV)	TDC Simulation (kV)	Champ électrique Pratique (kV/cm)	Champ électrique Théorique (kV/cm)	Champ électrique Simulation (kV/cm)	%Erreur (TDC)
1	21.17	22.41	27.33	21.17	22.41	27.33	6.16
2	38.79	41.71	44.25	19.39	20.85	22.12	5.46
3	55.3	59.39	60.01	18.43	19.79	20	4.71
4	70.29	74.24	79.60	17.29	18.56	19.90	9.31
5	81.65	86.97	89.10	16.33	17.39	17.82	7.45

-TDC =Tension De Claquage

Tableau 1 : Valeurs mesure de tension de claquage et le champ électrique entre les sphères.

La caractéristique de performance de la tension de claquage de l'air par rapport à écartement des électrodes avec un diamètre de 10 cm est montrée dans Fig.III.1. Dans cette figure les TDC théorique, simulation et expérimentaux sont tracées pour des différentes écartements.

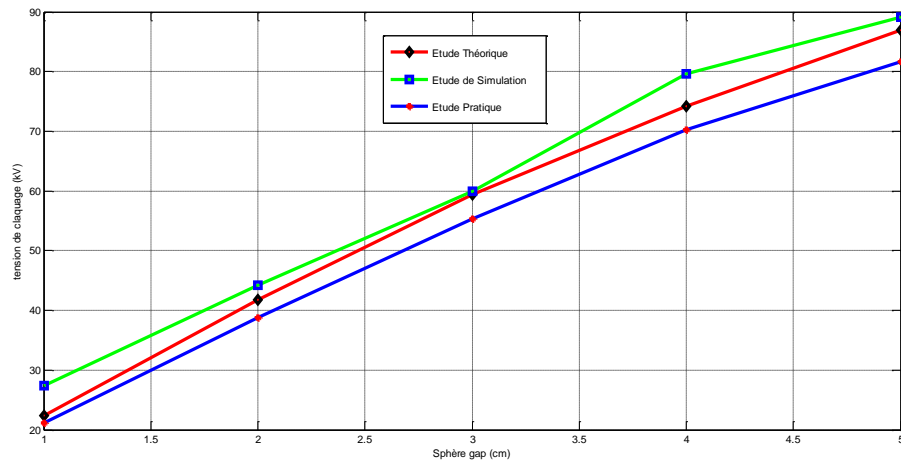


Fig.III.1. Comparaison entre sphère-gap et la tension de claquage expérimentale, simulation et théorique.

Il est clair à partir de la Fig.III.1 que l'écart entre l'électrode de sphère est varié dans la large gamme de 1 cm à 5 cm et la tension de claquage correspondante est variée dans la plage de 21.17 kV à 86.10 kV. On observe également que l'augmentation de l'écart correspond également à une augmentation de la tension de claquage. La figure III.2 montre la distribution du champ électrique le long de la distance d'écartement entre l'électrode sphérique, dans cette Fig.III.2 le champ électrique théorique et champ électrique de simulation pour des différents écartements des électrodes, sont représentées avec des résultats expérimentaux.

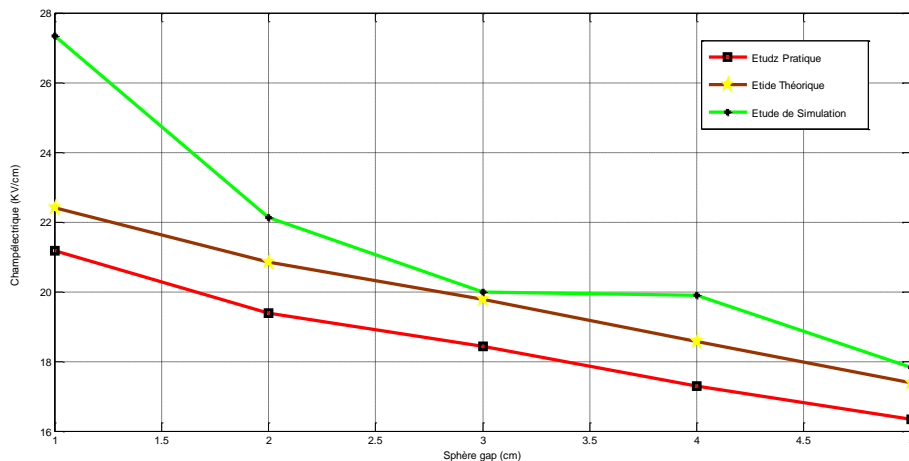


Fig.III.2. Comparaison des résultats expérimental, théoriques et simulation de la distribution du champ électrique pour le système sphère-sphère ($\varphi = 10\text{cm}$) différents écartement des électrodes.

En comparant avec le groupe expérimental, les résultats de simulation théorique et on observe que le champ électrique diminue à mesure que la distance entre les électrodes augmente.

III-2-2.Effets de diamètre de sphère sur la tension et le champ électrique maximale:

Pour trouver la relation entre le diamètre de l'électrode de sphère avec la tension de claquage de l'air ainsi que le champ électrique correspondant, théorique et simulation, l'étude a été faite dans ce travail qui est représenté dans le tableau 2.

