



République Algérienne Démocratique et Populaire
Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique
Université Abderrahmane Mira de Bejaia
Faculté de Technologies
Département de Génie Electrique

Mémoire de fin de cycle

En vue de l'obtention du diplôme de master en Electrotechnique,

Option: Technique de haute tension

Thème

Etude des paramètres influant sur la rigidité diélectrique de l'air atmosphérique

Réalisé par :

M : BELKAID OMAR

M : IDIR HAMZA

Devant le jury composé de :

Présidente:

Mlle : N. ROUHA

Examineur:

M : BENNAI

Encadreurs:

M : A.LAIFAOUA

M : H.AIT SAID

Promotion : 2013/2014



Dédicaces

Avant propos,

Je tiens à remercier Dieu, qui illumine ma route à chaque lever, qui me guide sur le droit chemin, qui approfondit et renforce ma foi et, qui a fait de moi ce que je suis, par Bismi Allah EL Rahmane EL Rahim!

Je dédie ce travail à :

A ceux qui nous ont tout donné sans rien en retour

A ceux qui nous ont encouragés et soutenues dans les moments les plus difficiles

Et ceux à qui nous devons tant.

A MES PARENTS

A mon frère et mes sœurs

A toute ma famille idir et mébarkî

A tous mes Amis sur tout

Nassim, ghani ,bihman,kaku,didah

A toute la promotion T.H.T (2013-2014)

hamza



Dédicaces

Avant propos,

Je tiens à remercier Dieu, qui illumine ma route à chaque lever, qui me guide sur le droit chemin, qui approfondit et renforce ma foi et, qui a fait de moi ce que je suis, par Bismi Allah EL Rahmane EL Rahim!

Je dédie ce travail à :

A ceux qui nous ont tout donné sans rien en retour

A ceux qui nous ont encouragés et soutenues dans les moments les plus difficiles

Et ceux à qui nous devons tant.

A MES PARENTS

A tous mes frères : a.hakim , yahya,mohamed, alili, hamza et aissa

A mes oncles et mes tantes et leurs familles.

A tous mes Amis sur tout

Moukhtari abdessalam, chaabane saber

A toutes l'équipe de la faculté de technologie

A toute la promotion T.H.T (2013-2014)

BELKAID OMAR

Remerciements Remerciements

Tout d'abord, nous remercions profondément le bon Dieu le tout puissant de nous avoir donné la santé, le courage la patience pour réaliser ce travail.

Nous tenons à exprimer notre très grande considération et notre vive reconnaissance à **Mr : A. LAIFAOUI ET H-AIT SAID** pour leur patience, leurs précieux conseils, leur grande disponibilité pour l'aboutissement de ce travail et d'avoir accepté d'assurer l'encadrement de notre mémoire de fin cycle.

Qu'il accepte tous nos sentiments de gratitude et de déférence
Nous remercions les membres de jury, chacun par son nom, qui nous a honorés en acceptant d'examiner ce travail.

Nos remerciements s'adressent également à :

Madame N-ROUHA pour leur soutien et leurs conseils.

Que les professeurs du département génie électrique et surtout

Mr : R. BOUDISSA le trouvent ici l'expression de notre reconnaissance et respect.

Sommaire

Introduction générale	1
-----------------------------	---

Chapitre I

Les phénomènes électriques dans les gaz

I.1 Introduction	3
I.2 Phénomènes de décharges dans les gaz.....	3
I.3 Caractéristiques courant tension	4
I.3.1 Décharge non autonome sans multiplication électronique	5
I.3.2 Décharge non autonome avec multiplication électronique	5
I.3.3 Décharge autonome.....	7
I.4 Mécanisme d'avalanche électronique	7
I.5 Critère de claquage de Townsend	8
I.6 Loi de paschen	9
I.7 Théorie du streamer	10
I.7.1 Critère de Meek et critère de Reather	11
I.8 Le grand intervalle d'air (décharge type leader).....	12
I.7 Définition de l'effet couronne	12
I.8 Caractéristique courant-tension et régime de la décharge.....	13
I.9 Les impulsions de Trichel	14
I.10 Influence de différents paramètres sur la rigidité diélectrique.....	14
I.10.1 Influence de la distribution du champ électrique appliqué.....	14
I.10.2 Influence du type de tension appliquée.....	14
I.10.2.1 Tension continue.....	15
I.10.2.2 Tension alternative.....	15
I.10.3 Présence des particules conductrices dans l'air.....	15
I.11 Différents types d'amorçage des isolations gazeuses	16
I.11.1 Amorçage de l'air par avalanche primaire	16
I.11.2 Claquage de l'air par streamers.....	17
I.11.3 Disruption de l'air par leader	17
I.12 Conclusion.....	18

Sommaire

Chapitre II

Sommaire

II.1 Introduction.....	19
II.2 Modèle statistique de Weibull	19
II.3 Modèle de loi normale.....	20
II.4 La loi log-normale.....	20
II.5 Loi exponentielle.....	21
II.6 Méthodes de lissage linéaire.....	21
II.6.1 Principe de lissage linéaire par la méthode des moindres carrés.....	21
II.6.2 Lissage linéaire par la méthode du maximum de vraisemblance.....	23
II.7 Intervalles de confiance.....	23
II.8 Test d'adéquation.....	25
II.8.1 Test de khi-deux (χ^2)	25
II.8.2 Test de Kolmogorov-Smirnov	26
II.9 Conclusion	26

Chapitre III

Partie expérimentale

III.1 Introduction.....	27
III.2 Dispositifs expérimentaux.....	27
III.3 Déroulement des essais.....	29
III.4 Traitement statistiques	30
III.5 Résultats et discussion.....	30
III.5.1 Influence de la forme de tension.....	30
III.5.1.1 Diagrammes de Weibull.....	30
III.5.2 Influence de la vitesse de tension.....	37
III.5.2.1 Diagrammes de Weibull.....	40
III.5.4 Influence de la distance interélectrode.....	41
III.5.4.1 Diagrammes de Weibull.....	41
III.5. Influence de la géométrie des électrodes.....	42
III.6.1 Diagrammes de Weibull.....	57
III.6 Influence de la nature des électrodes.....	57
III.6.1 Diagrammes de Weibull.....	58

Sommaire

III.7 Conclusion	62
------------------------	----

Liste des figures

Fig. I. 1 décharge de towensd.....	4
Fig. I. 2 caractéristiques courant-tension pour différents régimes de la décharge sous tension continue.....	6
Fig. I. 3 schéma de l'avalanche de Townsend.....	8
Fig. I. 4 courbe de paschen pour l'air.....	10
Fig. I. 5 générations d'avalanches secondaires dans un processus de décharge positive.....	11
Fig. I. 6 développement de décharge ; type leader.....	12
Fig. I. 7 caractéristique courant-tension d'une décharge couronne dans l'air à pression atmosphérique (configuration pointe-plan, distance interélectrode : 13 mm).....	13
Fig. I. 8 amorçage d'un intervalle d'air par avalanche primaire.....	16
Fig. I. 9 disruptions d'un intervalle d'air par streamers.....	17
Fig. I. 10 amorçage d'un espace d'air par leader.....	18
Fig. III. 1 Schéma de dispositif des essais de claquage sous tension alternative sinusoïdale.....	28
Fig. III. 2 Schéma du dispositif des essais électriques sous tension continue.....	29
Fig. III. 3 Cellule utilisée pour les mesures.....	30
Fig. III. 4 Type, géométries et dimensions des différentes électrodes utilisées	30
Fig. III. 5 Diagramme de Weibull à deux paramètres pour différentes distances sous tension alternative.....	31
Fig. III. 6 Diagramme de Weibull à deux paramètres pour différentes distances sous tension continue de polarité négative.....	32
Fig. III. 7 Diagramme de Weibull à deux paramètres pour différentes distances sous tension continue de polarité positive	32
Fig. III. 8 Diagramme de Weibull à trois paramètres pour une distance de 2 cm sous tension continue.....	34

Liste des figures

Fig.III. 9 Diagramme de Weibull à trois paramètres pour une distance 5 cm sous tension continu polarité positive.....	35
Fig. III. 10 Diagramme de Weibull à trois paramètres pour une distance 5 cm sous tension continu polarité négative.....	35
Fig. III. 11 tracé de tension de claquage des distances inter-électrodes pour les trois formes de tension	37
Fig. III. 12 Diagramme de Weibull à deux paramètres pour une vitesse de montée de la rampe sous tension alternative pour une distance 1 cm.....	38
Fig. III. 13 Diagramme de Weibull à deux paramètres pour une vitesse de montée de la rampe sous tension alternative pour une distance 7 cm.....	39
Fig. III. 14 Diagramme de Weibull à trois paramètres pour une vitesse de montée $v=4$ kV/s de la rampe	40
Fig. III. 15 tracé de tension de claquage en fonction de la vitesse de montée de la rampe de tension.....	41
Fig. III. 16 Diagramme de Weibull à deux paramètres pour différentes distances sous tension alternative.....	42
Fig. III. 17 influence la distance interélectrode	43
Fig. III. 18 Diagramme de Weibull à deux paramètres pour une configuration d'électrode sphère-sphère	44
Fig. III. 19 Diagramme de Weibull à deux paramètres pour une configuration d'électrode pointe-pointe.....	44
Fig. III.20 Diagramme de Weibull à deux paramètres pour une configuration d'électrode disque -disque	45
Fig.III.21 Diagramme de Weibull à trois paramètres pour une configuration de l'électrode sphère –sphère à une distance 1 cm.....	47
Fig.III.22 tracé de la tension de claquage en fonction de la distance interélectrode pour même configuration des électrodes	48

Liste des figures

Fig.III. 23 Diagramme de Weibull à deux paramètres pour une configuration de l'électrode pointe-disque.....	49
Fig.III. 24 Diagramme de Weibull à deux paramètres pour une configuration de l'électrode pointe-sphère.....	49
Fig.III.25 Diagramme de Weibull à trois paramètres pour une configuration d l'électrode pointe –disque	51
Fig. III.26 trace la tension de claquage en fonction de la distance interélectrode pour l'électrode active pointe.....	52
Fig.III. 27 Diagramme de Weibull à deux paramètres pour une configuration d l'électrode sphère-disque.....	53
Fig. III.28 Diagramme de Weibull à deux paramètres pour une configuration de l'électrode sphère-pointe.....	53
Fig.III. 29 Tracer la caractéristique de la tension de claquage en fonction la distance inter électrode pour l'électrode active.....	55
Fig. III. 30 Diagramme de Weibull à deux paramètres pour une configuration d l'électrode disque-pointe.....	56
Fig. III. 31 Diagramme de Weibull à deux paramètres pour une configuration d l'électrode disque-sphère.....	56
Fig. III.32 Tracé de la caractéristique de tension de claquage en fonction de la distance inter électrode pour l'électrode active disque.....	58
Fig. III. 33 Diagramme de Weibull à deux paramètres pour une configuration d'électrode pointe-pointe en acier.....	59
Fig. III. 34 Diagramme de Weibull à deux paramètres pour une configuration d'électrode pointe-pointe en inox.....	59
Fig. III. 35 Diagramme de Weibull à deux paramètres pour une configuration d'électrode pointe-pointe en aluminium.....	60
Fig. III. 36 Diagramme de Weibull à deux paramètres pour une configuration d'électrode pointe-pointe en cuivre.....	60

Liste des figures

- Fig. III. 37** Diagramme de Weibull à deux paramètres pour une configuration d'électrode pointe-pointe en bronze.....61
- Fig. III. 38** tracer la tension de claquage en fonction de la distance interélectrode.....64

Liste des tableaux

Tab.1 : Résultats des paramètres de Weibull et des deux tests d'adéquation Pour différentes distances sous tension alternative	33
Tab.2 Résultats des paramètres de Weibull et des deux tests d'adéquation Pour différentes distances sous tension continue de polarité négative	33
Tab.3 Résultats des paramètres de Weibull et des deux tests d'adéquation pour différentes distances sous tension continue de polarité positive	34
Tab.4 Résultats des paramètres de Weibull et des deux tests d'adéquation pour différentes distances sous tension continue de polarité positive	36
Tab.5 Résultats des paramètres de Weibull et des deux tests d'adéquation pour différentes distances sous tension continue de polarité négative	39
Tab.6 Résultats des paramètres de Weibull en fonction de la vitesse de montée de la rampe de tension et des deux tests d'adéquation pour sous tension alternative	39
Tab.7 Résultats des paramètres de Weibull en fonction de la vitesse de montée de la rampe de tension et des deux tests d'adéquation pour sous tension alternative	40
Tab.8 Résultats des paramètres de Weibull en fonction de la vitesse de montée de la rampe de tension et des deux tests d'adéquation pour sous tension alternative.....	41
Tab.9 Résultats des paramètres de Weibull et des deux tests d'adéquation pour différentes distances sous tension alternative	42
Tab.10 Résultats des paramètres de Weibull et des deux tests d'adéquation pour pour une configuration de l'électrode Sphère -sphère	46
Tab.11 Résultats des paramètres de Weibull et des deux tests d'adéquation pour une configuration de l'électrode pointe -pointe	46
Tab.12 Résultats des paramètres de Weibull et des deux tests d'adéquation pour une configuration de l'électrode disque -disque	46

Liste des tableaux

Tab.13 Résultats des paramètres de Weibull et des deux tests d'adéquation pour une configuration de l'électrode Sphère -sphère à une distance 1 cm	47
Tab.14 Résultats des paramètres de Weibull et des deux tests d'adéquation pour une configuration de l'électrode pointe -sphère	50
Tab.15 Résultats des paramètres de Weibull et des deux tests d'adéquation pour une configuration d'électrode pointe -disque	50
Tab.16 Résultats des paramètres de Weibull et des deux tests d'adéquation une configuration de l'électrode disque -pointe à distance 3	51
Tab.17 Résultats des paramètres de Weibull et des deux tests d'adéquation pour une configuration de l'électrode Sphère -disque	54
Tab.18 Résultats des paramètres de Weibull et des deux tests d'adéquation pour une configuration de l'électrode Sphère -disque	54
Tab.19 Résultats des paramètres de Weibull et des deux tests d'adéquation pour une configuration de l'électrode Sphère -pointe	57
Tab.20 Résultats des paramètres de Weibull et des deux tests d'adéquation pour de l'électrode disque -pointe	57
Tab.21 Résultats des paramètres de Weibull et des deux tests d'adéquation pour une configuration de l'électrode pointe-pointe en acier	57
Tab.22 Résultats des paramètres de Weibull et des deux tests d'adéquation pour une configuration de l'électrode pointe-pointe en aluminium	61
Tab.23 Résultats des paramètres de Weibull et des deux tests d'adéquation pour une configuration de l'électrode pointe-pointe en cuivre	62
Tab.24 Résultats des paramètres de Weibull et des deux tests d'adéquation pour une configuration de l'électrode pointe-pointe en bronze.....	63
Tab.25 Résultats des paramètres de Weibull et des deux tests d'adéquation pour une configuration de l'électrode pointe-pointe en inox	63

Liste des tableaux

Introduction générale

Introduction générale

L'air est l'élément isolant naturel le plus utilisé en technique de haute tension; lignes et postes, utilisé dans la plupart des installations; appareils et machines électriques dont il assume également le refroidissement par circulation naturelle ou forcée. Il est aussi utilisé pour l'isolation des câbles coaxiaux à haute fréquence en télécommunication et surtout utilisé comme isolant dans les lignes aériennes de moyenne et de haute tension lors du transport d'énergie électrique. Formé d'un mélange d'environ un volume d'oxygène, quatre volumes d'azote plus quelques gaz rares comme l'argon, néon, krypton, hélium et xénon. Il contient aussi du gaz carbonique et de la vapeur d'eau. Après claquage, l'air reprend rapidement son pouvoir isolant initial, il est auto-régénérateur.

L'étude des décharges électriques dans l'air présente de l'intérêt d'un point de vue industriel pour les problèmes liés à l'isolement et à la protection des réseaux de transport et de distribution d'énergie (lignes à haute tension, transformateurs, générateurs...). Par contre la fiabilité est le problème majeur lors du dimensionnement de l'isolation des dispositifs électriques.

La rupture diélectrique est un phénomène aléatoire; pour des échantillons placés dans des conditions expérimentales identiques, on n'obtient pas une valeur unique du champ de rupture, mais une distribution de valeur. Il est donc nécessaire de tester un grand nombre d'échantillons identiques et de mener une analyse statistique sur la dispersion des champs de rupture afin d'en déduire éventuellement des lois de vieillissement. Une base théorique sur les statistiques de la rupture diélectrique a été rapportée dans la littérature. Le modèle le plus adapté est celui de Weibull.

Le travail que nous présentons s'insère dans le cadre de l'évaluation de la tenue diélectrique du l'air atmosphérique sous tension alternative pour plusieurs situations. Plusieurs points seront abordés à savoir ; l'influence de la forme et de la rampe de tension, l'influence de la géométrie, de la configuration et de la nature des électrodes ainsi que de la distance inter-électrodes sur la rigidité diélectrique de l'air.

Ce travail comprend trois chapitres et une conclusion générale.

Le premier chapitre sera consacré aux concepts physiques de base intervenant dans les gaz tels des phénomènes et des mécanismes prédisruptifs rencontrés en présence d'un champ électrique.

Dans le deuxième chapitre sera exposé une base théorique sur les statistiques de la rupture diélectrique ainsi que les principales lois utilisées en fiabilité, entre autre; les méthodes numériques

d'estimation des paramètres de ces lois et les tests d'adéquation pour l'ajustement de ces modèles de lois seront traitées. L'application du modèle de Weibull à la caractérisation de la rupture diélectrique des isolants sera abordée.

Le dernier chapitre comprend deux parties, une partie qui décrit les dispositifs expérimentaux utilisés dans ce travail et l'autre les résultats des mesures expérimentales obtenus, leurs traitements statistiques ainsi que leurs interprétations.

Enfin, nous terminerons ce mémoire par une conclusion générale et quelques perspectives.

Chapitre I

Les phénomènes électriques dans les gaz

I.1 Introduction [1,2]

Un gaz est constitué d'un grand nombre de particules de différents types, atomes, molécules, ions, électrons en agitation incessante. En absence de champ électrique, les molécules de gaz sont soumises à l'agitation thermique et subissent une multitude de chocs. Ces particules bombardées, ou parfois non-élastiques avec transfert total ou partiel d'énergie. Ces chocs ont pour cause des agents extérieurs tels que la radioactivité terrestre et atmosphérique, ainsi que les différents rayonnements cosmiques.

I.2 Phénomènes de décharges dans les gaz [3]

Le gaz le plus abondant et le plus utilisé dans l'isolation électrique (lignes aériennes, électrostatique...) est l'air. Cependant, d'autres gaz tels que l'azote (N_2), le dioxyde de carbone (CO_2) et surtout l'hexafluorure de soufre (SF_6) connaissent, depuis plus de trois décennies, un succès grandissant dans le domaine des systèmes haute tension (postes blindés, câbles à isolation gazeuse, ...). Leur utilisation a permis d'améliorer la fiabilité des systèmes et d'en réduire leurs poids et dimensions. Sous l'effet d'agents ionisants naturels ou artificiels (UV, X, γ), les gaz peuvent perdre leurs propriétés diélectriques et devenir plus ou moins conducteurs. Cette perte de propriétés (ionisation) se traduit par la dissociation de molécules neutres en électrons et en ions. En présence d'un champ électrique entre les électrodes (planes et parallèles), le mouvement provoqué par les porteurs de charges (en augmentation) donne naissance à un courant dit "courant de décharge". La variation de ce courant en fonction de la tension (caractéristique courant - tension) a été étudiée pour la première fois par Townsend. En absence de champ électrique, il existe un équilibre dans lequel le taux de production d'électrons et d'ions positifs est compensé.

Il convient toutefois de noter que la présence d'un champ dans l'espace interélectrode peut donner lieu, selon le niveau de tension appliqué aux électrodes, à une décharge de type non autonome ou autonome.

I.3 Caractéristiques courant tension [4]

La variation du courant de décharge en fonction de la tension appliquée à un intervalle de gaz compris entre deux électrodes planes et parallèles (Fig.1) est représentée sur la (Fig. I. 2) Cette caractéristique $I = f(V)$ comporte différentes zones correspondant chacune à un régime de décharge donné.