Sphère Rayon (cm)	TDC Théorique (kV)	TDC Simulation (kV)	Champ électrique Théorique (kV/cm)	Champ électrique Simulation (kV/cm)	%Erreur (TDC)
2.5	32.2	32	22.76	22.62	0.2
5	31.6	31.9	22.34	22.55	0.3
7.5	31.3	31.5	22.13	22.27	0.2
12.5	31	30.9	21.92	21.84	0.1

Tableau 2 : mesure de la tension de claquage et le champ électrique entre les sphères.

Comme la tension de claquage de l'air et la résistance électrique correspondante de champ et dépend de la configuration géométrique de l'électrode de sphère les résultats sont montrés sur Fig.III.3 et Fig.III.4 respectivement.

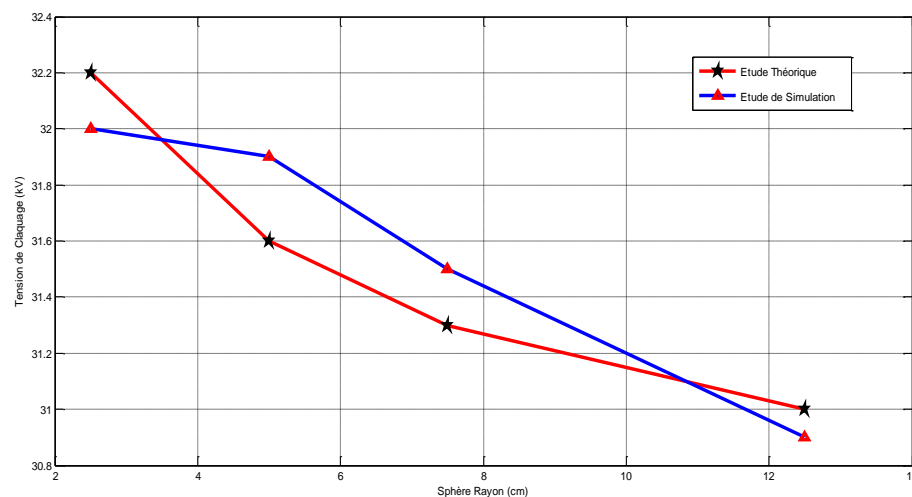


Fig.III.3. Variations du rayon de sphère avec la tension de claquage.

A partir de Fig.III.3 on observe que la tension de claquage de l'air diminue avec l'augmentation du rayon de la sphère pour les résultats théoriques et simulés.

La figure III.4 montre les résultats des distributions de champ électrique avec la variation du diamètre de sphère.

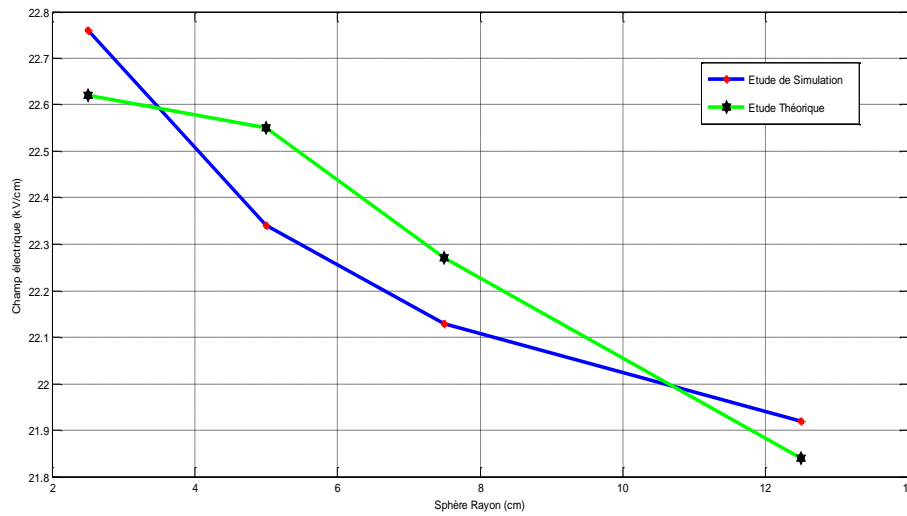


Fig.III.4. La distribution du champ électrique avec variation du rayon de sphère.

Il est clair à partir de la Fig.III.4 qu'avec l'augmentation de la distribution de champ électrique le rayon de sphère diminue.

III-2-3.Effets de la température l'atmosphérique sur le facteur de densité relative de l'air et le champ électrique maximale:

Effets de la température l'atmosphérique sur le champ électrique maximale et le facteur de densité relative de l'air sont déterminés dans la simulation. Ceux-ci sont donnés dans le tableau 3. Au cours de ces paramètres, le rayon des électrodes sphériques est de 5 cm, le matériau d'électrode de la sphère est en fer et la pression atmosphérique est de 760 mm de Hg.

Température (°C)	Facteur de densité relative de l'air (δ)	Champ électrique maximale (kV / cm)
10	1.03	63.49
20	1	61.15
30	0.96	58
40	0.93	55.76

Tableau 3 : Facteur de densité relative de l'air et champ électrique maximum pour différentes températures.

La figure III.5 contient les caractéristiques entre la température et facteur de densité relative de l'air par les résultats de simulation sont tracées pour différentes températures "t".

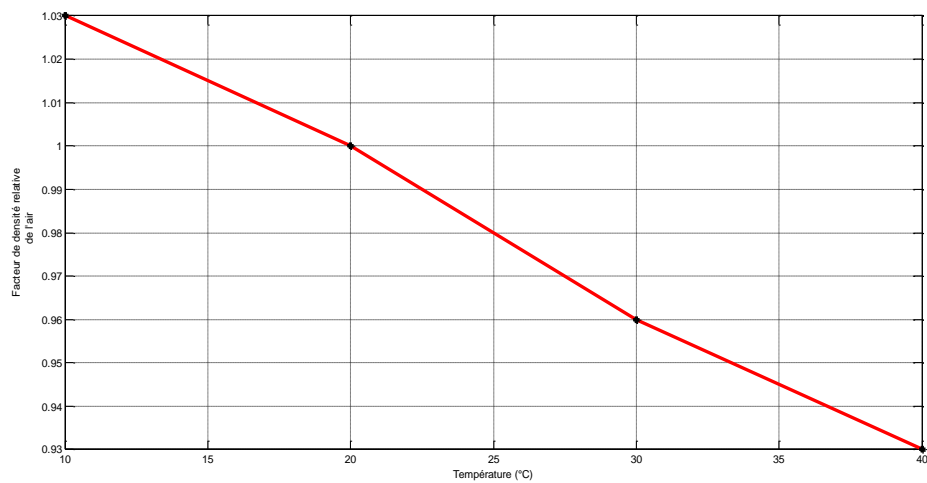


Fig.III.5. Variation de la température en fonction du facteur de densité relative avec simulation.

A partir Fig.III.5 on observe que le Facteur de densité relative de l'air diminue avec l'augmentation de la température de l'atmosphère dans les résultats simulés. La figure III.6 montre la variation du champ électrique maximale en fonction de température.

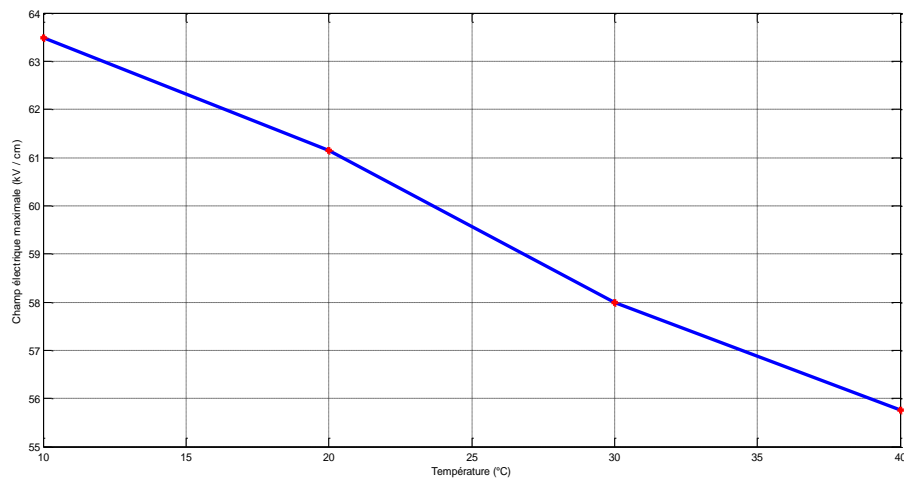


Fig.III.6. Variation du champ électrique en fonction de température.

À partir de la Fig. III.6 on observe que le champ électrique maximal diminue avec l'augmentation de la température de l'atmosphère dans les résultats simulés.

III-2-4.Effets de la température négative sur le champ électrique maximale:

En plus de trouver le champ électrique maximum à différentes température négative (°C). Est déterminé dans la simulation. Ces quantités sont données dans le tableau 4.

SL. Non.	Température (°C)	Champ électrique maximale (kV / cm)
1	-10	69.85
2	-20	73.09
3	-30	77.19
4	-40	81.34
5	-50	86.40

Tableau 4: mesure de champ électrique maximale pour température négative.

Les résultats sont représentés dans Fig.III.7. Il contient la relation entre la température négative et le champ électrique maximal.

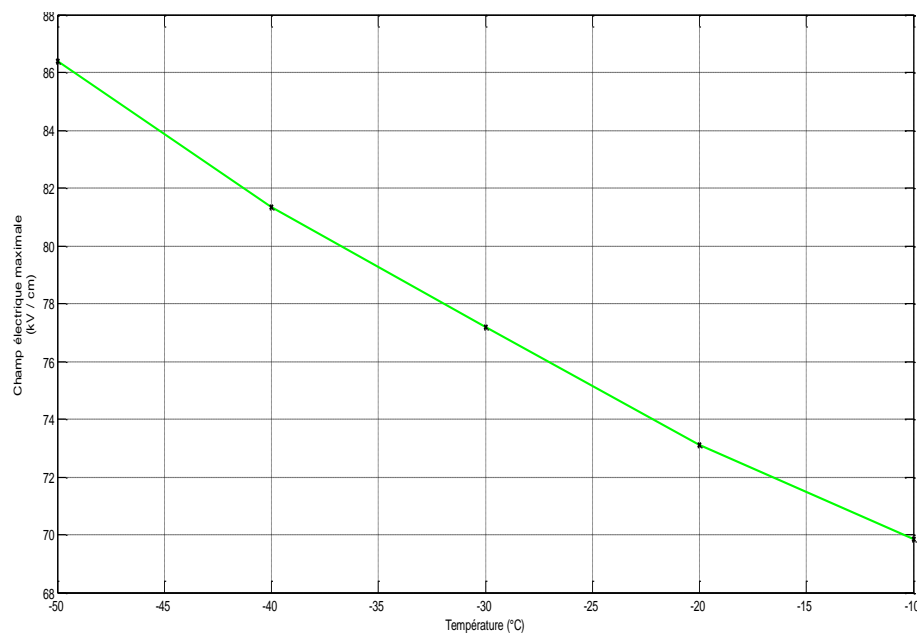


Fig.III.7. La relation entre la température négative et champ électrique maximale.