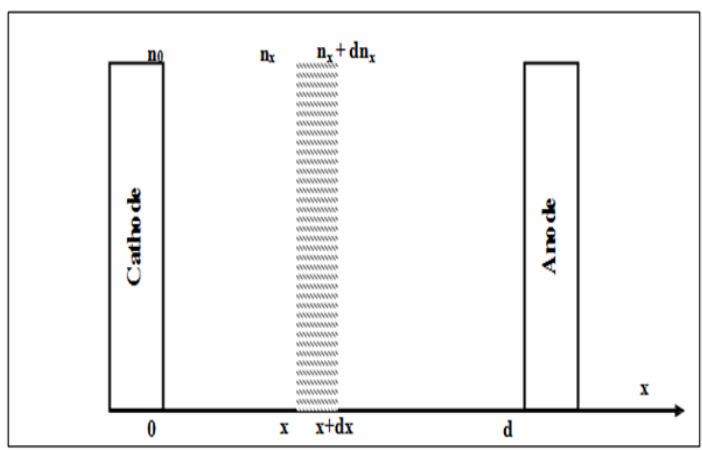


Fig. I. 1 décharge de Townsend

N_0 : nombre d'électrons/seconde émis de la cathode.

N_x : nombre d'électrons à l'abscisse x .

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

I.3.1 Décharge non autonome sans multiplication électronique

Ce régime est caractérisé par l'absence de tout phénomène lumineux et des courants extrêmement faibles. La tension appliquée (quelques dizaines de volts) et par conséquent le champ électrique sont trop faibles pour provoquer une ionisation par choc électronique. La conduction ne peut apparaître qu'en présence d'une source extérieure assurant cette ionisation (rayons cosmiques, sources radioactives, émission photoélectrique). La décharge ne peut s'entretenir d'elle-même, elle est dite " non autonome ".

I.3.2 Décharge non autonome avec multiplication électronique

En augmentant progressivement la tension V , le courant croît linéairement jusqu'à une certaine valeur I_0 dite de saturation. I_0 se maintiendra à cette valeur tant que V reste inférieur à la tension d'ionisation V_2 du gaz considéré. Dès que V dépasse V_2 , le courant se remet à croître de façon très rapide.

A ce stade, la décharge dépend encore des sources extérieures d'ionisation. Cette croissance rapide du courant résulte de la multiplication électronique. Lorsque le champ électrique E augmente, les électrons émis par la cathode (électrons primaires), sous l'effet d'un rayonnement quelconque, sont de plus en plus accélérés. Certains gagnent ainsi une énergie suffisante pour ioniser par collisions des particules neutres, donnant naissance à des ions positifs et à de nouveaux électrons. Chaque électron nouvellement créé contribue à son tour par ionisation, au cours de son

déplacement vers l'anode, à la création d'une avalanche électronique véritable. Par la même, le nombre d'ions positifs augmente aussi.

Le nombre de collisions est d'autant plus important que E est intense. Il est caractérisé par un coefficient d'ionisation α appelé "premier coefficient d'ionisation de Townsend".

Celui - ci représente le nombre moyen de chocs ionisants qu'un électron produit par unité de longueur dans la direction du champ

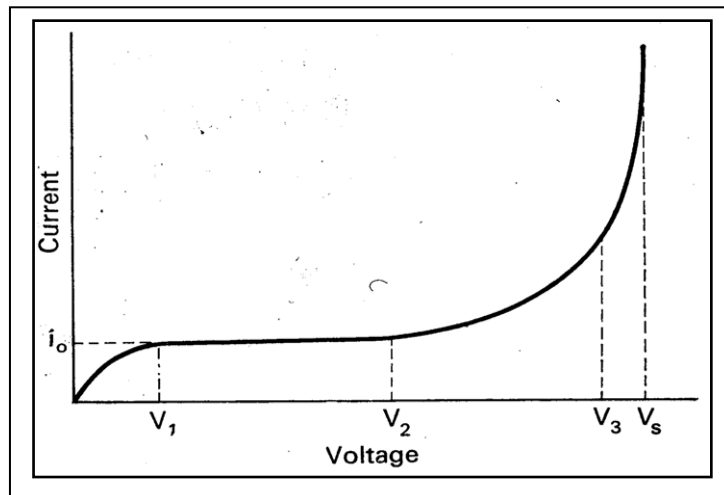


Fig.I.2 Caractéristiques courant – tension pour différents régimes de la décharge sous Tension continue

Si N_0 est le nombre d'électrons émis par la cathode par unité de temps et Nx le nombre d'électrons traversant le plan d'abscisse x par unité de temps et d la distance interélectrode, l'augmentation de ce nombre sous l'effet de chocs ionisants sur un parcours dx , en admettant a

Constant, s'écrit :

$$dn_x = n_x ad \tag{1}$$

En tenant compte qu'à $x=0, n_x=n_0$

$$n_x = n_0 e^{ax} \tag{2}$$

Quant au nombre n_d d'électrons arrivant à l'anode ; il se déduit aussitôt de :

$$n_d = n_0 e^{ad} \tag{3}$$

n_d : est le nombre d'électrons et la charge collectée par unité de temps vaut :

$$en_d = en_0 e^{\alpha d} \quad (4)$$

Le courant collecté à l'anode vaut:

$$i = i_0 e^{\alpha d} \quad (5)$$

i_0 : est le courant photo électrique initiale à la cathode

I.3.3 Décharge autonome

Si $(e^{\alpha d})$ est le nombre d'électrons libres produits par un électron dans une avalanche de longueur d , $(e^{\alpha d} - 1)$ est le nombre d'ions positifs produits simultanément. Le nombre

D'électrons émis par la cathode (N_c) vers l'anode dans l'intervalle interélectrode donnent

Naissance à $[N_c (e^{\alpha d} - 1)]$ ions positifs, qui bombardent à leurs tours la cathode, libèrent

$[N_c (e^{\alpha d} - 1)\gamma]$ Électrons secondaires en faisant intervenir un nouveau coefficient d'ionisation. Celui-ci est le deuxième coefficient d'ionisation de Townsend" représentant le rapport entre le nombre d'électrons libérés à partir de la cathode et le nombre d'ions positifs qui tombent sur la cathode. La décharge dans ce cas est dite décharge autonome.

I.4 Mécanisme d'avalanche électronique [2]

Si on considère un gaz contenu entre deux électrodes, il peut exister dans ce gaz, en absence de tout champ électrique appliqué, un certain nombre de particules chargées produites soit par des mécanismes naturels, tels que rayonnement ultraviolet ou radioactivité, soit par des mécanismes artificiels, par exemple en bombardant la surface cathodique avec une source de rayonnement ultraviolet pour extraire des électrons.

Si un champ électrique est appliqué, les électrons sont suffisamment accélérés par le champ pour produire d'autres électrons par des collisions, qui à leur tour acquièrent par le champ électrique assez d'énergie pour ioniser d'autres atomes, et ainsi de suite, et le nombre d'électrons libres continuera à augmenter comme il continuera à se déplacer sous l'action du champ électrique. La quantité d'électrons et d'ions positifs produits de cette façon s'appelle une avalanche électronique. C'est ce phénomène, qui provoque un accroissement exponentiel de la densité de charge électronique lorsqu'on s'éloigne de l'électrode active. Le claquage donc aura lieu du fait du phénomène d'avalanche (Fig. I. 3)

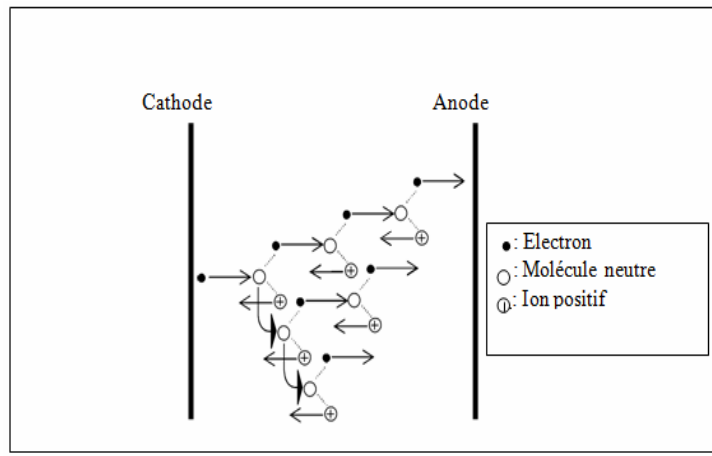


Fig.I.3 : Schéma de l'avalanche de Townsend

Cette avalanche peut être étudiée quantitativement à partir de la connaissance du coefficient α , dit premier coefficient d'ionisation de Townsend. Ce dernier représente le nombre d'électrons (ou d'ions positifs) créés par un électron par unité de longueur.

Une expression empirique exploitable considère que l'énergie thermique des électrons est acquise par le travail du champ électrique sur une distance de l'ordre du libre parcours moyen. Or ce dernier est inversement proportionnel à la pression. Donc, en introduisant les constantes A et B déterminées expérimentalement, on a :

$$\alpha = A \cdot P \exp\left(-\frac{BP}{E}\right) \tag{6}$$

P: la pression atmosphérique

E: le champ électrique appliqué

α : le premier coefficient d'ionisation de Townsend

I.5 Critère de claquage de Townsend [5]

Avant le claquage le courant i peut s'écrire :

$$i = \frac{i_0 e^{\alpha d}}{1 - \gamma(e^{\alpha d} - 1)} \tag{7}$$

Pour une distance critique $d = d_c$ l'expression :

$$1 - \gamma(e^{\alpha d_c} - 1) = 0 \tag{8}$$

$$\gamma(e^{\alpha d_c} - 1) = 1 \tag{9}$$

Or comme : $e^{\alpha d_c} \gg 1$

On obtient : $\gamma e^{\alpha d_c} = 1$ (10)

Pour chaque valeur de E/P , on trouve une valeur de d_c et une tension de rupture diélectrique :

$$v_c = E d_c \quad (11)$$

Le critère de Townsend ainsi donné peut s'interpréter tout simplement en considérant que $e^{\alpha d}$ représente le nombre d'ions positifs créés par une avalanche primaire à partir d'un seul électron. Arrivant à la cathode ils vont produire en moyenne $\gamma e^{\alpha d}$ électrons secondaires.

- ✓ Si $\gamma e^{\alpha d_c} < 1$, la décharge est dite non autonome, car elle ne peut se maintenir d'elle-même par le fait des mécanismes secondaires si l'apport d'électrons créés par une source extérieure est interrompu ;
- ✓ Si $\gamma e^{\alpha d_c} = 1$, le nombre d'ions créés par l'avalanche primaire est en moyenne juste suffisant à maintenir par bombardement de la cathode, l'avalanche électronique. la décharge est autonome, c'est-à-dire qu'elle peut se maintenir en absence d'une source extérieure de production de charge. Ce critère définit le critère d'amorçage V_c
- ✓ Si $\gamma e^{\alpha d_c} > 1$, le processus des avalanches successive est cumulatifs, le courant devient très intense, un canal conducteur se forme, donnant naissance à un claquage de l'intervalle interélectrode.

I.6 Loi de Paschen [6]

On sait que $\frac{\alpha}{p} = f\left(\frac{E}{p}\right)$ et $\gamma = g\left(\frac{E}{p}\right)$

La relation $[\gamma \exp(\alpha d) = 1]$ (critère de la rupture électrique) devient

$$g\left(\frac{E}{p}\right) \cdot e^{p f\left(\frac{E}{p}\right) d} = 1 \quad (12)$$

Avec $E = \frac{V_c}{d}$ (13)

Le critère de la rupture prend la forme suivante :

$$g\left(\frac{V_c}{d p}\right) \cdot e^{p f\left(\frac{V_c}{d p}\right) d} = 1 \quad (14)$$

Cette expression montre que V_c est une fonction implicite de produit **d.p**

$V_c = f(d.p)$ est connu sous le nom de la loi de Paschen.

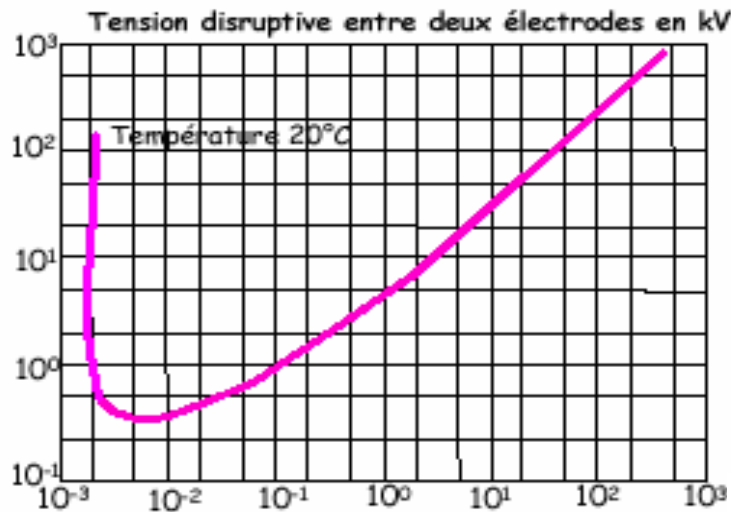


Fig.I.4 courbe de Paschen pour l'air

Cette courbe montre que V_c possède une valeur minimale unique pour une valeur $\mathbf{d.p} = \mathbf{d.p}_{\min}$

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

I.7 Théorie du streamer [7,8]

Il a été observé dans certains cas que la décharge prend l'aspect de filaments se propageant entre les électrodes, c'est la formation du streamer. Ce phénomène peut être défini par une succession d'avalanches continues. Dans ce cas, la photo-ionisation du gaz dont la charge d'espace générée par la première avalanche de type Townsend près de la cathode joue un rôle important. Ces photoélectrons amorcent des avalanches secondaires près de l'anode en créant une charge d'espace positive. Une étincelle se forme lorsqu'une avalanche d'électrons vient neutraliser cette charge d'espace positive.

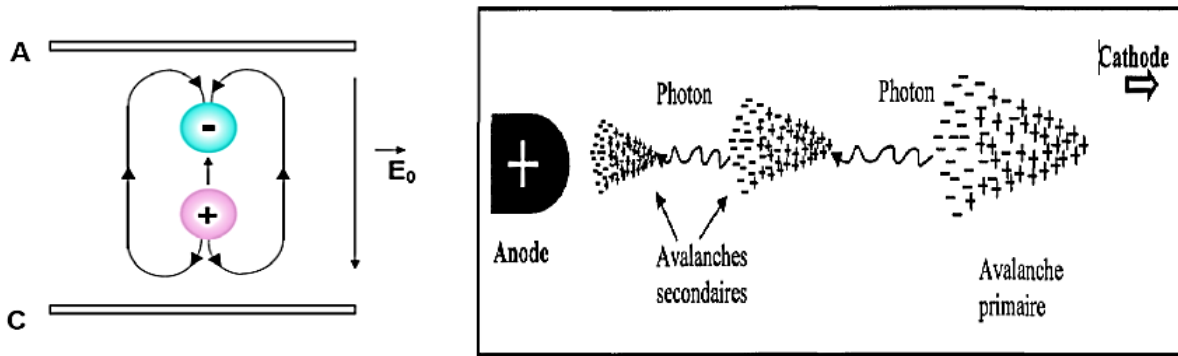


Fig.I. 5 génération d’avalanches secondaires dans un processus de décharge positive.

Cette théorie a été développée à la suite des travaux de Reather, Meek et Loeb qui ont pu analyser ce phénomène sur des bases théoriques.

I.7.1 Critère de Meek et critère de Reather

La taille critique de l’avalanche qui donne naissance au streamer est définie par plusieurs critères.

- a) **Critère de Meek** : l’avalanche peut se transformer en streamer si le champ de charge d’espace « E_C » des ions positifs est sensiblement égal au champ appliqué « E_g ».

$$E_C = K E_g \quad (k \approx 1) \tag{15}$$

- b) **Critère de Reather** : l’avalanche peut se transformer en streamer si le nombre des décharges de l’avalanche principale atteint 10^8 à 10^{10} électrons. Ce critère s’écrit simplement dans le cas du champ non uniforme :

$$\int (\alpha - \eta) dx = \log n_e \tag{16}$$

Avec :

x : représente la distance critique.

n_e : le nombre critique d’électrons produits par l’avalanche en général, ce nombre est de l’ordre de 10^8 .

Le processus d’avalanche a été étudié par Townsend en 1914. Quand la tension atteint la valeur seuil, les électrons présents peuvent acquérir dans le champ assez d’énergie pour ioniser le gaz. On est alors devant un processus d’avalanche qui entraîne une augmentation rapide du courant.

I.8 Le grand intervalle d'air (décharge type leader) [9]

On constate que la tenue diélectrique des grands intervalles d'air diminue avec la distance comprise entre les électrodes. Le champ électrique moyen à l'amorçage est encore de 4,5kv/cm pour un intervalle de 1m, il tombe à 3,1kv/cm pour 3m ; 1,9KVpour 10m et 1KV/cm pour 30m. ceci est dû à l'influence d'un nouveau phénomène physique dénommé (**leader**).il est matérialisé par un canal lumineux de quelques millimètres de diamètre qui est observé dès que la distance interélectrode dépasse une valeur comprise entre 40 et 80 cm selon les conditions expérimentales .lorsque les streamers qui participent à l'apparition de l'effet couronne sont suffisamment développés, le gaz contenu dans le tronc commun de la décharge s'échauffe sous l'action du courant électronique, sa conductivité se met à croître, si bien que tout se passe comme si l'électrode s'était allongée.

L'effet couronne se trouve donc déplacé plus en avant dans l'intervalle et de proche en proche, ce canal s'allonge jusqu'à traverser complètement l'espace interélectrode c'est par un mécanisme analogique que se développe un coup de foudre.

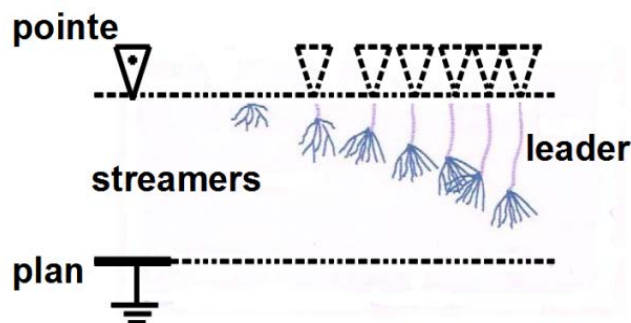


Fig. I. 6 Développement de décharge; type leader

I.7 Définition de l'effet couronne [10,11]

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 et à des pressions de quelques torrs à quelques atmosphère.

La décharge couronne se manifeste dans les conditions naturelles. Elle apparait sous forme d'une gaine lumineuse qui apparait 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.

I.8 Caractéristique courant-tension et régime de la décharge [11]

La caractéristique courant-tension de la décharge couronne est obtenue en faisant croître la tension appliquée à l'intervalle gazeux, la courbe permet de distinguer quatre régimes régissant la décharge couronne.

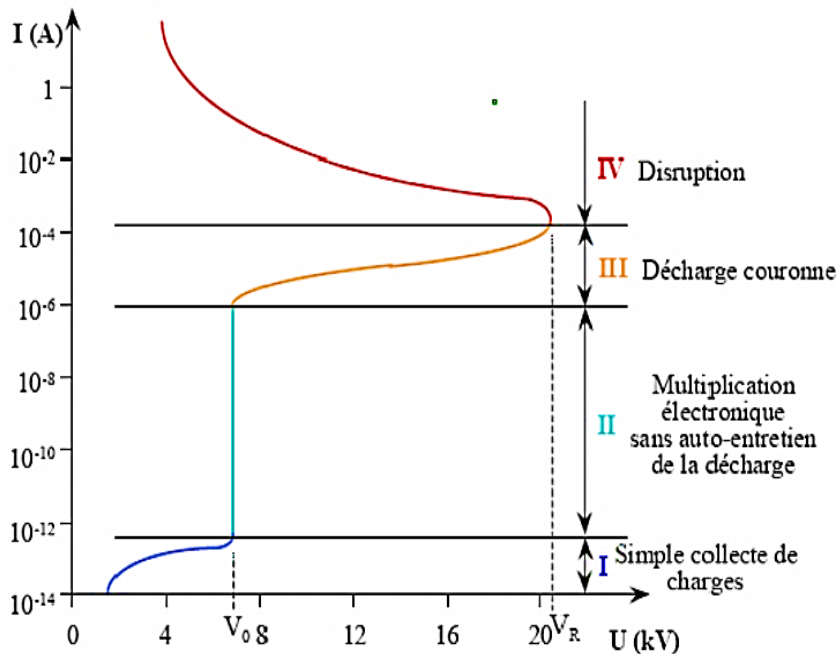


Fig.I.7 : Caractéristique courant-tension d'une décharge couronne dans l'air à pression atmosphérique (configuration pointe-plan, distance inter électrode : 13mm).