On observe sur le graphique ci-dessus lorsque la température est augmenté alors le champ électrique maximal correspondant diminue. Température négative est prise pour observer le champ électrique maximal dans les pays froids.

III-2-5. Effets de la pression sur le facteur de densité relative et le champ électrique maximale:

Les mesures du champ électrique maximal et le facteur de densité relative de l'air à chaque pression "P", Ceux-ci sont représentés dans le tableau 5. Au cours de variation de ces paramètres, le rayon des électrodes sphériques est de 5 cm, le matériau d'électrode sphérique est du fer et la température ambiante est de 25°C.

Pression Torr	Facteur de densité relative de l'air (δ)	Champ électrique maximale (kV / cm)
710	0.91	54.25
720	0.93	55.76
730	0.94	56.53
740	0.95	57.29
750	0.97	58.82
760	0.98	59.60

Tableau 5: Facteur de densité relative de l'air et le champ électrique maximale pour des différentes pressions.

Comme le facteur de densité relative de l'air et le champ électrique maximal correspondant et dépend de la pression atmosphérique, la Fig.III.8 et la Fig.III.9 respectivement, montre ces variation

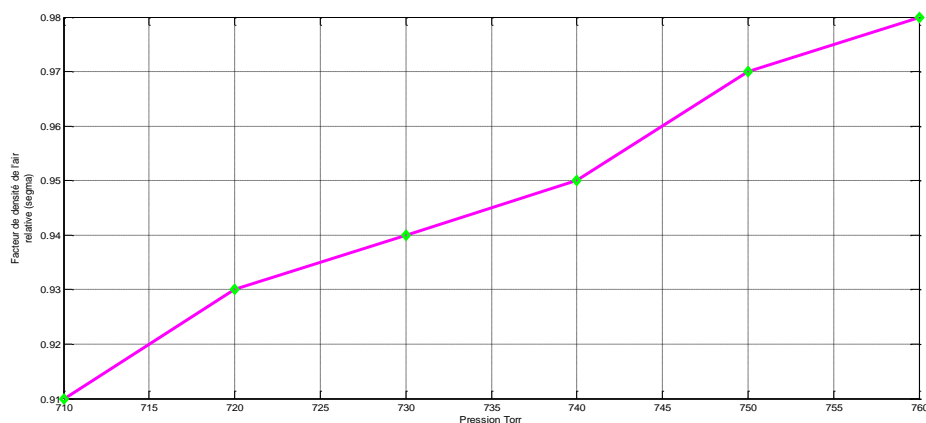


Fig.III.8. Facteur de densité relative de l'air en fonction de pression.

De la Fig.III.8 ci-dessus, on observe une variation de pression dans une gamme de 710-760 torr et le facteur de densité relative de l'air correspondant est varié dans la plage de 0,91 à 0.98.

Les résultats de performance entre la pression et le champ électrique maximale est indiquée dans Fig.III.9.

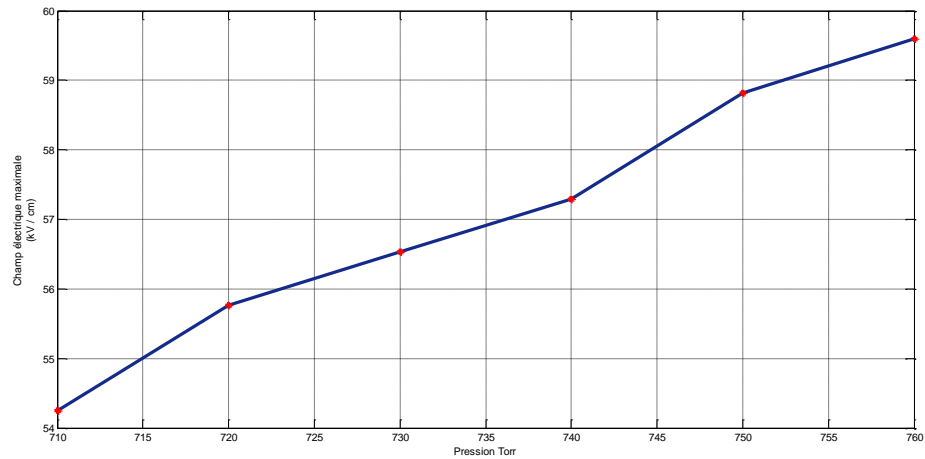


Fig.III.9. Champ électrique maximal en fonction de la pression.

Il ressort de Fig.III.9 la pression atmosphérique est linéairement proportionnel au champ électrique maximale.

III-2-6. Effets d'humidité sur la tension de claquage :

Nous avons remarqué que l'humidité est l'un des principaux facteurs affectant la tension de claquage de l'air entre les électrodes sphériques. Les caractéristiques des tensions de claquage de l'air à différente l'humidité ont également été étudiées. On observe que la tension de claquage de l'air est fonction de la présence d'humidité dans l'air. Résume tout cela dans le tableau 6.