- ✓ **Premier régime :** consiste en la collecte des espèces chargées présentes naturellement dans le milieu, ces espèces sont produites par l'impact de rayons cosmiques ou des Particules issues de la désintégration spontanée de certains atomes (radioactivité naturelle) sur le gaz présent dans l'espace interélectrode.
- ✓ **Second régime :** qui se produit à partir d'une tension seuil V_0 , traduit le déclenchement de l'avalanche électronique de Townsend mais ne répond pas encore au critère d'auto-entretien de la décharge. La décharge est qualifiée de non-autonome car elle dépend du processus d'ionisation externe pour donner naissance aux électrons germes. Pour ce régime, le courant augmente très fortement pour une très faible variation de la tension appliquée.
- ✓ **Troisième régime :** l'ionisation du gaz par la décharge faible est suffisante pour ne plus nécessiter de phénomène d'ionisation extérieure, la décharge est auto-entretenu. C'est le régime de la décharge couronne, où apparaissent les dards (streamers) responsables de la composante impulsionnelle du courant.

- ✓ **Quatrième régime** : Au-delà d'une tension appliquée V_r , la température du canal augmente fortement, ce qui provoque la dilatation brutale du gaz. Le champ réduit E/N est alors suffisamment important pour que les phénomènes d'ionisations deviennent majoritaires par rapport à l'attachement électrique. Le régime d'arc est atteint, le milieu passe de l'état de plasma hors équilibre à l'état de plasma thermique.

I.9 Les impulsions de Trichel [12]

Lorsque on étudie la décharge négative en géométrie pointe – plan sous tension continue, on se rend compte que l'effet couronne n'est pas le premier phénomène à se manifester. En effet, quand on augmente progressivement la tension appliquée, on voit se développer, à partir d'un certain niveau de tension, des streamers isolés suivis d'un régime d'impulsions de Trichel. Ces dernières sont, en fait, des avalanches électroniques qui se développent au voisinage de la pointe en créant des ions négatifs, qui ont un effet stabilisateur temporaire dont les impulsions de Trichels se produisent à une fréquence qui augmente avec la tension appliquée. Lorsque cette dernière devient trop élevée, il y a émission d'une couronne négative.

I.10 Influence de différents paramètres sur la rigidité diélectrique [13]

I.10.1 Influence de la distribution du champ électrique appliqué

La distribution du champ électrique influence le comportement du streamer. Si les électrodes sont des plans parallèles, le champ est homogène. Si son intensité est telle qu'un streamer prend naissance, son développement sera infini, jusqu'à la cathode. La condition de claquage de l'intervalle se ramène à la condition d'apparition du streamer

Si les électrodes sont dissymétriques, par exemple une configuration pointe-plan, les avalanches se développeront préférentiellement dans la région de fort champ c'est-à-dire près de la pointe. Le streamer s'il prend naissance se propagera tant que le champ électrique total dans la région active permet de reproduire des avalanches secondaires.

Si la pointe est à un potentiel négatif, les avalanches s'éloignent de la pointe et les streamers aussi. Ce mécanisme de propagation du streamer est plus complexe et pas parfaitement expliqué.

I.10.2 Influence du type de tension appliquée

La forme de la tension appliquée est importante pour décrire le déclenchement du streamer. Elle peut être continue (un échelon), alternative ou une rampe. Raisonons d'abord dans la

configuration pointe positive plan à la masse pour laquelle les mécanismes sont mieux connus.

I.10.2.1 Tension continue

On peut définir un niveau de tension minimum qui correspond à l'apparition du premier streamer. Si ce niveau est appliqué ou même dépassé, un streamer se développe. S'il atteint le plan, un court-circuit limité par le circuit extérieur prend place. Si le champ n'est pas suffisant pour que le streamer traverse tout l'intervalle interélectrode, la partie "passive" a pour effet de réduire le champ au voisinage de l'électrode privant tout phénomène d'ionisation. Les processus de recombinaison de dérive et de diffusion vont dégager petit à petit au voisinage de la pointe. Le champ électrique augmente et les conditions d'initiation d'avalanche et de streamer réapparaissent. Le résultat est une succession de petites décharges streamer à fréquence régulière dépendant du niveau de la tension. Ce streamer porte aussi le nom de "dard".

I.10.2.2 Tension alternative

Les processus sont identiques car la fréquence de la tension appliquée est très inférieure à celle des streamers. La fréquence de répétition des couronnes est du domaine de l'audible. C'est précisément les bourdonnements que l'on entend sous les lignes HT. Dans ce cas, les streamers se développent tout autour du câble HT et on parle de "décharge couronne".

Il existe d'autres paramètres qui agissent sur le claquage dans les gaz nous citons quelques-uns:

- Métal des électrodes.
- Pollution extérieure.
- Température de l'intervalle.
- Pression du gaz, ...etc.

I.10.3 Présence des particules conductrices dans l'air

Les particules existant dans l'intervalle d'air pointe-plan sont responsables des modifications des conditions de décharge. La présence de particules conductrices réduit la rigidité de l'air. Un champ uniforme, relativement faible, peut déplacer des objets fins métalliques d'où la décharge est initiée par des micros-décharge produite par ces particules quand elles sont proches des électrodes, ont analysé les conditions de décharge en présence de petites particules conductrices sphérique, de rayon R et de masse m sous l'effet du champ de décharge couronne pour un système pointe-plan avec une polarité positive .

I.11 Différents types d'amorçage des isolations gazeuses [14]

- ✓ Première avalanche
- ✓ Streamer
- ✓ Leader

On choisit comme configuration pointe positive-plan et pour isolation gazeuse l'air pour les raisons suivantes :

- ✓ Tension de claquage plus petite possible;
- ✓ Intérêt technique (dimensionnement des isolations externes).

I.11.1 Amorçage de l'air par avalanche primaire

Ce type de claquage n'existe que dans le cas de champ extrêmement inhomogène (aiguilles, fil fin...etc) et pour des tensions de choc relativement peu variable (tension continue, tension alternative à fréquence industrielle) car d'une part l'avalanche électronique n'atteint pas sa taille critique avant le claquage et que d'autre part sa durée de vie est suffisamment grande pour que la formation d'un champ homogène par les charges d'espace s'établisse. Le champ électrique dans l'avalanche est de l'ordre de 15 à 20 kV/cm. La naissance d'un leader instable peut s'expliquer par le fait qu'avec l'augmentation de la tension de choc le phénomène de décharge s'intensifie créant ainsi une forte densité de courant au niveau de l'électrode sous tension engendrant une thermo-ionisation. Le claquage s'achève par propagation du leader vers l'électrode opposée (Fig I.8)

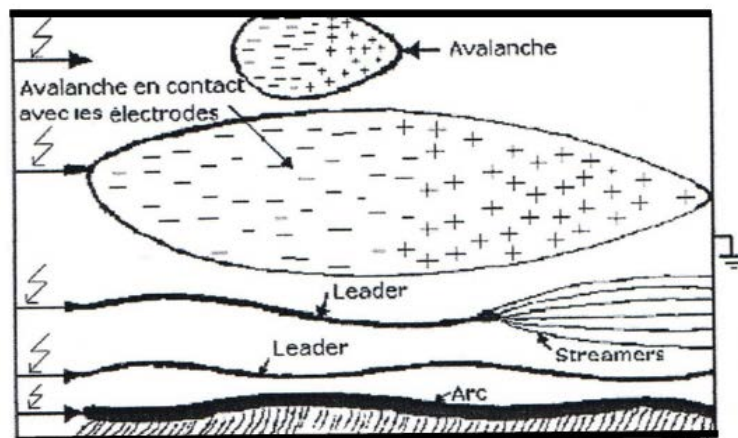


Fig.I.8 Amorçage d'un intervalle d'air par avalanche primaire

I.11.2 Claquage de l'air par streamers

En appliquant une tension impulsionnelle dont le temps de front t_f varie entre 100 à 1000 μs , les avalanches électroniques créées dans l'intervalle d'air inter-électrode atteignent leur taille critique de telle sorte que les streamers prennent naissance dans l'espace d'air et progressent vers les électrodes. Si le champ résultant dépasse celui des streamers ($E_s = 4$ à 5 kV/cm), les streamers se multiplient et peuvent se propager jusqu'au contact du plan mis à la terre, à ce moment-là, du fait de la contribution de l'électrode à la terre. La forte densité de courant engendrée au niveau de l'électrode sous tension provoque la thermo-ionisation. Ce phénomène donne naissance à un leader instable se développant dans l'intervalle d'air considéré.

Dès que le leader relie les deux électrodes, un arc se forme, permettant ainsi la circulation du courant de court-circuit (FigI.9)

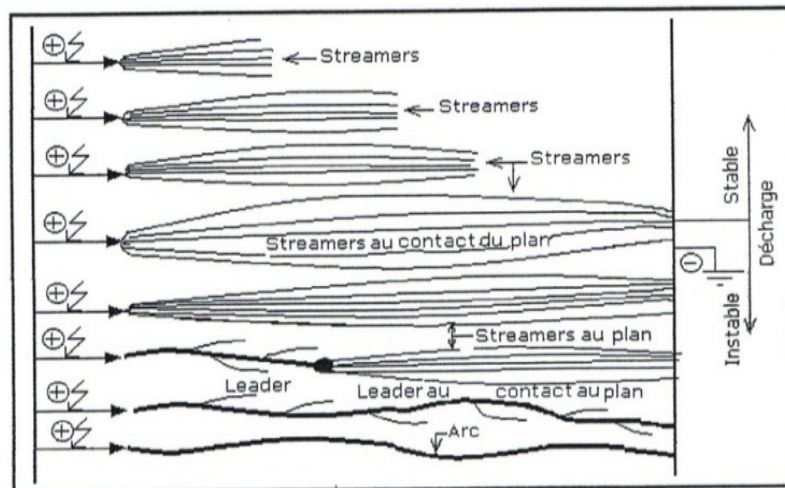


Fig. I. 9 : Disruption d'un intervalle d'air par streamers

I.11.3 Disruption de l'air par leader

Pour le long intervalle d'air, la naissance d'un leader peut avoir lieu sans la contribution de l'électrode opposée. Dans ce cas le leader est stable. Dès que les streamers issus de la tête du leader atteignent l'électrode opposée, le leader devient instable.

À partir de cet instant le processus évolue de façon analogue au cas précédent (Fig I.10)

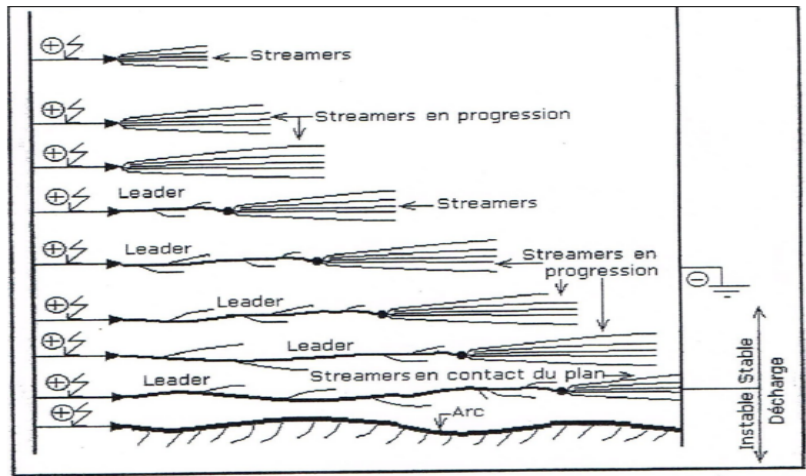


Fig.I.10 : Amorçage d'un espace d'air par leader

Conclusion

Dans ce chapitre nous avons fait une synthèse sur les phénomènes de la physique de la décharge électrique dans le gaz

Chapitre II

Modèle statistique de Weibull

II.1 Introduction

La connaissance des valeurs de rupture diélectrique des isolants est un problème majeur pour déterminer la fiabilité des dispositifs électriques. Malheureusement, plusieurs échantillons identiques placés dans les mêmes conditions expérimentales ne fournissent pas une valeur unique du champ de rupture, mais une distribution de valeurs.

Ce caractère statistique impose de tester un grand nombre d'échantillons identiques et de mener une analyse statistique sur la dispersion des champs de rupture afin d'en déduire éventuellement des lois de vieillissement.

Les principales lois utilisées en fiabilité sont les lois: Exponentielle, de Weibull, de Gumbell, de valeurs extrêmes, Gamma, G-Gamma, Logistique, Log-logistique, Normale et Log-normale [15-18]. On peut se reporter utilement aux ouvrages de Nelson [19] et Lawless [14], qui fournissent toutes les informations pratiques concernant le traitement des données.

Le modèle le plus adapté est celui de Weibull. Ce dernier fait l'objet de ce chapitre, qui sera complété par quelques notions utiles et de base pour le traitement statistique de distribution de données de mesure.

II.2 Modèle statistique de Weibull [17,21-25]

Le modèle statistique de Weibull ou loi de chaîne s'écrit :

$$P(X) = 1 - \exp \left[- \left(\frac{X - \gamma}{\eta} \right)^\beta \right], X > 0 \quad (1)$$

$P(X)$: Probabilité de rupture et X : Variable aléatoire

η : Paramètre d'échelle, il est destiné à définir une valeur centrale caractéristique de la population étudiée. Ce paramètre correspond à une densité de probabilité maximale.

Pour $X = \eta$, $\ln(\ln \frac{1}{1-P}) = 0$ et on déduit : $P = \frac{1}{e} = 63,2\%$.

γ : Paramètre de localisation, indique une survie des échantillons mesuré entre 0 et η ou encore une probabilité de défaillance nulle pour des valeurs de $X < \gamma$. La grandeur γ apparaît comme un seuil en dessous duquel le phénomène régi par la variable X ne se produit plus.

β : Paramètre de forme et donne l'allure des courbes de Weibull; il représente la pente de la droite, c 'est un nombre sans dimension.

Dans le cas $\gamma = 0$, le modèle de Weibull est dit à deux paramètres. Le formalisme de Weibull s'écrit :

$$P(X) = 1 - \exp\left[-\left(\frac{X}{\eta}\right)^\beta\right], \quad X > 0 \quad (2)$$

II.3 Modèle de loi normale

Une variable aléatoire absolument continue (x) suit une loi normale de paramètres (μ, σ) si sa densité de probabilité.

$$f(x) = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} \exp\left[-\frac{1}{2}\left(\frac{x-m}{\sigma}\right)^2\right] \quad (3)$$

(m) est l'espérance et sigma (σ) est l'écart-type.

II.4 La loi log-normale

En théorie des probabilités et statistique, une variable aléatoire (x) est dite suivre une loi log-normale de paramètres (μ) et (σ^2) si la variable $y = \ln(x)$ suit une loi normale d'espérance (μ) et de variance (σ^2) . Cette loi est parfois également appelée loi de Galton.

Une variable peut être modélisée par une loi log-normale si elle est le résultat de la multiplication d'un grand nombre de petits facteurs indépendants.

La loi log-normale de paramètres (μ) et (σ) admet pour densité

$$f(x; \mu, \sigma) = \frac{1}{x\sigma\sqrt{2\pi}} \exp\left(-\frac{(\ln x - \mu)^2}{2\sigma^2}\right) \quad (4)$$

Pour ($x > 0$), (μ) et (σ) sont la moyenne et l'écart type du logarithme de la variable (puisque par définition, le logarithme de la variable est distribué selon une loi normale de moyenne (μ) et d'écart-type (σ)).

II.5 Loi exponentielle

Sa fonction de densité se présente sous cette forme:

$$f(x) = \lambda e^{-\lambda x} \quad \text{Si } x \geq 0 \quad (5)$$

$$f(x) = 0 \quad \text{Si } x < 0 \quad (6)$$

Son espérance et ses paramètres de dispersion s'établissent comme suit :

$$E(x) = \sigma(x) = \frac{1}{\lambda}, \text{ et } V(x) = \frac{1}{\lambda^2}$$

Enfin, la médiane est $(E(x) \ln 2)$

II.6 Méthodes de lissage linéaire

La représentation graphique des points expérimentaux peut être approchée par des polynômes de degré 1, 2 ou 3 [15,23-25]. Dans ce qui suit, nous développons les méthodes de lissage linéaire : méthodes des moindres carrés et celle du maximum de vraisemblance.

II.6.1 Principe de lissage linéaire par la méthode des moindres carrés [9]

Soit une loi définie par la probabilité cumulée de rupture :

$$P(G) = 1 - \exp - \left[\frac{G}{G_0} \right]^\alpha \quad (7)$$

Sa fonction de distribution est :

$$f(G) = \frac{dP(G)}{dG} = \frac{\alpha}{G_0} \left[\frac{G}{G_0} \right]^{\alpha-1} \exp - \left[\frac{G}{G_0} \right]^\alpha \quad (8)$$

Dans le cas, où le champ de seuil G_s est nul. On cherche une estimation de G_0 et α par régression linéaire sur les points de coordonnées :

$$X_i = \log G_i, Y_i = \log \text{Ln} \frac{1}{1-P_i} \quad (9)$$

Les points expérimentaux sont caractérisés par un numéro d'ordre i . il convient de trouver la valeur de G_s qui conduit au tracé linéaire représentant de façon optimale les points expérimentaux (X_i, Y_i) . Pour cela, on commence à donner à G_s une valeur arbitraire

mais inférieur à celle du faible des champs de rupture observés [21]. En répétant le processus pour différentes valeurs données à G_s et en calculant chaque minimum M_c , on trace $M_c(G_s)$. Son minimum s'il existe, donne la valeur du champ seuil G_s à venir, il faut minimiser l'expression :

$$M_c = \sum_{i=1}^N [\text{LogLn} \frac{1}{1-p_i} - a \log G_i - b]^2 \quad (10)$$

Avec :

$\text{logLn} \frac{1}{1-p_i}$ Ordonnées des points expérimentaux

$a \log G_i - b$ Polynôme de premier degré

$$M_c = \sum_{i=1}^N [\text{LogLn} \frac{1}{1-p_i} - a \log G_i - a \log G_0]^2 \quad (11)$$

On différencie par rapport aux coefficients de la droite, soit :

$$\frac{\partial M_c}{\partial a} = 0, \frac{\partial M_c}{\partial b} = 0 \quad \text{et} \quad \frac{\partial M_c}{\partial a} = 0, \frac{\partial M_c}{\partial \log G_0} = 0$$

Dans le cas général ou $G_s \neq 0.$, cette étape consiste à chercher la valeur du champ seuil qui contribue à linéariser les points expérimentaux dans une représentation à 3 paramètres.

On a:

$$P(G) = 1 - \exp - \left[\frac{G-G_s}{G_0-G_s} \right]^\alpha \quad (12)$$

$$\text{LogLn} \frac{1}{1-p} = \alpha \log(G - G_s) - \alpha \log(G_0 - G_s) \quad (13)$$

$$M_c = \sum_{i=1}^N [\text{LogLn} \frac{1}{1-p_i} - \alpha \log(G_i - G_s) - b]^2 \quad (14)$$

Avec:

$\log \text{Ln} \frac{1}{1-P_i}$ Ordonnées des points expérimentaux et $\alpha \log(G_i - G_s) - b$ Polynôme du premier degré.

On a:

$$M_c = \sum_{i=1}^N [\text{LogLn} \frac{1}{1-P_i} - \alpha \log(G_i - G_s) + \alpha \log(G_0 - G_s)]^2 \quad (15)$$

On différencie ensuite par rapport aux coefficients de la droite, soit:

$$\frac{\partial M_c}{\partial a} = 0, \frac{\partial M_c}{\partial b} = 0 \text{ et } \frac{\partial M_c}{\partial \alpha} = 0, \frac{\partial M_c}{\partial \log(G_0 - G_s)} = 0$$

Il est nécessaire de connaître la valeur de G_0 (choisi d'après le lissage polynomial de degré 3 des points expérimentaux dans une représentation à deux paramètres) et de minimiser la valeur de M_c pour chaque valeur donnée à G_s .

II.6.2 Lissage linéaire par la méthode du maximum de vraisemblance

La méthode du maximum de vraisemblance est une technique bien connue pour l'estimation des paramètres d'une distribution de probabilité. L'application de cette méthode pour l'estimation des paramètres de la loi de Weibull a été faite par Cohen [29]. On définit la fonction de vraisemblance L par :

$$L = \prod_{i=1}^N f(X_i) = \prod_{i=1}^N \frac{dP(X_i)}{dX} \quad (16)$$

Elle correspond à la probabilité d'avoir les valeurs de X_i , i de 1 à N , dans le même échantillon par application de la règle du produit des probabilités puisque les X_i sont indépendants.

II.7 Intervalles de confiance

Toute estimation des paramètres d'une population statistique diffère de la vraie valeur des mêmes paramètres de la population totale qui serait obtenue à partir d'une expérience comportant un nombre infiniment grand d'éprouvettes. La plupart des estimations ont recours à des méthodes graphiques ou de calcul et restent toujours approximatives. De plus, il est difficile de mesurer l'erreur imputable à de tels procédés, ce qui rend délicat l'analyse des résultats notamment dans le cas des essais comparatifs.

Le calcul des intervalles de confiance pour une distribution de Weibull est un problème très

complexe qui a fait l'objet de nombreux travaux [29,30]. Des formules de calcul permettent de dériver ces intervalles pour les différents paramètres à partir de données tabulées. Ces tables sont dispersées dans les recueils statistiques. Stone et Van Heeswijk [36] ont calculé les différents paramètres de Weibull. Un logiciel de calcul a été développé par Stone [32].

Soit \hat{E} un estimateur d'un paramètre X dont on connaît la loi de probabilité pour chaque valeur de X . Étant donné une valeur X_0 de X , on peut déterminer un intervalle de probabilité de niveau $(1-p)$ pour \hat{E} , c'est-à-dire deux bornes a et b telles que :

$$P(E_1 < \hat{E} < E_2 / X = X_0) = 1 - p \quad (17)$$

Ces bornes dépendent évidemment de X_0 . On choisira dans la plupart des cas un intervalle de probabilité à risque symétrique.

Soit E la valeur observée de \hat{E} on adopte alors la règle suivantes :

Si E appartient à l'intervalle (E_1, E_2) , on conserve X_0 comme valeur possible de X .

Si E n'appartient pas à l'intervalle (E_1, E_2) , on élimine X_0 .

On répète cette opération pour toutes les valeurs du paramètre. On traduit graphiquement cette méthode dans un plan (X, \hat{E}) où l'on trace $E_1(X)$, $E_2(X)$

On dit que (a, b) est un intervalle de confiance de niveau $(1-p)$, avec p risque d'erreur maximum accepté. C'est un intervalle aléatoire car il dépend de E . on parle d'intervalle de confiance à $100(1-p)\%$, cela signifie que l'intervalle a $100(1-p)\%$ de chance de contenir la valeur réelle du paramètre, ou il existe un risque p pour qu'un point extérieur à cet intervalle appartienne à la distribution. Un intervalle de confiance à 10% signifie que l'on a 10 chances sur 100 de voir un point extérieur à cet intervalle appartenir à la distribution ou fait intervenir un risque de 10%.

Les intervalles de confiance ne sont valables que pour des éprouvettes testées de façon identique [33,34].

II.8 Test d'adéquation

Ce test est couramment utilisé pour vérifier si un échantillon provient ou non d'une variable aléatoire de distribution connue. Les méthodes empiriques telles que l'étude de la forme de l'histogramme étaient peu satisfaisantes pour attester du bon choix d'une distribution. Pour tester l'ajustement d'une distribution observée à une distribution théorique, le test de khi-deux s'avère mieux adapté, mais n'est pas infallible. Il convient donc de mieux mentionner ses limites d'utilisation. Le principe de ce test très classique est exposé dans les ouvrages de statistiques comme celui de Chapoille et de Pazzis [35] et repris dans d'autres travaux sur les isolants solides [36-38].

II.8.1 Test de khi-deux (χ^2) [15, 24, 25]

L'application de ce test est conditionnée par le nombre d'observation qui doit être supérieur ou égale à 50.

Pour ce test on utilise généralement des classes et dans chaque classe on doit obtenir un nombre d'observations supérieur ou égale à 5, l'intervalle de classe n'est pas forcément régulier.

Il est basé sur l'écart entre les valeurs observées et le modèle théorique.

Soit la fonction E suivante :

$$E = \sum_{i=1}^r \frac{(n_i - np_i)^2}{np_i} \quad (18)$$

p_i : Probabilité de se trouver dans la classe i

n_i : Nombre d'individus (d'observations) de la i^{ieme} classe

n : Nombre d'individus total de l'échantillon.

np_i : Nombre d'individus attend théoriquement dans la classe i

E Suit approximativement une loi χ^2 de ν degrés de liberté avec $\nu = r - k - 1$ ou k : nombre de paramètres estimé pour le modèle théorique.

Donc on peut écrire que:

$$P(E > \chi_{\nu, 1-\alpha}^2) = 1 - \alpha \quad (19)$$

Si $E > \chi_{\nu, 1-\alpha}^2$ on rejette l'hypothèse du modèle théorique choisi.

II.8.2 Test de Kolmogorov-Smirnov [23,25]

Aucune restriction n'est nécessaire pour l'application de ce test, cependant s'il est préférable de regrouper les valeurs en classe et utiliser le test de

Son principe consiste à comparer la fonction de répartition réelle de répartition des défaillances à la fonction de répartition théorique. C'est-à-dire on mesure l'écart point par point entre les deux fonctions ;

$$Dn_i = |f(t) - F(t)| \quad (20)$$

Où $f(t)$: fonction réelle, elle est obtenue par la méthode des rangs moyen $f(t) = \frac{i}{N+1}$

Ou par la méthode des rangs médians

$$f(t) = \frac{i - 0,3}{N + 0,4} \quad (21)$$

Et $F(t)$: fonction théorique

$$\text{Soit } Dn = \text{MAX}|f(t) - F(t)| \quad (22)$$

$$\text{et } P[\text{MAX}|f(t) - F(t)| < D_{n, \alpha}] = 1 - \alpha \quad (23)$$

La valeur de $D_{n, \alpha}$ est donnée par la table de Kolmogorov-Smirnov.

Si $D_n > D_{n, \alpha}$ on refuse l'hypothèse du modèle théorique

II.9 Conclusion

Dans ce chapitre nous avons fait une synthèse à quelques lois de statistiques utilisées pour l'étude de la rupture diélectrique, à savoir les lois: Exponentielle, de Weibull, Normale et Log-normale. Deux tests d'adéquation; khi-deux et Kolmogorov-Smirnov sont présentés afin de les utiliser pour tester l'ajustement et l'adaptation des différents modèles de lois entrepris. Enfin, ce travail est complété par une étude sur les méthodes d'estimation des différents paramètres, ainsi que la fameuse méthode d'intervalles de confiance utilisée pour encadrer la valeur de rigidité recherchée.

Chapitre III

Partie expérimentale

III.1 Introduction

Ce chapitre sera consacré aux travaux expérimentaux effectués au laboratoire de haute tension de l'université de Bejaïa.

Les essais ont été réalisés dans le but d'étudier expérimentalement les paramètres influents sur la rigidité diélectrique de l'air atmosphérique sous tension alternative sinusoïdale 50Hz, plusieurs paramètres d'influence seront traités à savoir ; l'influence de la montée en tension, la forme de tension appliquée, la géométrie des électrodes, leurs nature et la distance interélectrode.

La loi statistique de Weibull sera utilisée pour le traitement des résultats de mesures obtenues. Pour le lissage des points, la méthode de maximum de vraisemblance sera utilisée en plus des intervalles de confiance à 90% pour l'encadrement des valeurs des tensions de claquage recherchées; ces dernières seront confrontées à deux tests d'adéquation, khi-deux et celui de Kolmogorov-Smirnov.

En premier lieu, nous présentons les deux dispositifs utilisés pour les différents essais effectués et en deuxième lieu, nous abordons la manière et le traçage des diagrammes de weibull.

Enfin, nous exposons les différents résultats obtenus suivis des discussions qui ensuite, serviront d'interprétations.

III.2 Dispositifs expérimentaux

Pour la mesure de la tension de claquage, nous avons utilisé deux dispositifs schématisés dans les figures (Fig. 1 et Fig. 2), un pour les mesures sous tension alternative et l'autre pour les mesures sous tension continue.

Le schéma de la figure Fig. 1, comprenant les éléments suivants :

- Une source de tension avec plusieurs vitesses de montée de la rampe.
- Un transformateur HT(T^{100})0.8/135 kV. Pouvant délivrer une tension allant de 0 à 100 kV pour des essais en tension alternative et de 0 à 135 kV en tension continue.
- Un diviseur de tension capacitif ($C_0 = 0,1 \mu F$ et $C_u = 41,4 \mu F$) pour les mesures en tension alternative. Par contre ceux de tension continue, nous utiliserons un diviseur de tension résistif.
- Un voltmètre de crête (v) AC/DC de type MU11, à affichage digital permettant la mesure,

selon le montage électrique, des hautes tensions alternatives, ou continues.

- Une résistance de protection $R = 106\text{ k}\Omega$ limitant le courant.
- Un bâti servant pour l'ensemble éprouvette et électrodes.
- Deux électrodes identiques, planes de géométrie cylindrique en cuivre et de 2 cm de diamètre; une connecté à la borne haute tension, l'autre à la terre.

Enfin, l'ensemble dispositif-échantillons sont entourés par une cage de protection.

Pour la mesure de la tension de claquage sous tension continue, nous avons utilisé le dispositif représenté par la Figure (Fig. 2), comprenant les mêmes éléments que le dispositif précédent, sauf à la place du diviseur capacitif, on utilise un diviseur résistif associé à une diode de haute tension et un condensateur de lissage (voir la figure Fig. 2). Le sens du montage de la diode, déterminera le type de la polarité de la tension.

- Avec:
- R_u : résistance basse tension;
 - R_0 : résistance haute tension ($R_0 = 250\text{ M}\Omega$);
 - C : condensateur de lissage ($C = 10\text{ nF}$);
 - D_{HT} : diode de haute tension ($G270$).

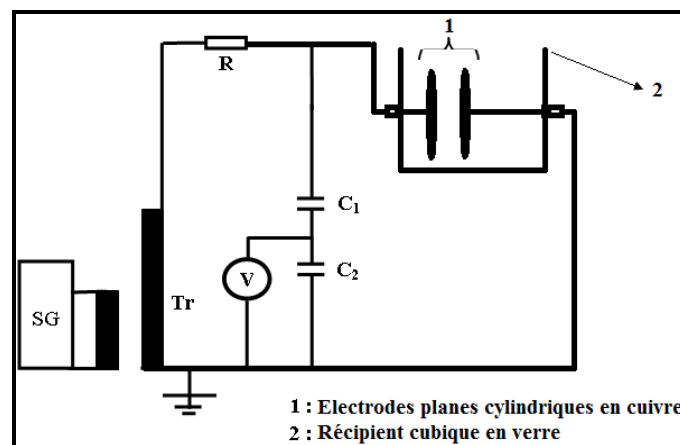


Fig. III.1 Schéma de dispositif des essais de claquage sous tension alternative sinusoïdale.

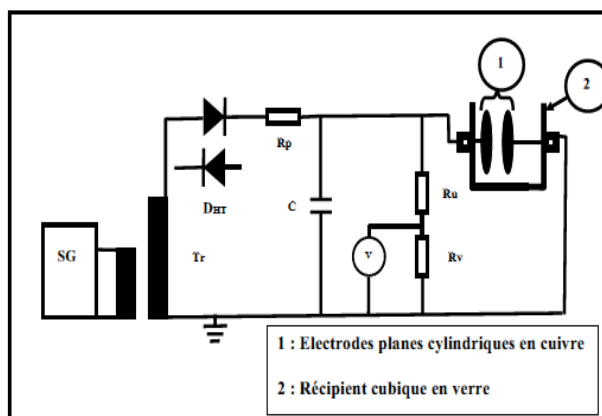


Fig.III. 2 : Schéma du dispositif des essais électriques sous tension continue.

III.3 Déroulement des essais

Plusieurs configurations d'électrodes et plusieurs distances inter-électrodes sont prises en considération lors des essais de claquage dans l'air atmosphérique. Parfois pour élucider l'influence de la forme de tension ou l'influence de sa vitesse ou encore la nature de des électrodes, le procédé expérimental doit être adapté à cette nouvelle configuration.

Les essais consistent à appliquer une tension (selon le paramètre d'influence choisi et étudié) jusqu'au claquage. Avec l'accroissement de la tension, nous observons au départ, des décharges superficielles qui éclairent le milieu, puis des crépitements et enfin un bruit sourd qui caractérise le claquage de l'air. La valeur de la tension de claquage est directement affichée sur le voltmètre de crête MU11.

Nous tenons à signaler que les essais ont lieu à l'air libre et la température ambiante du laboratoire, cependant, on a essayé de reproduire les mêmes conditions pour tous les essais (conditions normales de température, d'humidité et de pression).

La cellule de mesure, la forme et géométrie des électrodes sont schématisées dans les figures (fig.III. 3 et fig.III. 4).

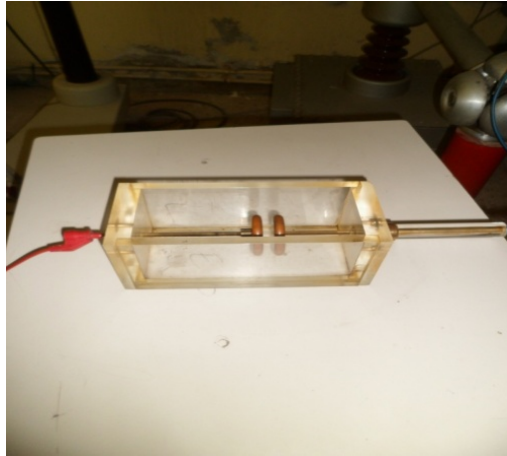


Fig.III. 3 Cellule utilisée pour les mesures.

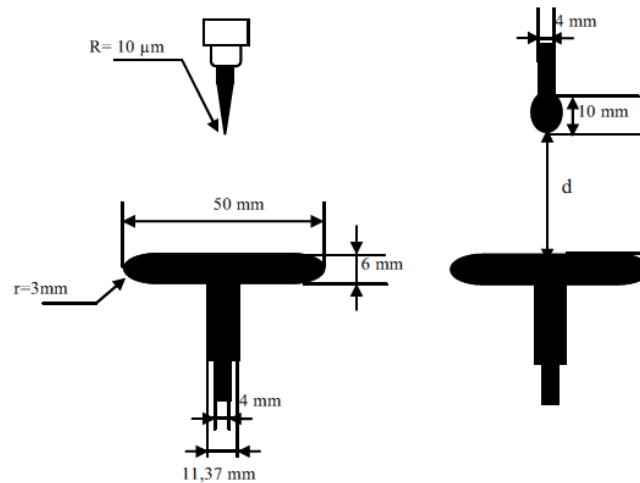


Fig.III.4 Type, géométries et dimensions des différentes électrodes utilisées

III.4 Traitement statistiques

Après avoir classé les tensions de claquage par ordre croissant, on a choisi la méthode des rangs médians, pour le traçage des différents diagrammes.

On a choisi la méthode du maximum de vraisemblance pour le lissage des points expérimentaux donc pour le calcul des différents paramètres des lois étudiées.

Nous avons considéré des intervalles de confiance à 90% où l'on prend un risque de 10% pour voir un point extérieur aux intervalles appartenir à la distribution.

III.5 Résultats et discussions

III.5.1 Influence de la forme de tension

Pour des électrodes en cuivre de configuration disque-disque, les essais ont lieu sous 3 formes de tension à savoir ; tension alternative sinusoïdale 50 Hz, tension continue de polarité positive et tension continue de polarité négative et pour cinq distances inter-électrodes différentes.

. III.5.1.1 Diagrammes de Weibull

Dans les figures fig.III.5, fig.III.6, fig.III.7 sont représentés les tracés de weibull à deux paramètres pour les différentes distances inter-électrodes et pour les trois types de tension considérée.

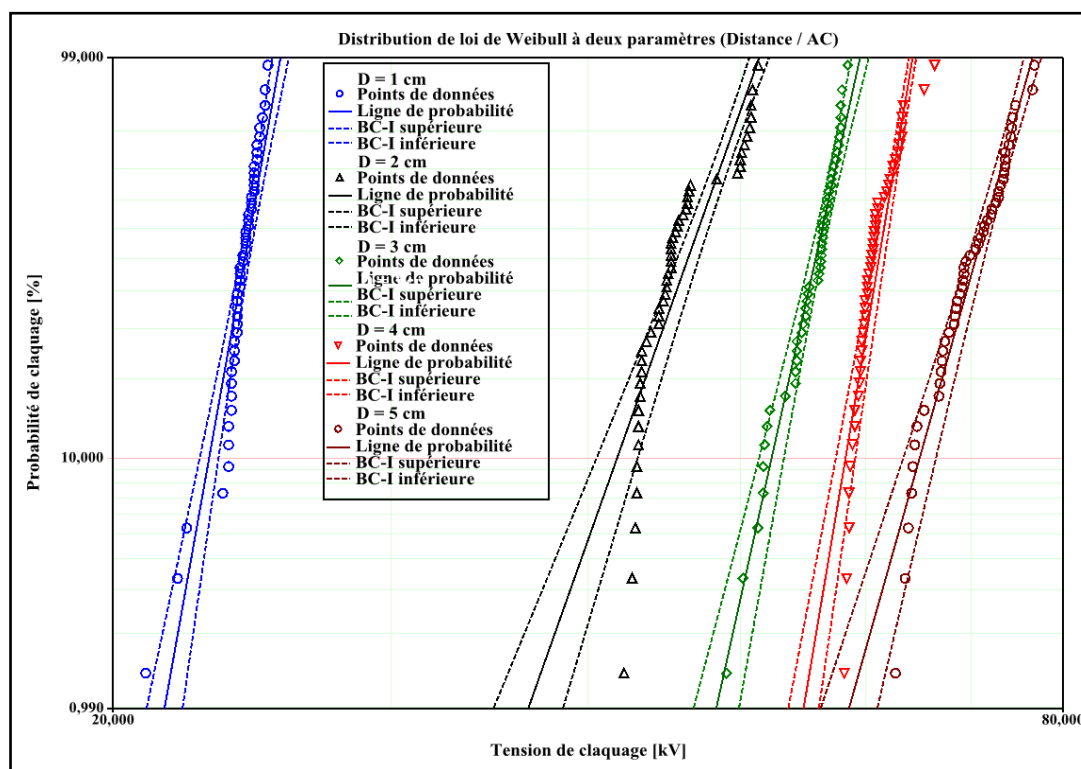


Fig.III. 5 : Diagramme de Weibull à deux paramètres pour différentes distances sous tension alternative

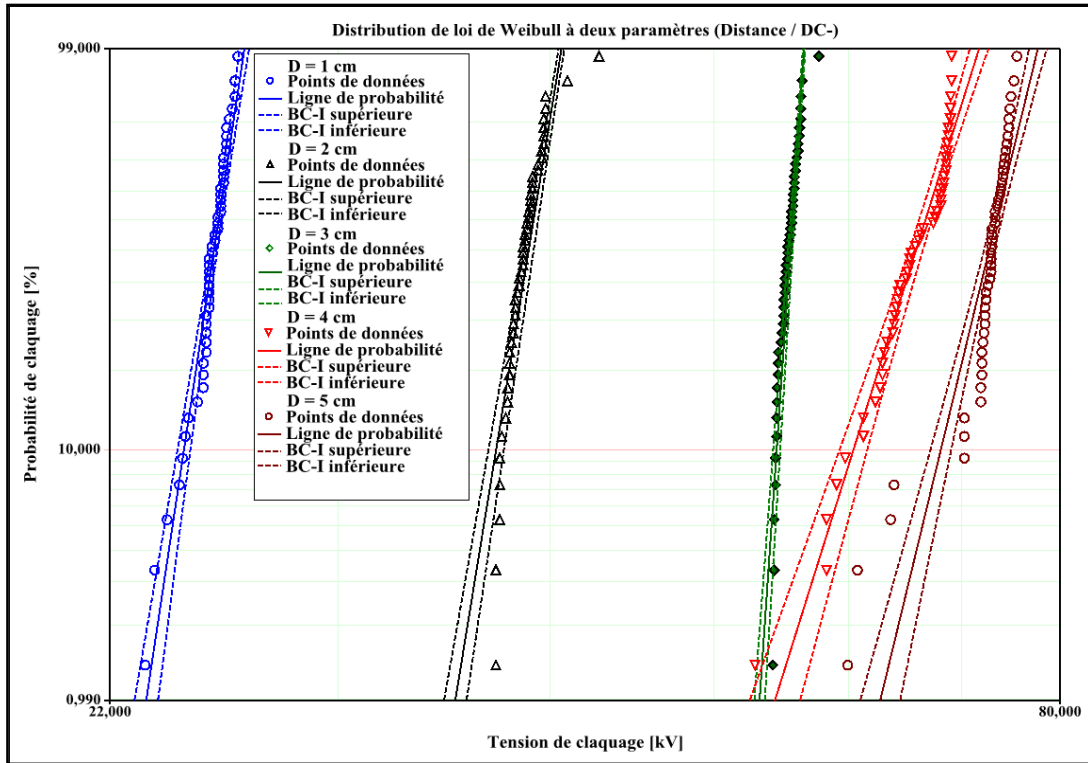


Fig.III. 6 : Diagramme de Weibull à deux paramètres pour différentes distances sous tension continue de polarité négative