Humidité (%)	Tension de claquage (kV)
5	99.3
10	100.3
15	101.3
20	102.3
25	103.3
30	104.3

Tableau 6 : Tension de claquage pour différente l'humidité.

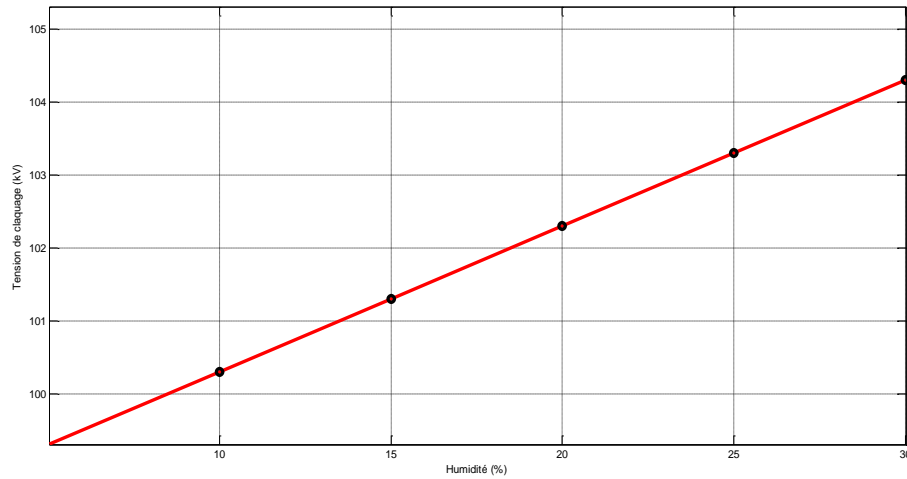


Fig.III.10. La relation entre l'humidité et la tension de claquage.

On observe à partir Fig.III.10 que la tension de claquage de l'air est augmentée de 99.3kV à 104.3kV tandis que les changements d'humidité de 5% à 30% en maintenant la distance d'écartement de l'électrode de 4 cm. Au cours de l'étude de la tension de claquage de l'air.

III-2-7. Effets d'humidité sur le facteur de correction de l'humidité:

En outre, pour savoir la relation entre l'humidité et le facteur de correction d'humidité, une étude de simulation a été faite dans ce travail qui est représenté dans le tableau 7.

Humidité (%)	Facteur de correction de l'humidité (K)
5	0.993
10	1.003
15	1.013
20	1.023
25	1.033
30	1.043

Tableau 7 : Facteur de correction d'humidité pour différente humidité

Fig.III.11.Elle contient la relation entre le facteur de correction de l'humidité et de l'humidité.

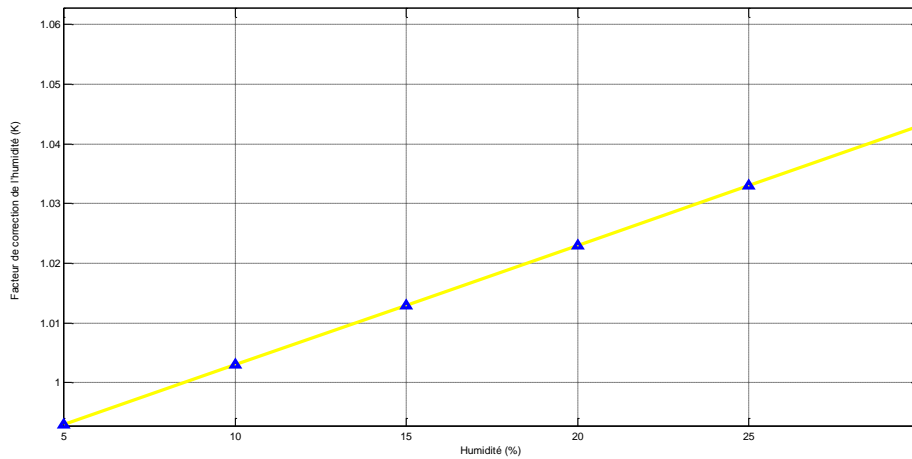


Fig.III.11.La relation entre l'humidité et le facteur de correction de l'humidité.

III-2-8.Mesure de la tension de claquage pour différents systèmes d'électrodes :

Il existe de nombreux systèmes d'électrodes utilisées dans le domaine de la Haute Tension qui simule l'interaction entre l'équipement sous haute tension, dans le but de faire une classification de ces systèmes en fonction de tension de claquage, le tableau 8 résume cela.

Système	La distance entre l'électrode (cm)	Tension de claquage (kV)
plan-plan	1	16.85
	2	32.67
	3	49.01
Petite sphère- sphère diamètre (5cm)	1	20
	2	36.74
	3	50.28
pointe-pointe	1	10.83
	2	14.32
	3	17.79
pointe-pointe plat	1	16.22
	2	23.01
	3	26.59
Grand sphère- sphère diamètre (10cm)	1	21.17
	2	38.79
	3	55.30

Tableau 8 : Mesure de la tension de claquage dans différents systèmes en pratique.