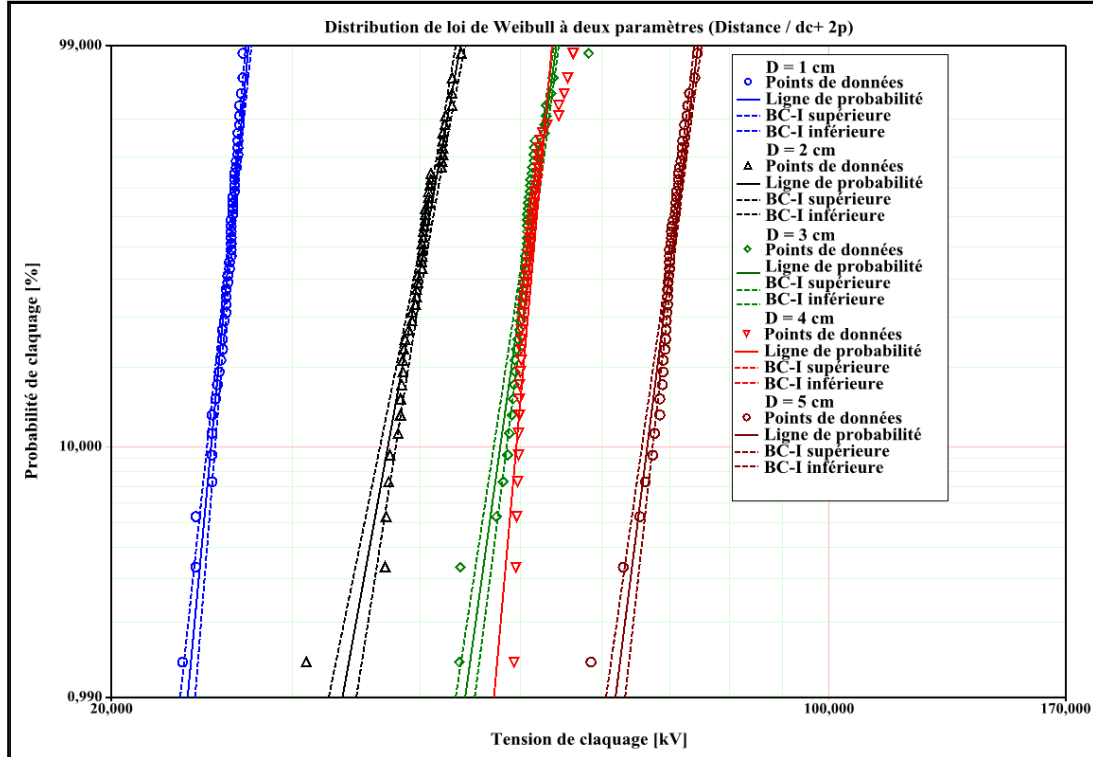


Fig.III. 7 : Diagramme de Weibull à deux paramètres pour différentes distances sous tension continue de polarité positive

Les différents résultats des paramètres Weibull à deux paramètres ainsi que les résultats des deux tests d'adéquation ; que se soit le test de khi-deux ou celui de Kolmogorov – Smirnov, sont représentés dans les tableaux Tab.1, Tab.2 et Tab.3.

Influence de la forme de tension; Tension AC 50Hz					
d	1cm	2cm	3cm	4cm	5cm
(β)	36,266	18,205	29,242	38,577	22,908
(η)	24,489	47,230	56,473	61,748	71,595
Test K-S	90,06%	98,65%	46,75%	97,48%	23,71%
Test de khi-2 $P(E < X^2_{v,1-\alpha})$	4,75%	0,07%	0,02%	0,11%	0,00%

Tab.1 Résultats des paramètres de Weibull et des deux tests d'adéquation
Pour différentes distances sous tension alternative

Influence de la forme de tension; Tension DC-					
d	1cm	2cm	3cm	4cm	5cm
(β)	45,983	42,524	101,575	22,124	28,650
(η)	25,552	39,206	55,658	66,894	73,603
Test K-S	69,55%	85,26%	43,14%	60,34%	99,66%
Test de khi-2 $P(E < X^2_{v,1-\alpha})$	0,57%	0,22%	0,00%	0,02%	9,17%

Tab.2 Résultats des paramètres de Weibull et des deux tests d'adéquation pour différentes distances sous tension continue de polarité négative

Influence de la forme de tension; Tension DC+					
d	1cm	2cm	3cm	4cm	5cm
(β)	44,9	1237,028	32,600	1570,544	26,599
(η)	26,299	40,966	51,561	52,012	71,174
Test K-S	32,00%	62,90%	97,19%	54,41%	97,81%
Test de khi-2 $P(E < X^2_{v,1-\alpha})$	0,07%	0,07%	1,69%	0,95%	11,80%

Tab.3 Résultats des paramètres de Weibull et des deux tests d'adéquation pour différentes distances sous tension continue de polarité positive

D'après ce qu'on voit dans les différents diagrammes représentés auparavant, un ou plusieurs points à faible probabilité sortent de l'intervalle de confiance, la recherche d'un seuil de claquage est justifiée statistiquement. D'où la nécessité de tracer de Weibull à trois paramètres pour ces cas concernés.

Dans les figures fig.III.8 et fig.III.9, fig.III.10 sont représentés les diagrammes de Weibull à trois paramètres pour les cas de distances concernées

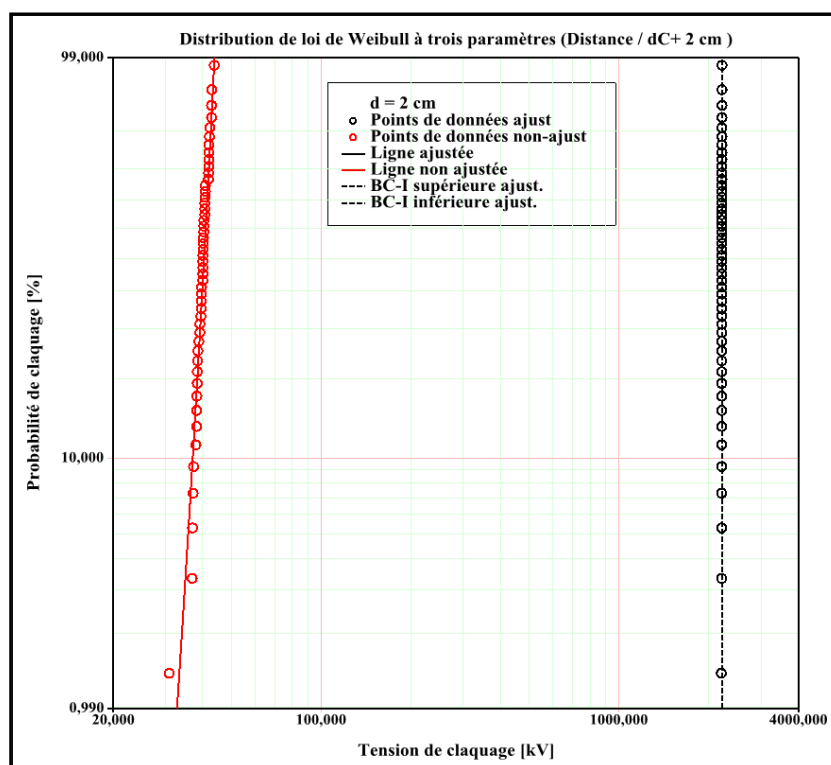


Fig.III. 8 : Diagramme de Weibull à trois paramètres pour une distance de 2 cm sous tension continue polarité

positive

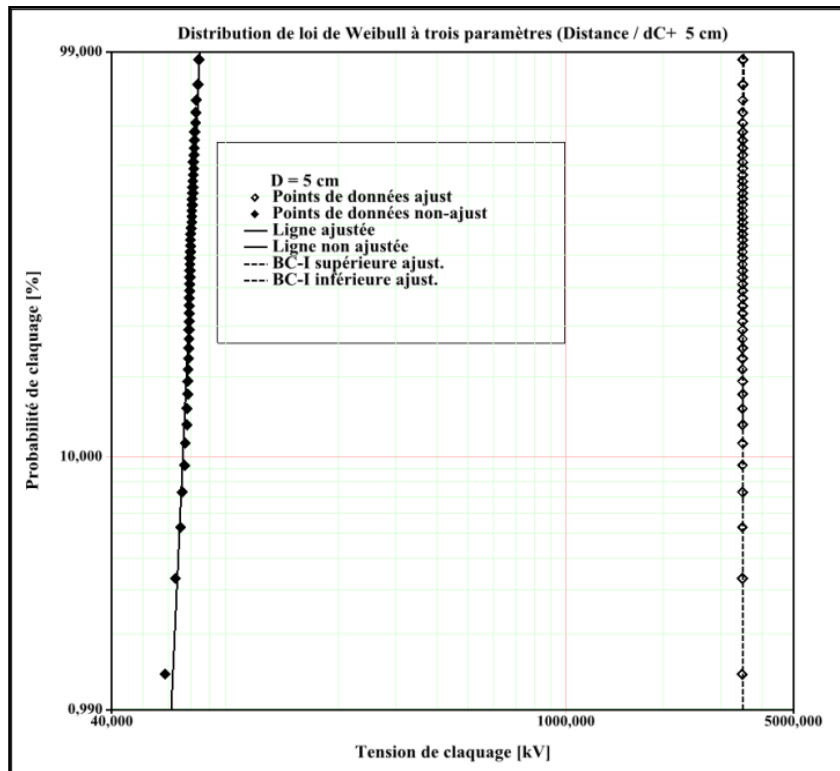


Fig.III. 9 : Diagramme de Weibull à trois paramètres pour une distance 5 cm sous tension continu polarité positive

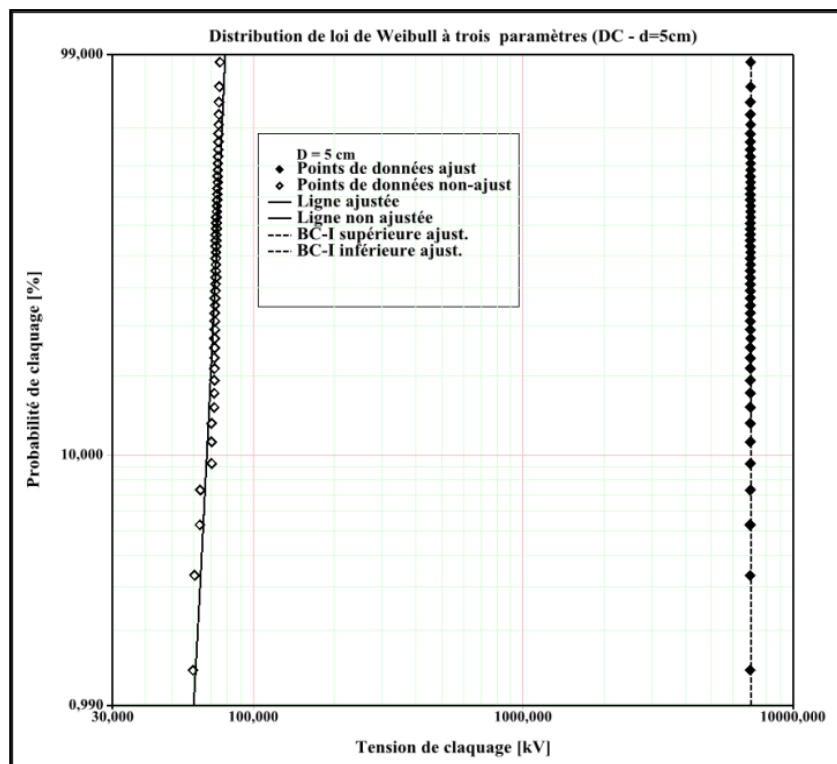


Fig. III.10: Diagramme de Weibull à trois paramètres pour une distance 5 cm sous tension continu polarité positive

négative

Les différents résultats des paramètres Weibull à trois paramètres ainsi que les résultats des deux tests d'adéquation ; que se soit le test de khi-deux ou celui de Kolmogorov – Smirnov, sont représentés dans les tableaux Tab.4 et Tab.5

Tension continu polarité positive à trois paramètres					
d	(β)	(η)	(γ)	Test K-S	X^2 Test de khi-2 $P(E < X^2_{v,1-\alpha})$
2 cm	1237,028	2225,136	-2184,082	62,90%	0,07%
5 cm	1570,544	3509,830	-3438,546	54,41%	0,95%

Tab.4 Résultats des paramètres de Weibull et des deux tests d'adéquation pour différentes distances sous tension continue de polarité positive

Tension continu polarité négative à trois paramètres					
d	(β)	(η)	(γ)	Test K-S	X^2 Test de khi-2 $P(E < X^2_{v,1-\alpha})$
5 cm	2315,725	6995,45	-6921,5	99,62%	11,99%

Tab.5 Résultats des paramètres de Weibull et des deux tests d'adéquation pour différentes distances sous tension continue de polarité négative

D'après ces tableaux où les résultats de calcul des tensions de seuil de claquage pour les distances inter-électrodes concernées, sont de signe moins. Chose inacceptable, donc on se contentera des résultats issus des représentations de Weibull à deux paramètres. Ces dernières serviront pour le tracé des tensions de claquage en fonction des distances inter-électrodes, voir la figure fig. III.1

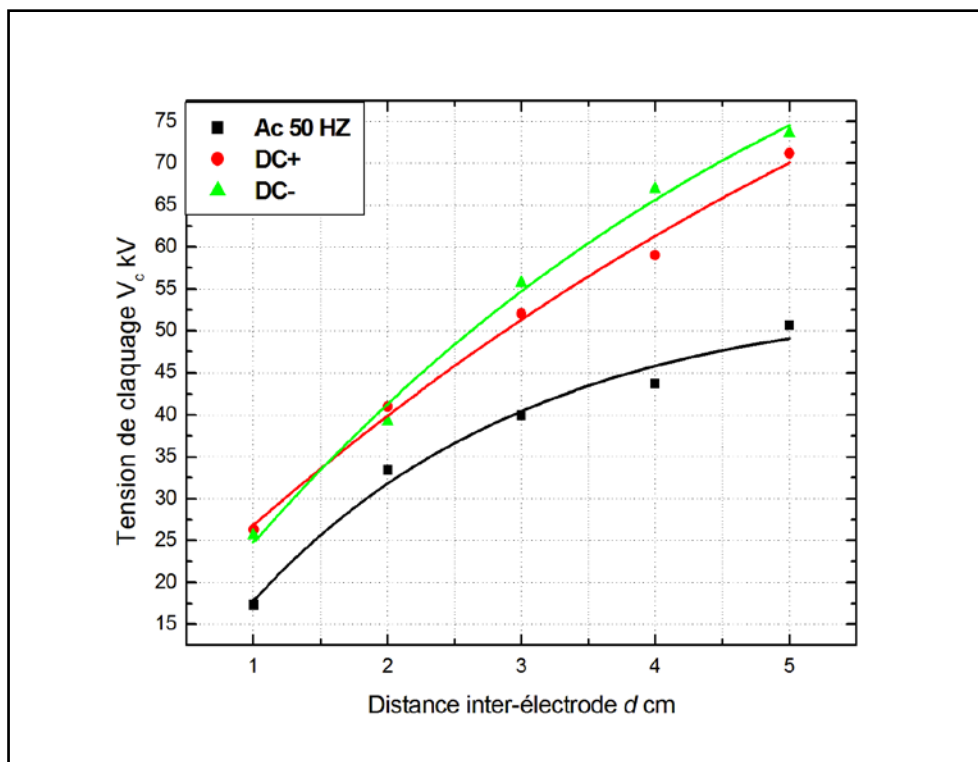


Fig.III.11 Tracé de Tension de claquage en fonction des distances inter-électrodes pour les trois formes de tension

La nature de la polarité joue un rôle important sur la tension de claquage. Sur la figure (III.11), nous voyons l'influence de la polarité en tension continue positive et négative, et en tension alternative sur la tension disruptive. D'après cette courbe, on constate l'effet de la forme de tension commence à partir de 1.5 cm de distance inter-électrodes. La valeur des tensions de claquage est moins importante en alternative que en continue, dont cette dernière on remarque une légères sévérité dans la tension continue en négative que celle en positive. Ceci est dû, qu'en polarité négative, les électrons peuvent être extraits par effet de champ de la cathode ou du détachement à partir d'ions négatifs. En polarité positive, les ions positifs proviennent uniquement de l'ionisation du gaz. Ainsi que on voit clairement la forme exponentiel dans les deux type de tension que se soit en continue ou en alternative.

III.5.2 Influence de la vitesse de tension

Dans cette partie on a étudié comment la vitesse de la rampe influe sur la rigidité diélectrique, tel que pour deux distance différentes de 1cm et 5 cm on a varié la vitesse de la rampe et pour chaque vitesse on a fait 50 essais afin d'obtenir la tension de claquage diélectrique.

III.5.2.1 Diagrammes de Weibull

Dans les figures fig.III.12 à fig.III.13 sont représentés les diagrammes de Weibull à deux paramètres pour les vitesses de montée de la rampe.

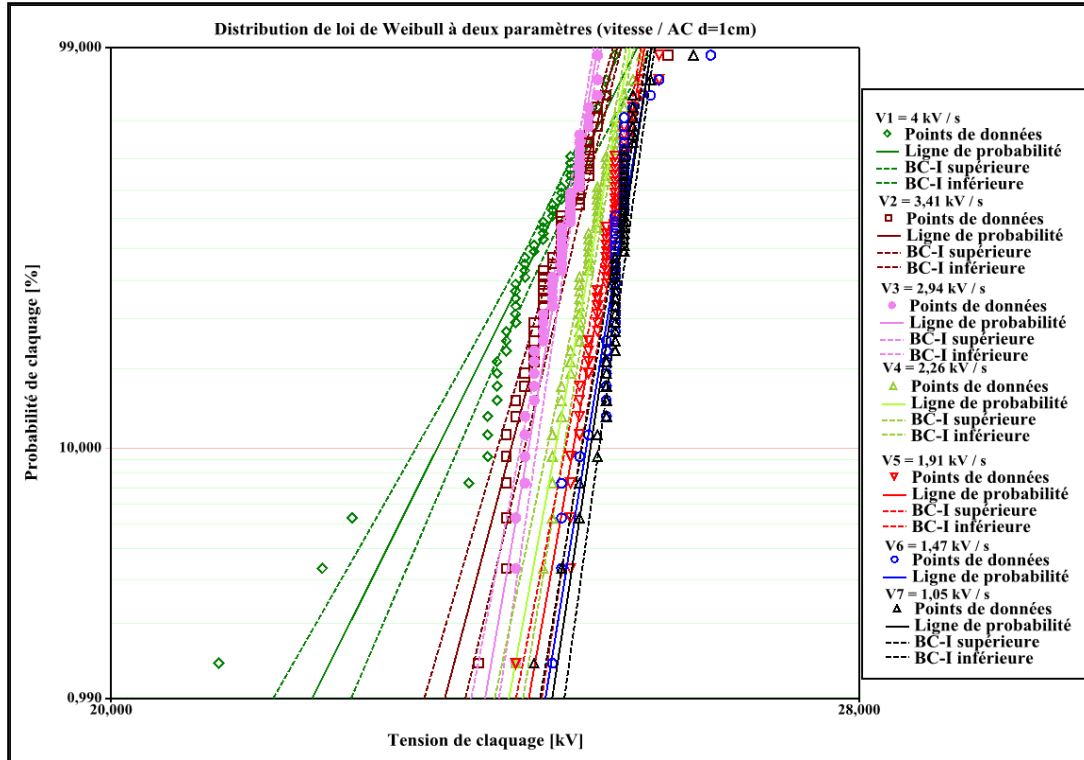


Fig.III. 12 Diagramme de Weibull à deux paramètres pour une vitesse de montée de la rampe sous tension alternative pour une distance 1 cm

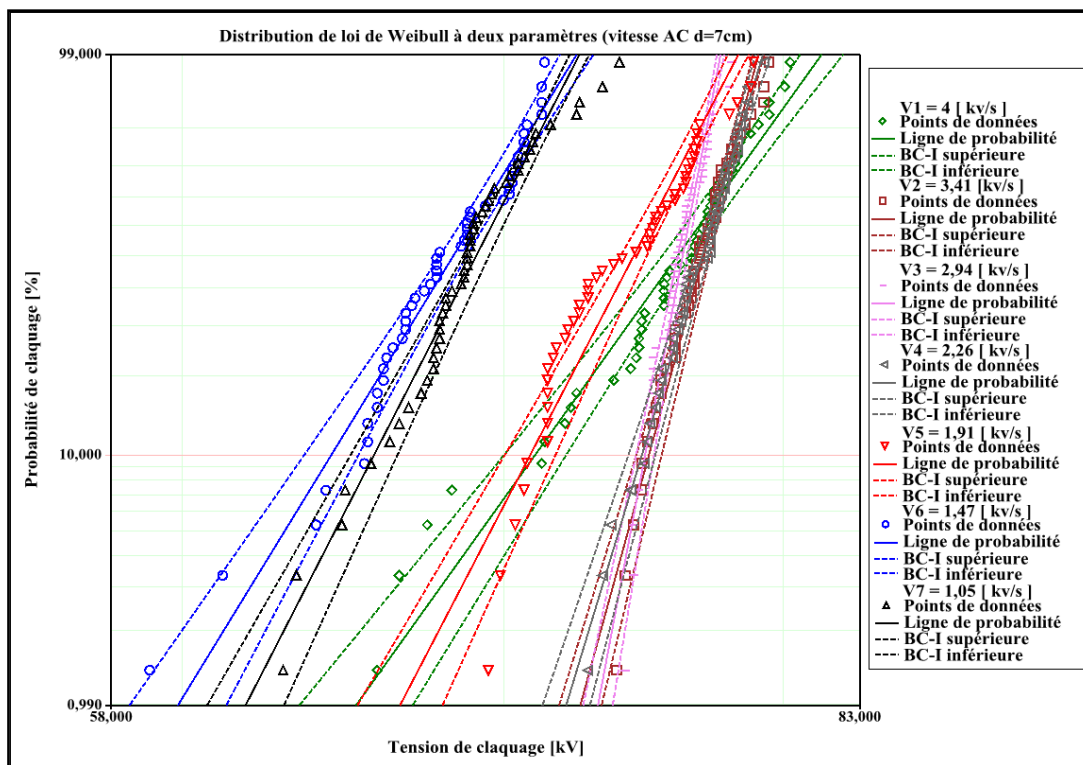


Fig.III. 13 Diagramme de Weibull à deux paramètres pour une vitesse de montée de la rampe sous tension alternative pour une distance 7 cm

Les différents résultats des paramètres de Weibull à deux paramètres ainsi que les résultats des deux tests d'adéquation ; que se soit le test de khi-deux ou celui de Kolmogorov – Smirnov, sont représentés dans les tableaux Tab.6, Tab .7

Vitesse d=1 cm tension alternative							
v kv/s	4	3,41	2,94	2,26	1,91	1,47	1,05
(β)	41,962	79,13	121,170	112,659	117,9460	128,54	137,323
(η)	24,437	24,635	24,584	24,920	25,097	25,204	25,
Test K-S	79,87%	76,41%	55,98%	44,98%	90,76%	99,95%	99,57%
Test de khi-2 P(E<X ² _{v,1-α})	1,69%	0,00%	0,00%	0,02%	0,05%	1,35%	2,09%

Tab.6 Résultats des paramètres de Weibull en fonction de la vitesse de montée de la rampe de tension et des deux tests d'adéquation pour sous tension alternative

Tab.7 Résultats des paramètres de Weibull en fonction de la vitesse de montée de la rampe de tension et des deux tests d'adéquation pour sous tension alternative

D'après ces tableaux où les résultats de calcul des tensions de seuil de claquage pour la vitesse de montée de la rampe de tension concernées, sont de signe moins. Chose inacceptable, donc on se contentera des représentations de Weibull à trois paramètres.

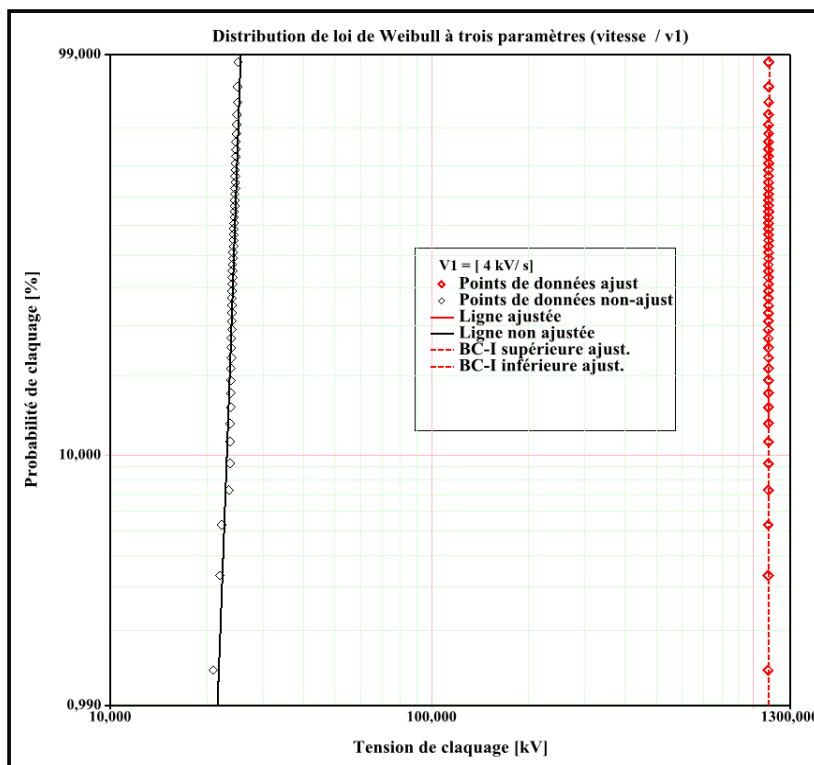


Fig.III. 14 Diagramme de Weibull à trois paramètres pour une vitesse de montée $v = 4 \text{ kV/s}$ de la rampe

Vitesse pour $d = 1\text{cm}$					
$V = \text{kV/s}$	(β) (betta)	(η)	(γ)	Test K-S	X^2 Test de khi-2 $P(E < X^2_{v,1-\alpha})$
4	1761,152	1120,738	-1096,257	86,50%	1,70%

Tab.8 Résultats des paramètres de Weibull en fonction de la vitesse de montée de la rampe de tension et des deux tests d'adéquation pour sous tension alternative

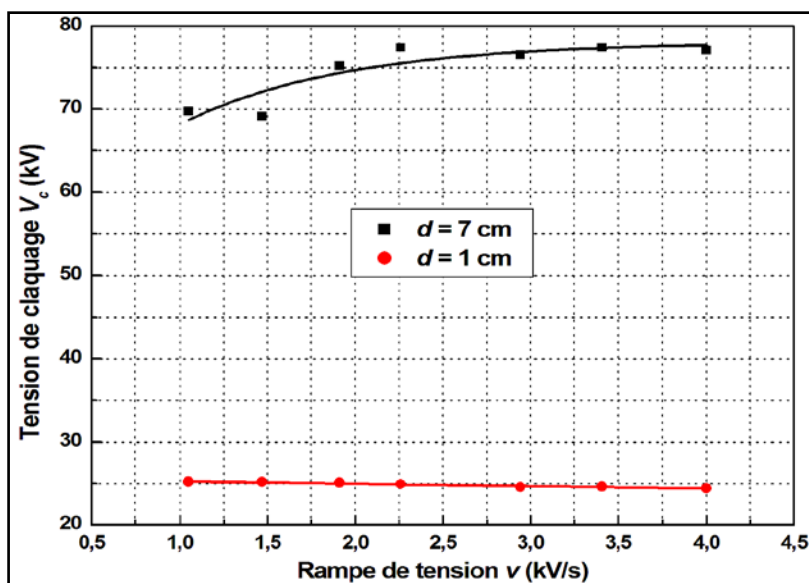


Fig.15 Tracé de Tension de claquage en fonction de la vitesse de montée de la rampe de tension

La tension de claquage en fonction de la rampe dans la figure (III.15) montre que pour une distance $d=1$ cm la tension est légèrement fixe quelque soit le vitesse appliquée qui nous fait apparaître une droite horizontale à l'axe de la rampe, cependant pour une distance $d=7$ cm une augmentation de la tension est remarquable au dessous de 3 (kV/s) ,au de la de cette valeur on atteint des valeurs fixes de tension dû à la saturation du milieu (l'air).

III.5.4 Influence de la distance interélectrode

Nous avons étudié dans la configuration disque-disque en cuivre pour différentes distances interélectrode de 1 cm à 5cm avec un pas de 1, et on a appliqué pour chaque distance une tension alternative sinusoïdale de fréquence 50Hz, une tension continue de polarité positive et une tension continue de polarité négative ; à fin d'obtenir une tension de claquage.

III.5.4.1 Diagrammes de Weibull

Dans les figures fig.III.16 sont représentés les diagrammes de Weibull à deux paramètres pour différents distances inter-électrodes

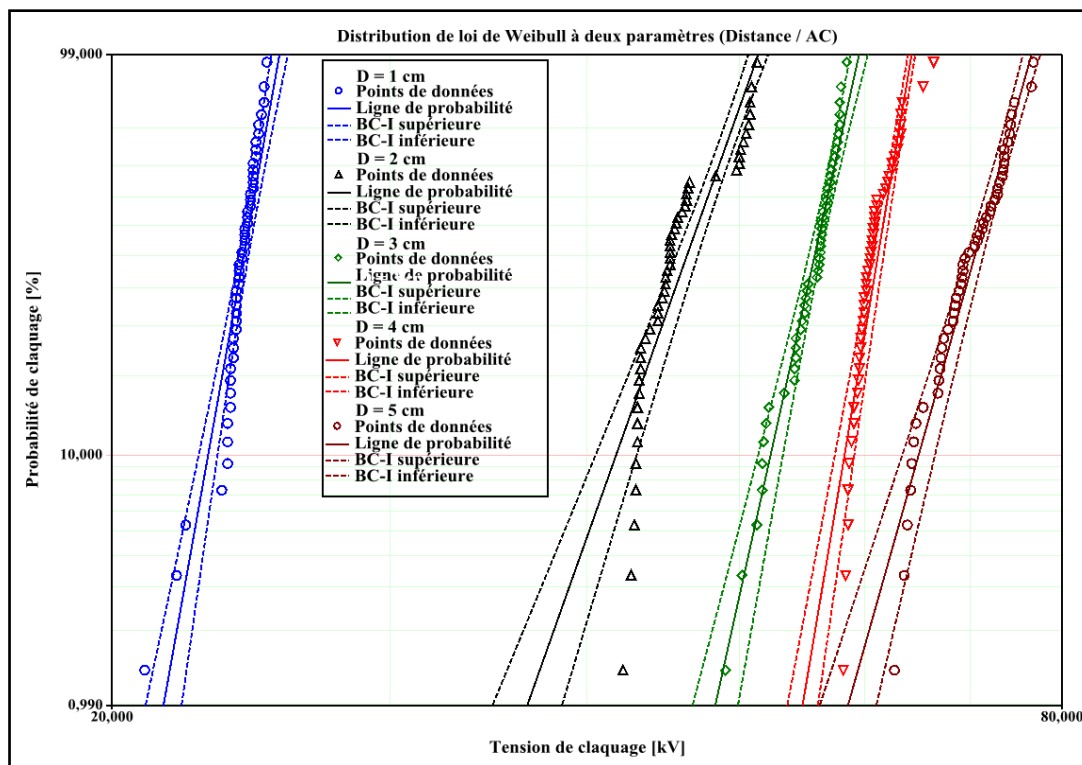


Fig.III 16 Diagramme de Weibull à deux paramètres pour différentes distances sous tension alternative

Les différents résultats des paramètres de Weibull à deux paramètres ainsi que les résultats des deux tests d'adéquation ; que se soit le test de khi-deux ou celui de Kolmogorov – Smirnov, sont représentés dans le tableau Tab.9,

Influence de la forme de tension; Tension AC 50Hz					
d	1cm	2cm	3cm	4cm	5cm
(β)	36,266	18,205	29,242	38,577	22,908
(η)	24,489	47,230	56,473	61,748	71,595
Test K-S	90,06%	98,65%	46,75%	97,48%	23,71%
Test de khi-2 $P(E < X^2_{v,1-\alpha})$	4,75%	0,07%	0,02%	0,11%	0,00%

Tab.9 Résultats des paramètres de Weibull et des deux tests d'adéquation pour différentes distances sous tension alternative

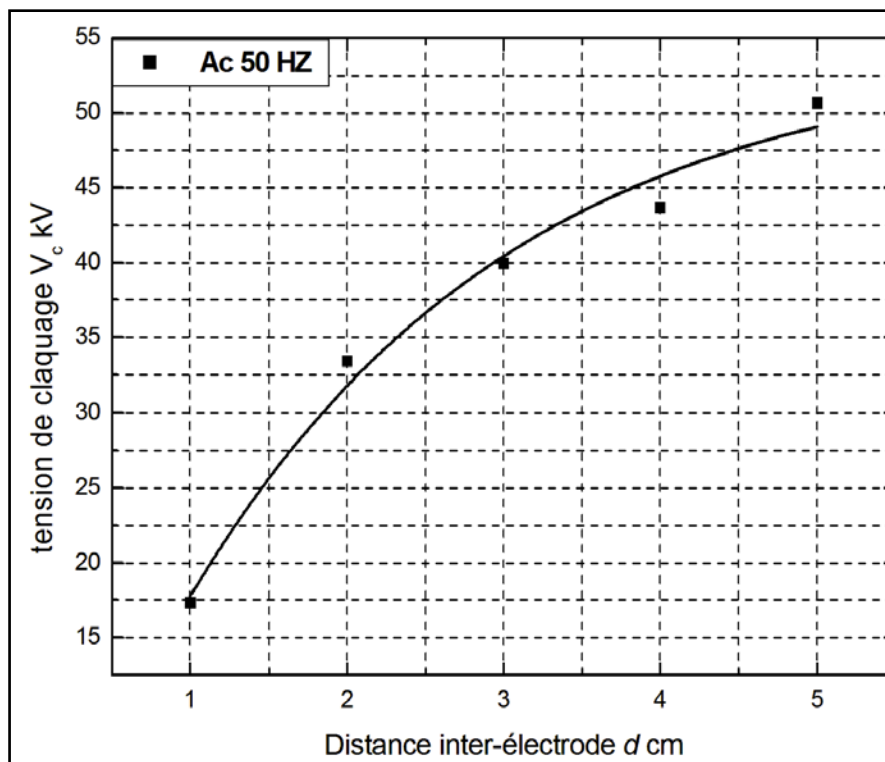


Fig.III.17 influence la distance interélectrode

En ce qui concerne l'influence de la distance inter-électrodes, celle-ci apparaît clairement sur la figure (III.17). On voit clairement l'augmentation de la tension de claquage en fonction de la distance inter-électrodes de l'air d'où on déduit la proportionnalité de la tension par rapport à la distance « d ».

III.5.Influence de la géométrie d l'électrode

L'échantillon utilisé pour nos expériences est le cuivre. Et dans nos études on a basé sur trois formes géométriques (pointe-disque et sphère), où on a fait toutes les configurations possible telle que (pointe-pointe, pointe-disque, pointe-sphère, sphère -disque, sphère-pointe, disque-pointe et disque-sphère).

III.5.1 Diagrammes de Weibull

Dans les figures (fig.III.16) à (fig.III.19) sont représentés les diagrammes de Weibull à deux paramètres pour différents configuration des électrodes (sphère-sphère ; pointe-pointe ; disque-disque)

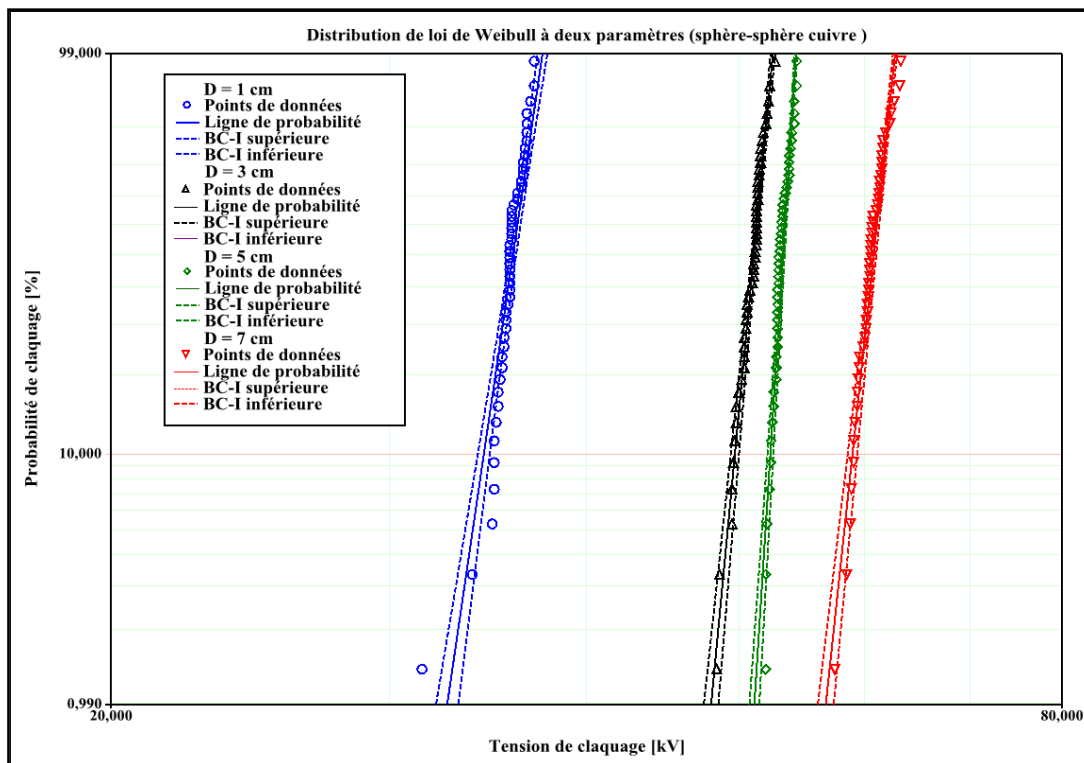


Fig.III. 18 Diagramme de Weibull à deux paramètres pour une configuration d l'électrode sphère-sphère