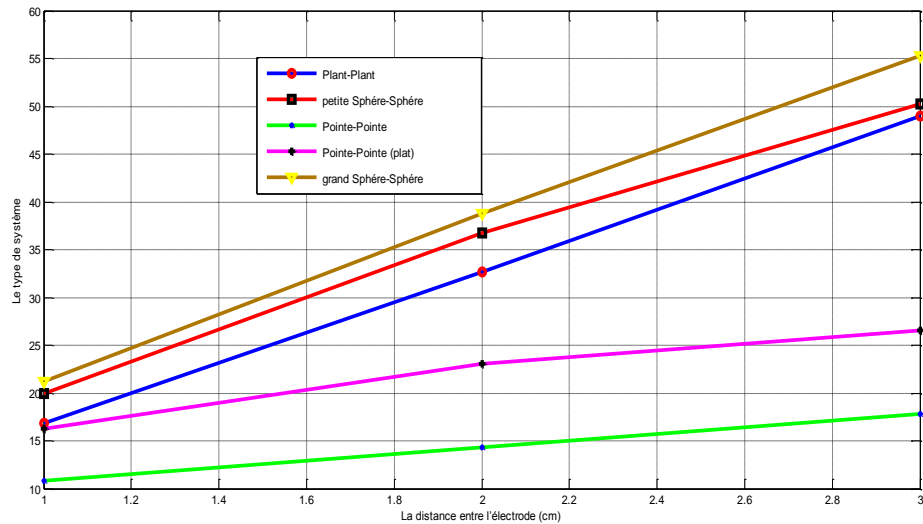


Fig.III.12. Tension de claquage en fonction de distance entre l'électrode pour différentes systèmes.

Grâce à la Fig.III.12. En voit que le système le moins rigide était le système pointe-pointe. A cause du phénomène de pouvoir de pointe qui rend le champ électrique très intense lorsque le rayon de courbure est petit.

Dans ce travail, la méthode des éléments finis est également utilisée pour trouver le champ électrique maximal entre l'électrode sphérique. Ce procédé est effectué dans un logiciel COMSOL qui est utilisé pour régler la répartition du champ électrique et les problèmes d'analyse et de modélisation des équipements à haute tension. Dans cette méthode, les paramètres d'entrée sont rayon des sphères qui est de 5 cm, la sphère est constituée de fer, l'écart entre les électrodes sphériques est de 1 cm et une température et pression normale. L'air atmosphérique est considéré comme un moyen d'isolation pour ce procédé. Figure III.15 montre la répartition du champ électrique maximal entre les électrodes sphériques.

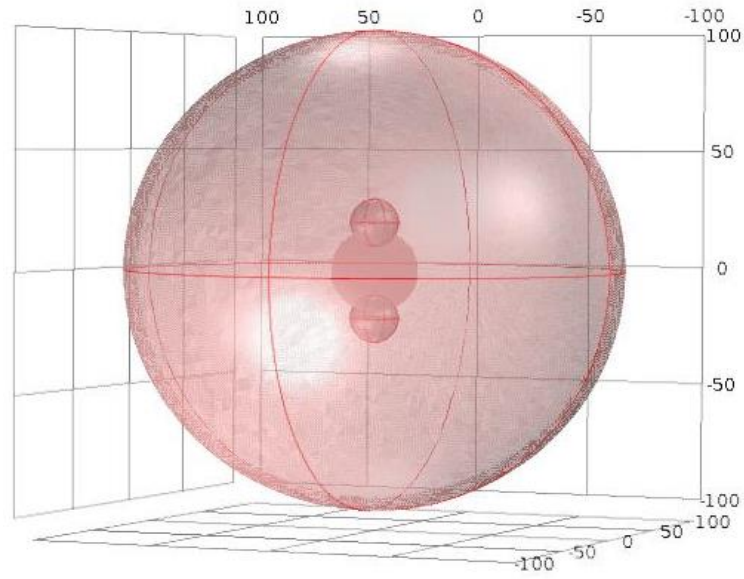


Fig.III.13. Electrode sphère-sphère dans les simulations en utilisant COMSOL.

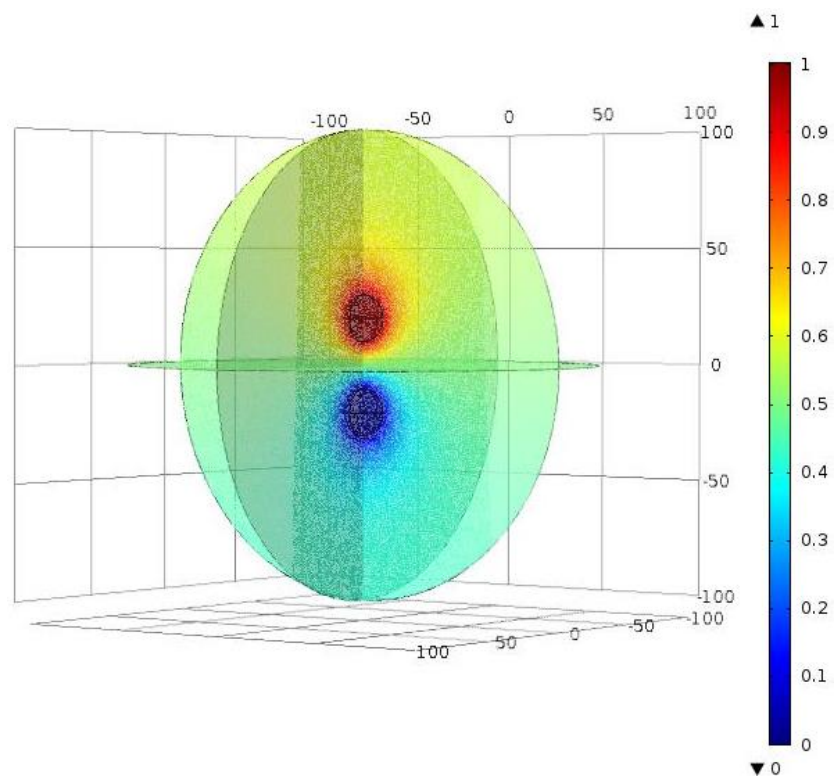


Fig.III.14. Le champ électrique entre l'électrode sphère-sphère dans les simulations.

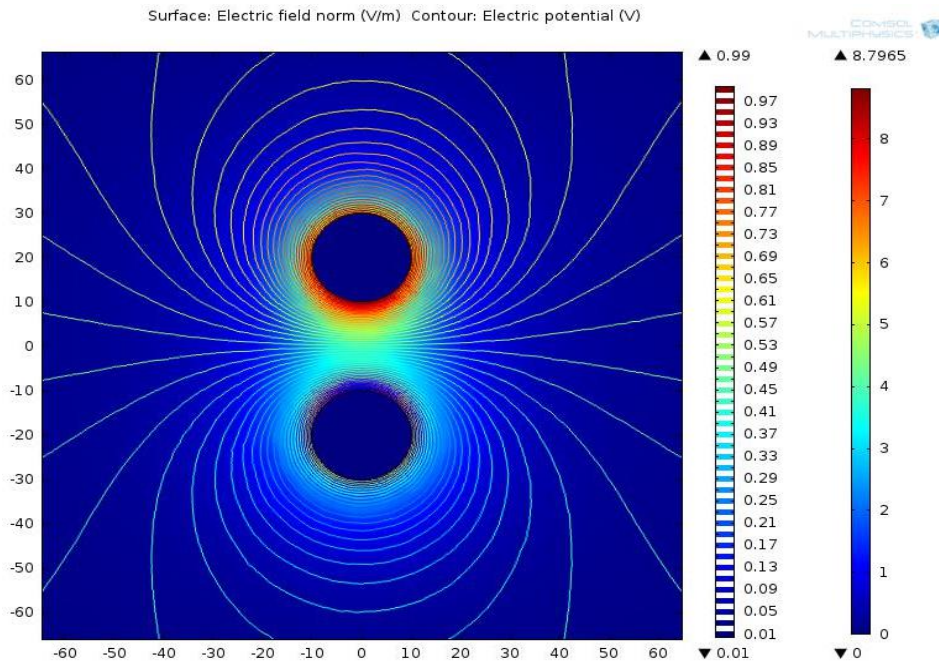


Fig.III.15. Répartition du champ électrique maximale entre les électrodes sphériques en utilisant la méthode des éléments finis.

On observe à partir Fig.III.13, que le champ électrique est maximum dans l'axe vertical, où les courbures des électrodes sphériques, plus ou moins uniforme et elle diminue progressivement dans les champs non uniformes. La Fig.III.15, on n'observe que la distribution du champ électrique non uniforme pour une électrode sphère-sphère. Le champ électrique est non uniforme dans l'axe des ordonnées. Le tracé de linéaire (1D) pour la méthode des éléments finis est représenté sur la figure. III.16.

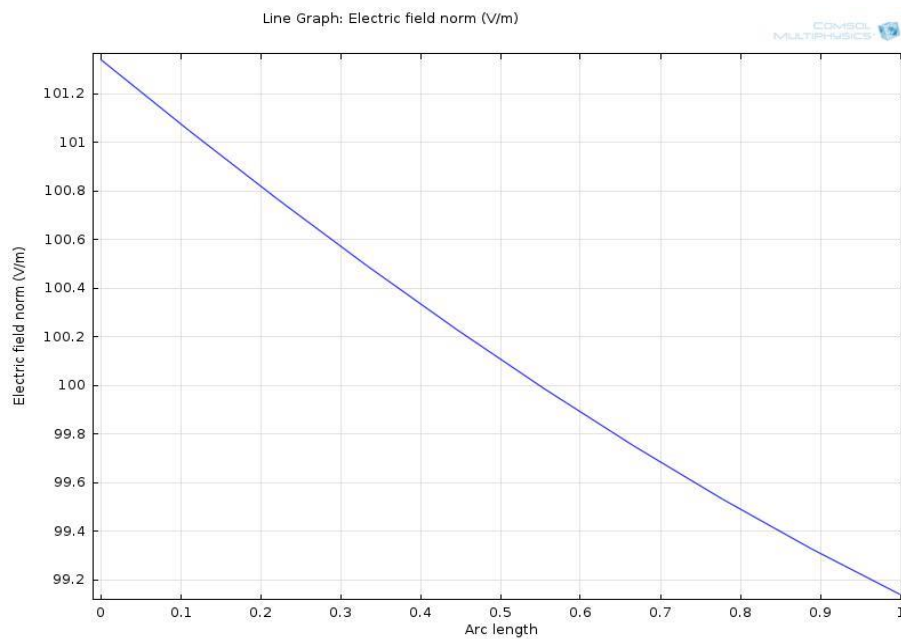



Fig.III.16. Distribution du champ électrique maximale en fonction de distance inter-électrodes.