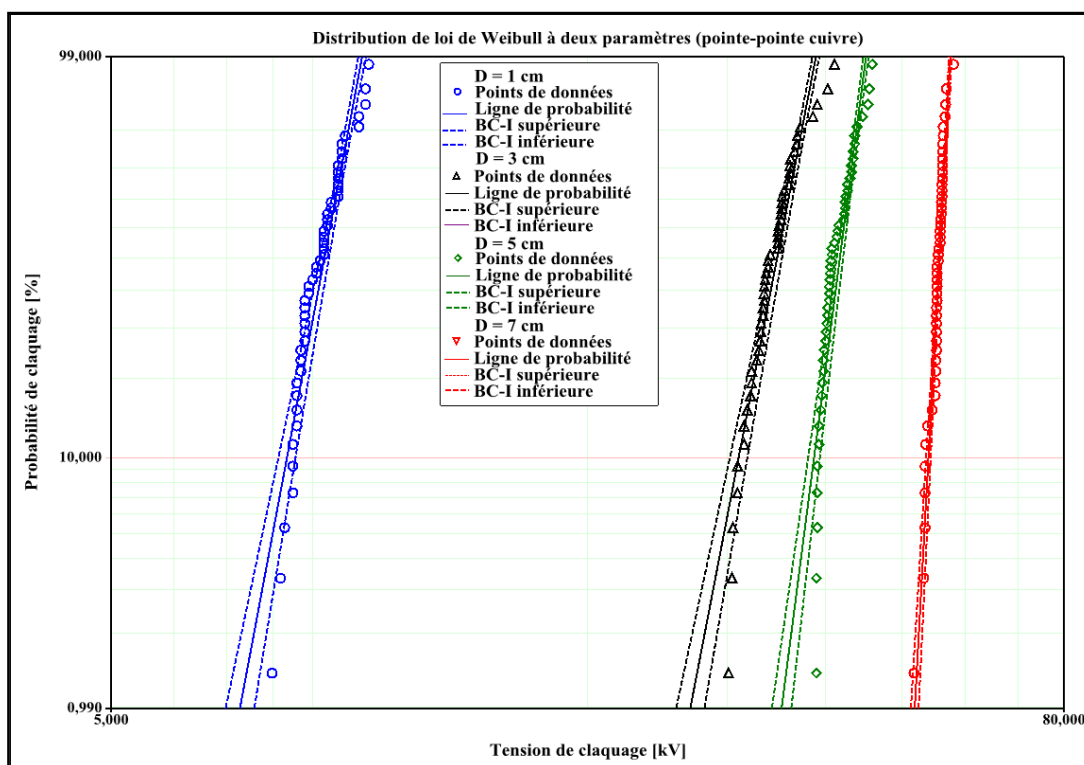


Fig. III.19 Diagramme de Weibull à deux paramètres pour une configuration d l'électrode pointe-pointe

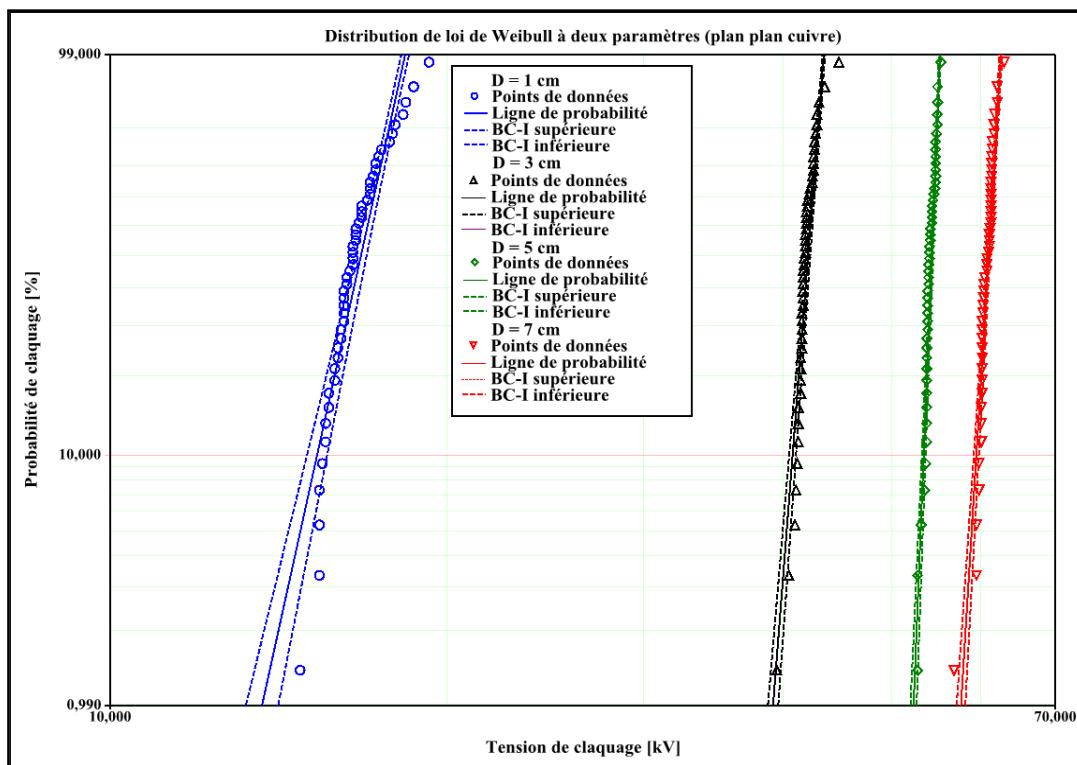


Fig. III.20 Diagramme de Weibull à deux paramètres pour une configuration d l'électrode disque - disque

Les différents résultats des paramètres Weibull à deux paramètres ainsi que les résultats des deux tests d'adéquation ; que se soit le test de khi-deux ou celui de Kolmogorov – Smirnov, sont représentés dans les tableaux Tab.10, Tab.11 et Tab.12

Configuration de l'électrode sphère- sphère ; Tension AC 50Hz				
d	1cm	3cm	5cm	7cm
(β)	44,181	68,138	101,232	60,750
(η)	36,243	51,327	53,472	61,169
Test K-S	89,07%	22,63%	86,26%	65,34%
Test de khi-2 $P(E < X^2_{v,1-\alpha})$	2,66%	0,01%	0,05%	0,03%

Tab.10 Résultats des paramètres de Weibull et des deux tests d'adéquation pour une configuration de l'électrode Sphère -sphère

Configuration de l'électrode pointe-pointe ; Tension AC 50Hz				
d	1cm	3cm	5cm	7cm
(β)	10,446	93,472	35,188	31,503
(η)	11,227	38,596	55,857	60,091
Test K-S	42,13%	47,74%	7,69%	42,65%
Test de khi-2 $P(E < X^2_{v,1-\alpha})$	0,03%	0,01%	0,18%	0,09%

Tab.11 Résultats des paramètres de Weibull et des deux tests d'adéquation pour une configuration de l'électrode pointe -pointe

Configuration de l'électrode disque-disque; Tension AC 50Hz				
d	1cm	3cm	5cm	7cm
(β)	36,266	29,242	22,908	42,746
(η)	24,4890	56,473	71,596	78,436
Test K-S	90,06%	46,75%	23,71%	39,66%
Test de khi-2 $P(E < X^2_{v,1-\alpha})$	4,75%	0,02%	0,00%	0,00%

Tab.12 Résultats des paramètres de Weibull et des deux tests d'adéquation pour une configuration de l'électrode disque -disque

D'après ces tableaux où les résultats de calcul des tensions de seuil de claquage pour la configuration sphère-sphère concernées, sont de signe moins. Chose inacceptable, donc on se contentera des représentations de Weibull à trois paramètres.

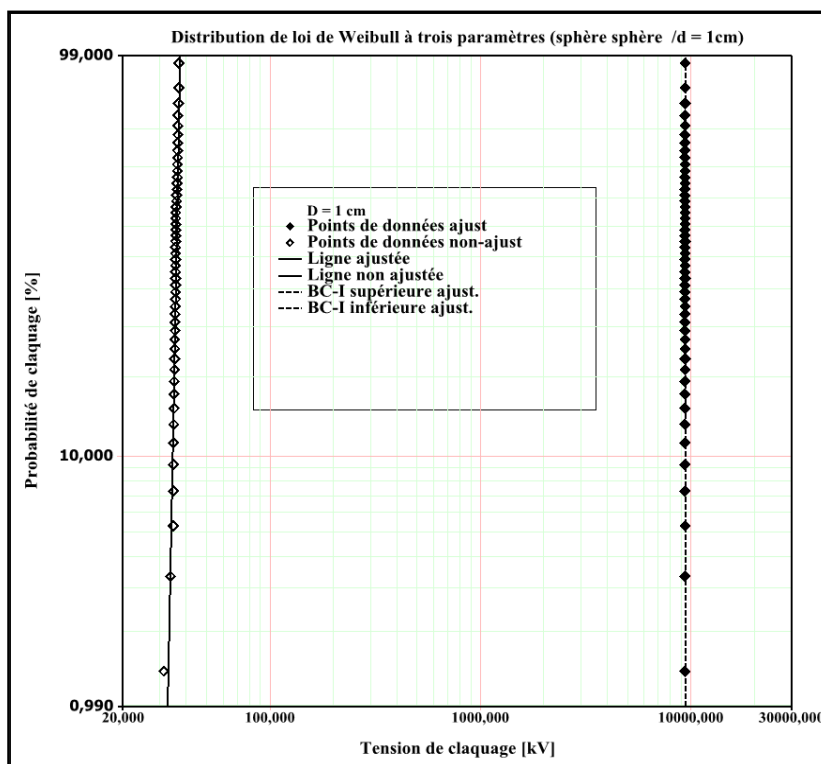


Fig.III.21 Diagramme de Weibull à trois paramètres pour une configuration de l'électrode sphère – sphère à une distance 1 cm

Configuration d l'électrode sphère-sphère					
Distance	(β)	(η)	(γ)	Test K-S	Test de khi-2 $P(E < X^2_{v,1-\alpha})$
1 cm	12136,07	9442,428	-9406,194	90,10%	0,88%

Tab.13 Résultats des paramètres de Weibull et des deux tests d'adéquation pour une configuration de l'électrode Sphère -sphère à une distance 1 cm

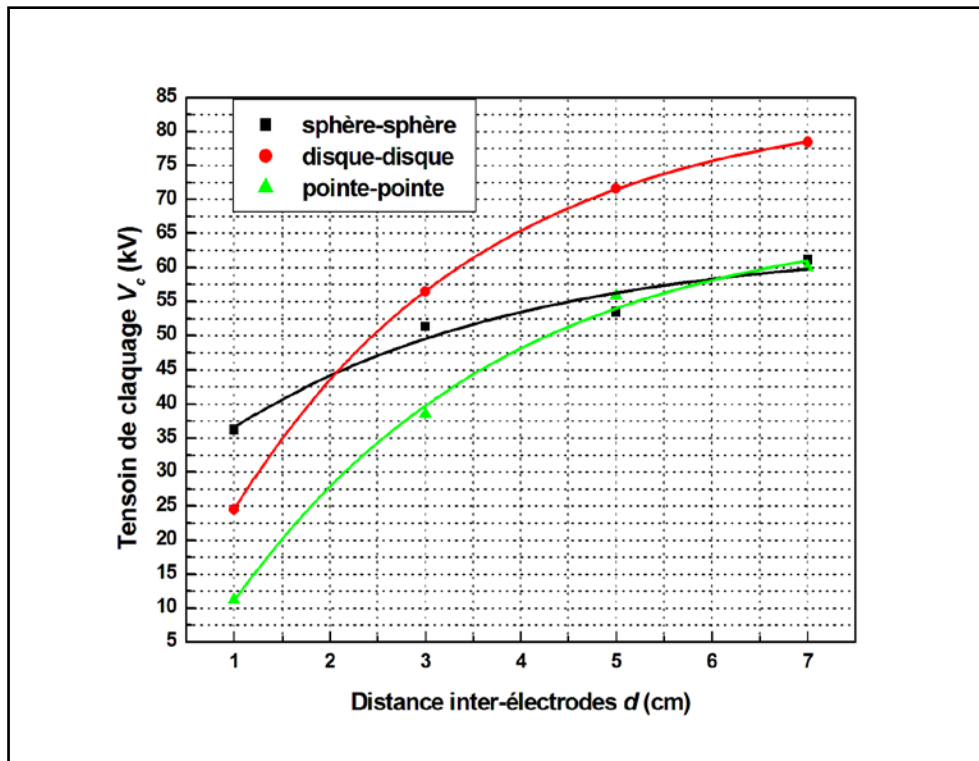


Fig.III.22 tracé de la tension de claquage en fonction de la distance interélectrode pour même configuration de l'électrode active sphère

La figure (III.22) montre l'évolution de la tension de claquage avec la distance inter-électrodes pour différentes configurations géométriques. De ce résultat, il en ressort qu'en plus de l'allure exponentielle $V_c(d)$, la tension de claquage est plus élevée pour un système disque-disque. Pour des distances inter-électrodes très élevées, le système pointe-pointe est équivalent au système sphère-sphère.

Dans les figures (fig.III.23) et (fig.III.24) sont représentés les diagrammes de Weibull à deux paramètres pour différentes configurations des électrodes (pointe-disque, pointe-sphère)

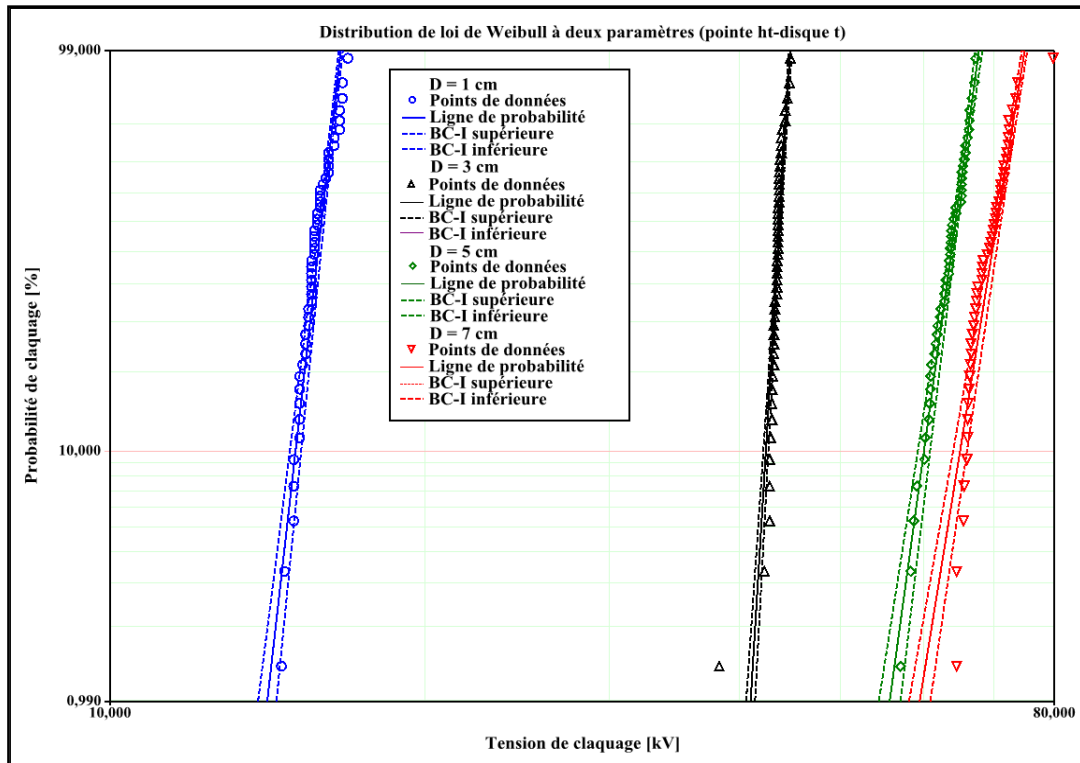


Fig.III. 23 Diagramme de Weibull à deux paramètres pour une configuration de l'électrode pointe-disque

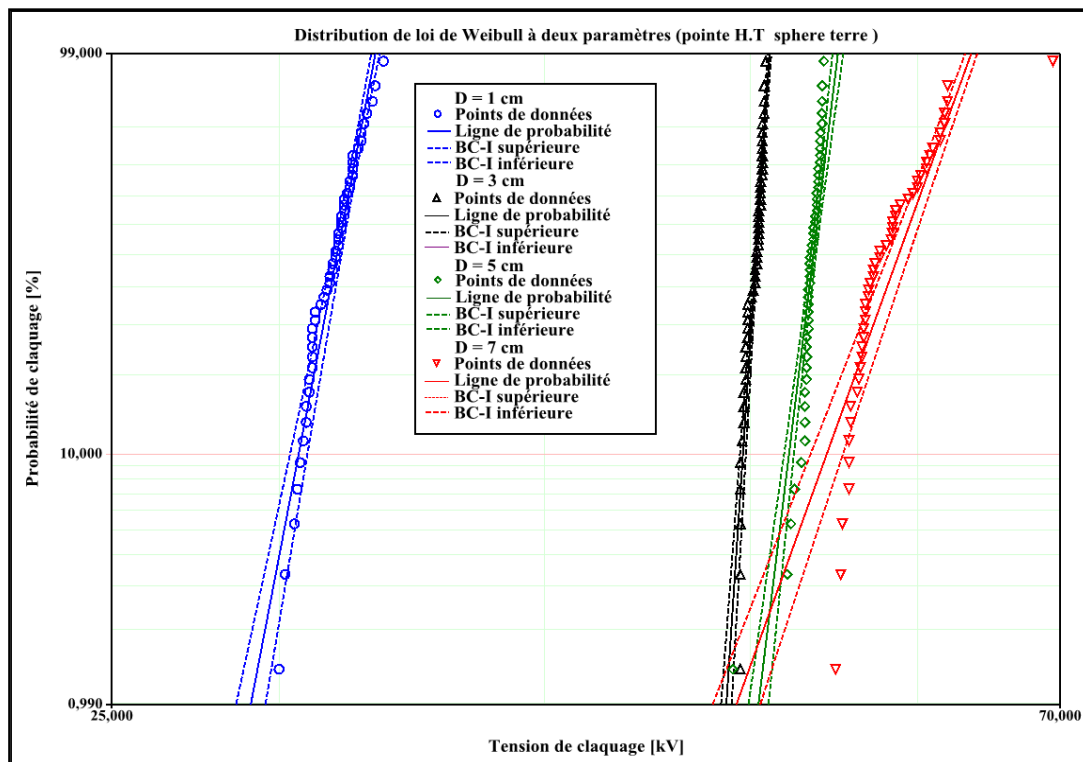


Fig.III. 24 Diagramme de Weibull à deux paramètres pour une configuration de l'électrode pointe-sphère

Les différents résultats des paramètres Weibull à deux paramètres ainsi que les résultats des deux tests d'adéquation ; que se soit le test de khi-deux ou celui de Kolmogorov – Smirnov, sont représentés dans les tableaux Tab.14 et Tab.15

Configuration de l'électrode pointe-sphère ; Tension AC 50Hz				
d	1cm	3cm	5cm	7cm
(β)	47,778	90,652	73,315	53,876
(η)	15,233	31,908	44,379	56,329
Test K-S	83,45%	89,54%	69,82%	16,97%
Test de khi-2 $P(E < X^2_{v,1-\alpha})$	47,778	90,652	73,315	53,876

Tab.14 Résultats des paramètres de Weibull et des deux tests d'adéquation pour une configuration de l'électrode pointe -sphère

Configuration de l'électrode pointe –disque ; Tension AC 50Hz				
d	1cm	3cm	5cm	7cm
(β)	19,533	67,980	61,490	103,198
(η)	15,438	37,749	44,983	51,738
Test K-S	83,40%	61,81%	41,46%	59,70%
Test de khi-2 $P(E < X^2_{v,1-\alpha})$	0,79%	0,01%	0,00%	0,01%

Tab.15 Résultats des paramètres de Weibull et des deux tests d'adéquation pour une configuration de l'électrode pointe -disque

D'après ces tableaux où les résultats de calcul des tensions de seuil de claquage pour la configuration pointe –disque concernées, sont de signe moins. Chose inacceptable, donc on se contentera des représentations de Weibull à deux paramètres

Configuration d l'électrode disque HT pointe					
distance	(β)	(η)	(γ)	Test K-S	Test de khi-2 $P(E < X^2_{v,1-a})$
D=3cm	1922,773	1662,371	-1618,458	99,52%	16,51%

Tab.16 Résultats des paramètres de Weibull et des deux tests d'adéquation pour une configuration de l'électrode disque -pointe à distance 3 cm