La figure III.16 montre que le champ électrique maximal diminue avec l'augmentation de distance inter-électrodes.

III-3.Conclusion :

Enfin, ce chapitre explique les résultats qui ont été mesurés et sont indiquées dans les tableaux, comme nous l'avons noté que la tension de claquage et le champ électrique est affectée par la température, l'humidité, la distance entre les sphères et le rayant.



Conclusion Générale

Conclusion générale

Dans le système d'alimentation électrique, haute tension (HT) des équipements électriques sont principalement soumis au claquage d'isolateurs. Ces plus de tension qui peut les causer par les coups d'éclairage, une action de commutation, de déterminer la distance de sécurité nécessaire pour le niveau d'isolation. Les éclateurs à sphère sont largement utilisés pour le dispositif de protection dans de tels équipements électriques. L'éclateur à sphères est rempli avec un milieu isolant tel que l'isolant liquide (huile de transformateur), l'isolant solide et une isolation de gaz (SF_6 , N_2 , etc.). En règle générale, le milieu de l'air est largement utilisé comme un milieu isolant dans les différents équipements électriques de puissance que sa résistance de claquage est de 30 kV / cm. Dans cette étude, les caractéristiques de performance des tensions de claquage de l'air et les comportements de champ électrique sont étudiées théoriquement et expérimentalement en utilisant la méthode d'éclateur à sphère. Les caractéristiques de claquage de l'air entre les électrodes sphère-sphère sont observées avec des variations dans les arrangements d'électrodes, à la fois en taille et l'espacement. Il est conclu que l'augmentation de l'écart entre les sphères et proportionnelle à la tension de claquage et l'intensité du champ électrique et inversement proportionnelle au rayon de la sphère. Les caractéristiques du champ électrique maximum et le facteur de densité relatives d'air sont dérivés avec différente température et pression. On conclut que, avec augmentation de la température le champ électrique maximale et le facteur de densité relative de l'air sont réduites et avec une augmentation de la pression, ces grandeurs augmentent [1].

En outre, comme le taux d'humidité est l'un des facteurs importants pour la mesure de la caractéristique de répartition de tension et il est non modifiable au cours de l'expérience, un travail de simulation a été effectuée avec différentes conditions d'humidité de l'environnement par MATLAB. Le facteur d'humidité est également calculé pour différente humidité atmosphérique dans la simulation. Le champ électrique maximale également observée dans la méthode des éléments finis et il conclut que les courbures des électrodes sont uniforme alors champ électrique entre les électrodes est plus uniforme.

Bibliographie

- [1]. Paraselli Bheema Sandar, 'Measurement Of Air Breakdown Voltage And Electric Field Using Standad Sphère Gap Method' Department of Electrical Engineering National Institute of Technology, Rourkela Rourkela-769008, India.
- [2]. M. S. Naidu and V. Kamaraju, „High Voltage Engineering’, published by Tata McGraw-Hill 3rd edition, 2004.
- [3]. IEEE Standard Technique for High Voltage Testing, IEEE-std. 4-1995, New York 1995.
- [4]. E. Kuffel, “The Direct-Voltage Calibration of Air-Gaps in a Uniform Field and between Spheres up to 25cm in Diameter”, The Institution of Electrical Engineers Paper No. 3372 M , Feb 1961.
- [5]. A. S. Pillai and R. Hackam, “Electric field and potential distributions for unequal spheres using symmetric and asymmetric applied voltages”, IEEE Transactions on Electrical Insulation, Vol. EI-18, No.5, October 1983..
- [6]. IEC 60060-2:1962, High-voltage test techniques.
- [7]. C. L. Wadhwa, „High Voltage Engineering., published by New Age International (P) Limited, 2nd edition 2007.
- [8]. IEC 60060-2:1973, High-voltage test techniques - Part 2: Test procedures.
- [9]. IEC Publication 60052, “Voltage measurement by means of standard air gaps”, Geneva, 2002.
- [10]. Prof. Olivier de Weck, Dr. IL Yong Kim, “Finite Element Method”, Engineering Design and Rapid Prototyping 16.810 (16.682), January 12, 2004.
- [11]. Rakosh Das Begamudre, „Extra High Voltage AC Transmission Engineering“, published by New Age International (P) Limited, 3rd edition 2006.
- [12]. Osamu Fujii, Takahiro Hayakawa, Yukio Mizuno and Katsuhiko Naito, “Evaluation of Humidity Correction Factor of Disruptive Discharge Voltage of Standard Sphere Air Gaps”, IEEJ Trans., Published by John Wiley & Sons, Inc., 2008.
- [13]. P. N. Mikropoulos, C. A. Stassinopoulos and B. C. Sarigiannidou, “Positive Streamer Propagation and Breakdown in Air: the Influence of Humidity”, IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, Vol. 15, No. 2, April 2008.

- [14]. C. de Salles, J. P. Pennacchi and M. L. B. Martinez, "A New Proposal to Determine the Humidity Correction Factor for Lightning Impulse Tests and Application to Commercial Configurations", IEEE conference on power tech, June Bologna, Italy 2003.
- [15]. E. Kuffel, W. S. Zeangle & J. Kuffel, „High Voltage Engineering Fundamentals’, published by Butterworth-Heinemann 2nd edition, 2000.