Dans les figures (fig.III.25) sont représentés les diagrammes de Weibull à trois

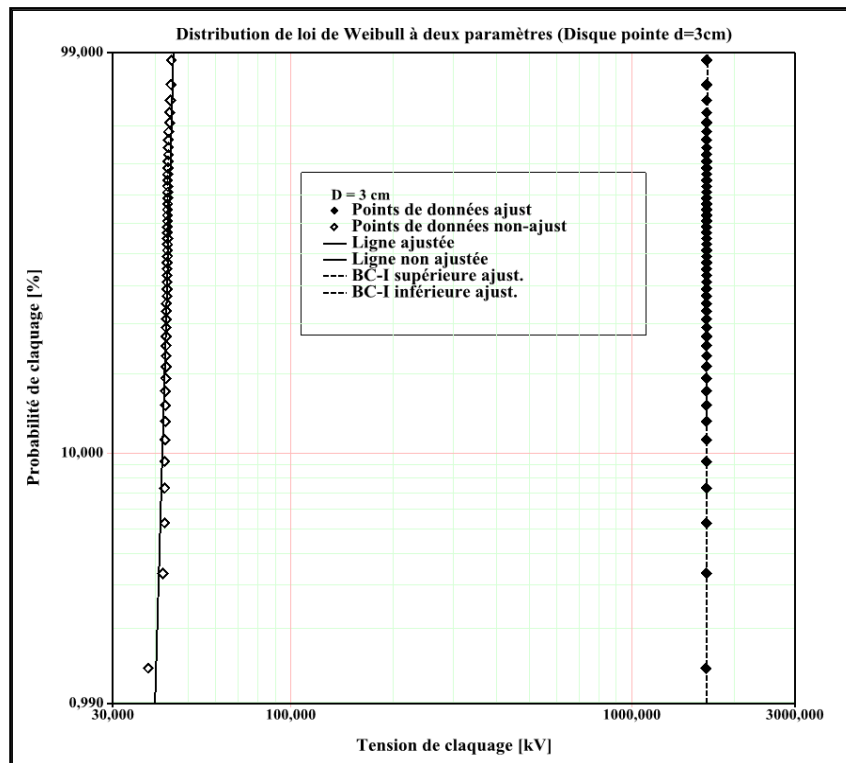


Fig.III.25 Diagramme de Weibull à trois paramètres pour une configuration d l'électrode pointe – disque

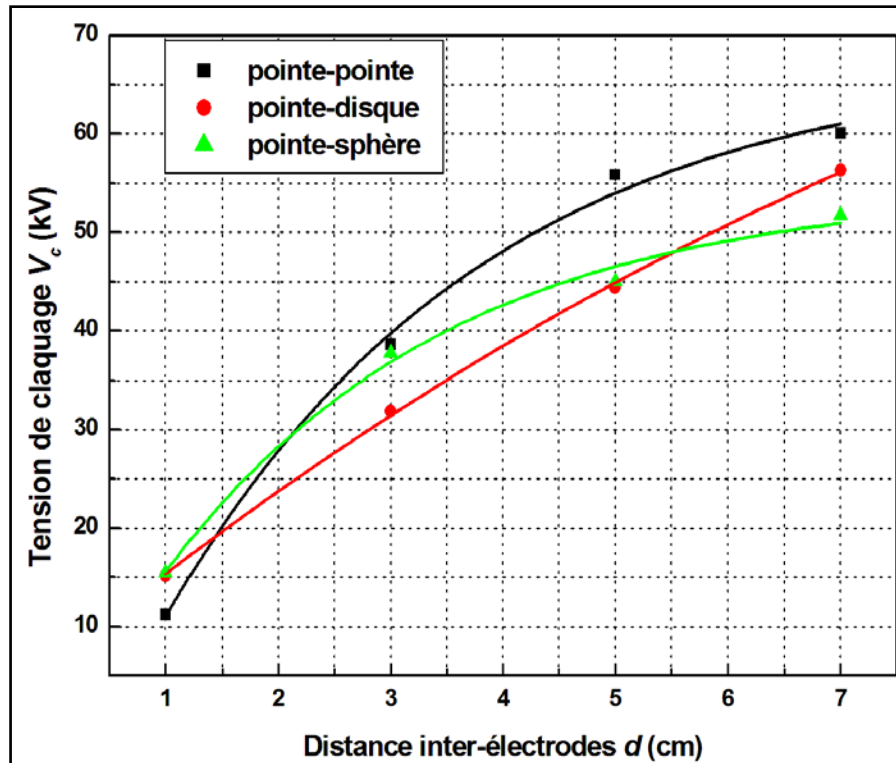


Fig. III.26 trace la tension de claquage en fonction de la distance interélectrode pour 1 électrode active pointe

Dans la figure (III.26), nous avons effectué trois séries d'essais avec des couples pointe-plan, pointe-disque et pointe-sphère en cuivre, et mettre en évidence l'effet de l'électrode passive. Nous remarquons que la tension de claquage est plus élevée lorsque l'électrode passive est de la même géométrie que l'électrode active. Par contre pour les distances très faibles, la tension est légèrement variable.

Dans les figures (fig.III.27) et (fig.III.28) sont représentés les diagrammes de Weibull à deux paramètres pour différents configuration des électrodes (pointe-disque, pointe-sphère)

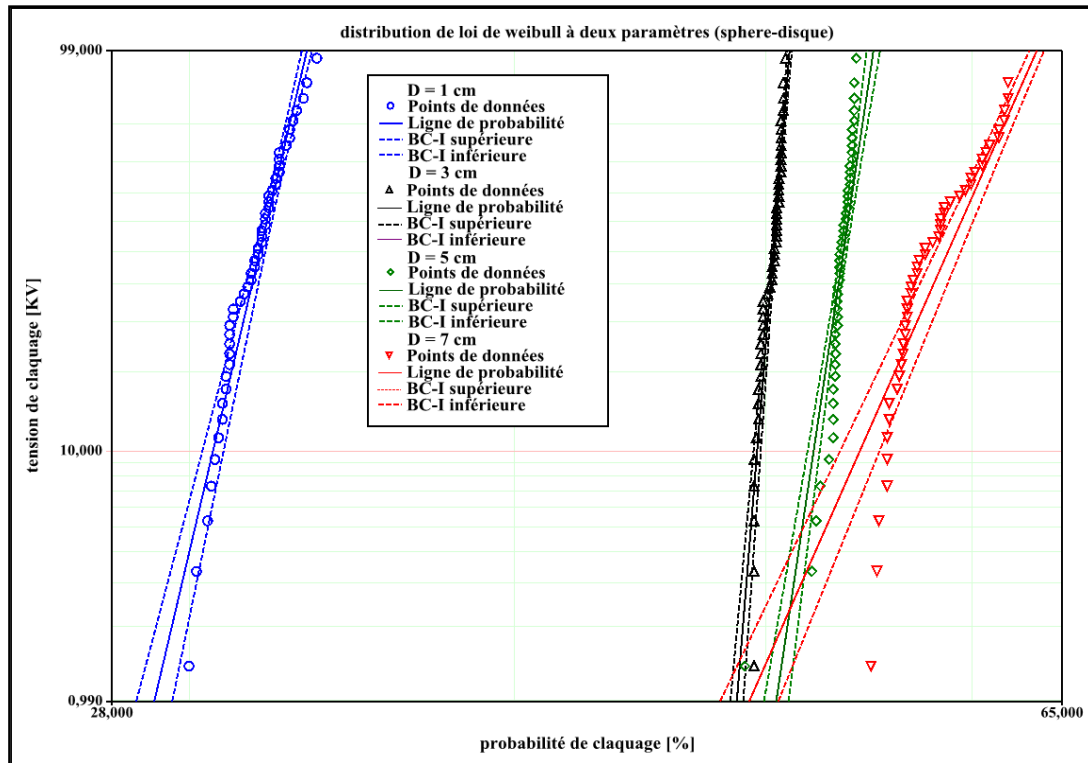


Fig.III. 27 Diagramme de Weibull à deux paramètres pour une configuration d'électrode sphère-disque

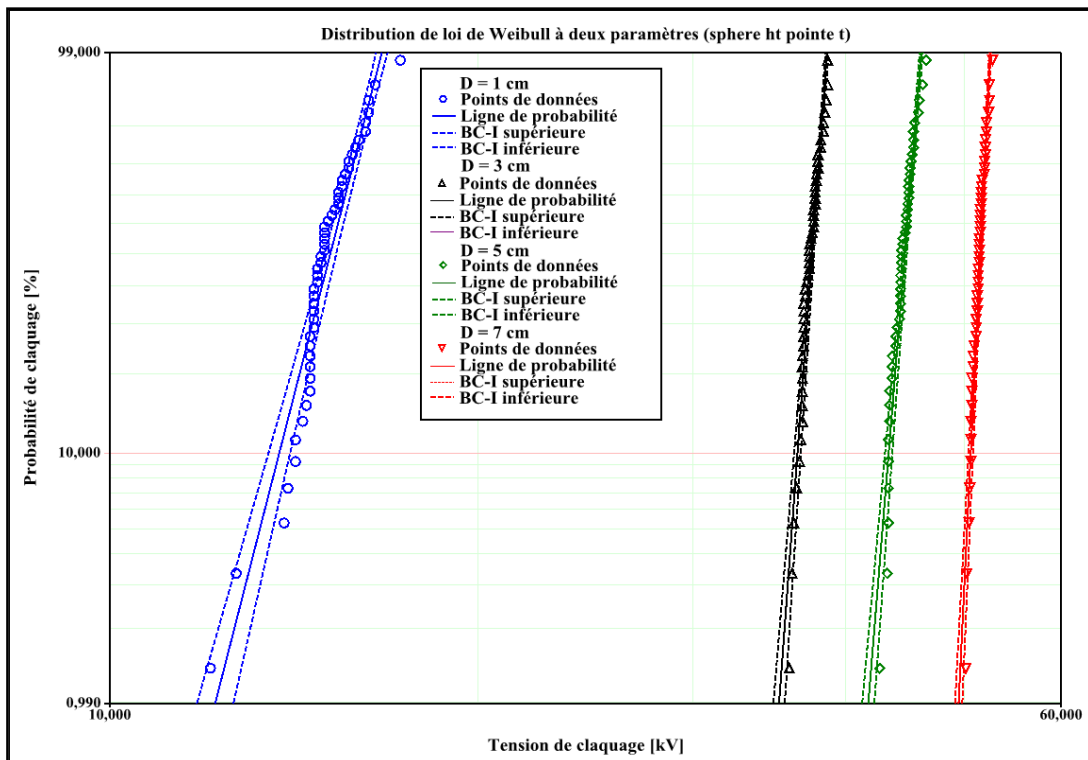


Fig. III.28 : Diagramme de Weibull à deux paramètres pour une configuration de l'électrode sphère-pointe

Les différents résultats des paramètres Weibull à deux paramètres ainsi que les résultats des deux tests d'adéquation ; que se soit le test de khi-deux ou celui de Kolmogorov – Smirnov,

sont représentés dans les tableaux Tab.17 et Tab.18

Configuration de l'électrode sphère –disque ; Tension AC 50Hz				
d	1cm	3cm	5cm	7cm
(β)	45,349	131,311	71,1890	24,075
(η)	32,1874	50,467	53,831	59,660
Test K-S	50,30%	79,67%	97,68%	90,53%
Test de khi-2 $P(E < X^2_{v,1-\alpha})$	0,00%	0,00%	16,17%	0,37%

Tab.17 Résultats des paramètres de Weibull et des deux tests d'adéquation pour une configuration de l'électrode Sphère -disque

Configuration de l'électrode sphère –pointe ; Tension AC 50Hz				
d	1cm	3cm	5cm	7cm
(β)	20,806	58,797	113,207	74,576
(η)	17,057	42,349	54,464	61,331
Test K-S	84,07%	95,27%	84,29%	56,54%
Test de khi-2 $P(E < X^2_{v,1-\alpha})$	0,06%	1,07%	0,04%	0,32%

Tab.18 Résultats des paramètres de Weibull et des deux tests d'adéquation pour une configuration de l'électrode Sphère -pointe

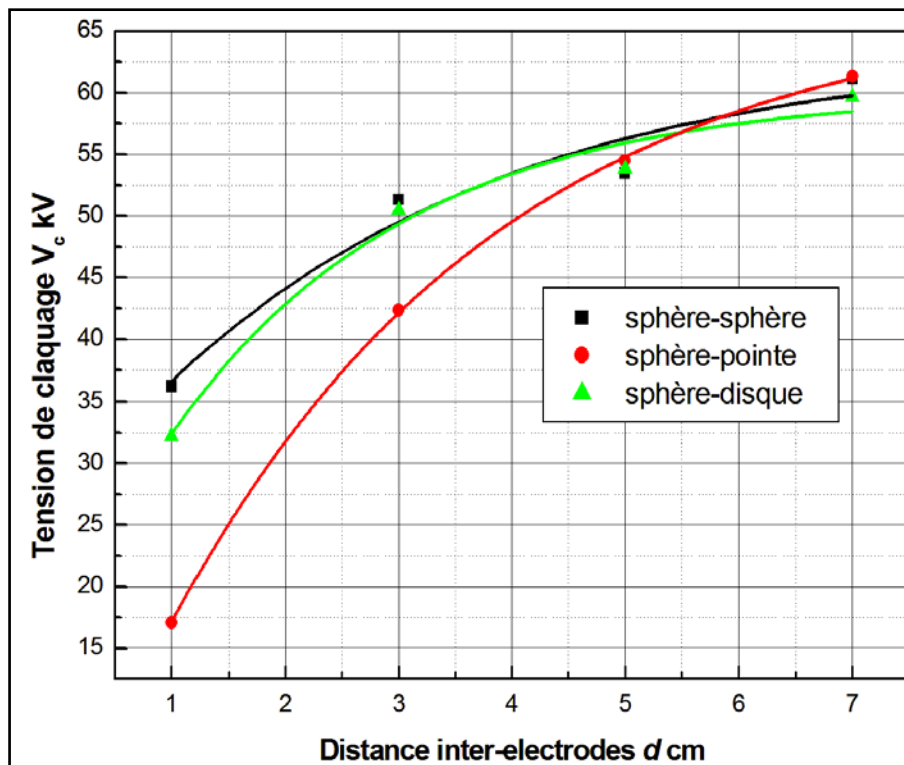


Fig.29 Tracer la caractéristique de la tension de claquage en fonction la distance inter électrode pour l'électrode active

La tension de claquage est plus élevée lorsque l'électrode passive est de la même géométrie que l'électrode active (voir la fig.III.29). On remarque aussi que la tension de claquage est presque constante pour des distances très grandes

Dans les figures (fig.III.30) et (fig.III.31) sont représentés les diagrammes de Weibull à deux paramètres pour différents configuration des électrodes (pointe-disque, pointe-sphère)

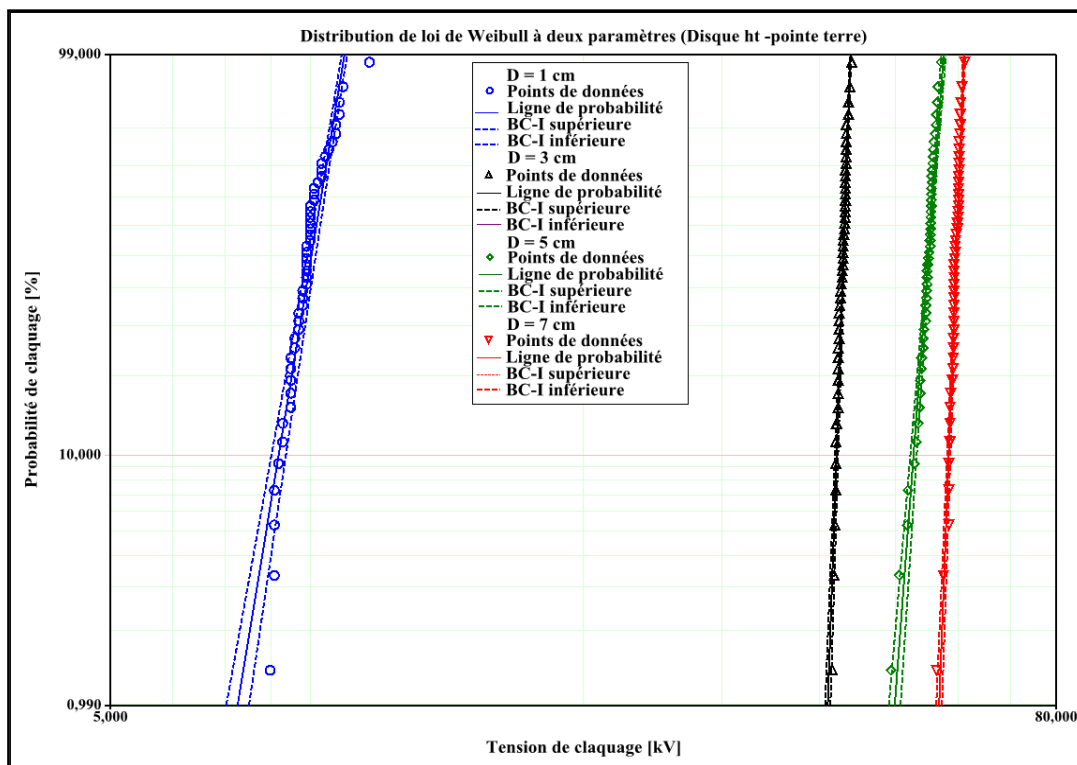


Fig.III. 30 Diagramme de Weibull à deux paramètres pour une configuration d'électrode disque-pointe

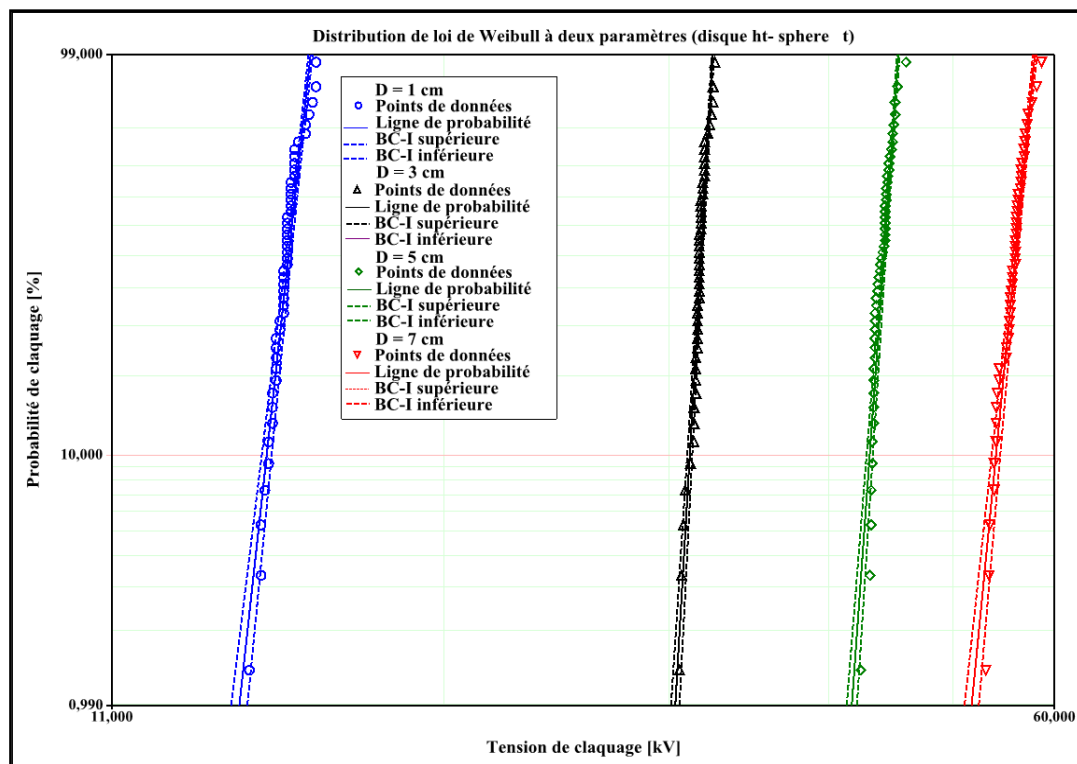


Fig.III. 31 Diagramme de Weibull à deux paramètres pour une configuration d'électrode disque-sphère

Les différents résultats des paramètres Weibull à deux paramètres ainsi que les résultats des deux tests d'adéquation ; que se soit le test de khi-deux ou celui de Kolmogorov – Smirnov, sont représentés dans les tableaux (Tab.19) à (Tab.20)

Configuration de l'électrode disque –sphère ; Tension AC 50Hz				
d	1cm	3cm	5cm	7cm
(β)	52,884	122,195	46,845	70,090
(η)	32,651	64,657	70,686	71,583
Test K-S	78,30%	25,01%	90,65%	18,64%
Test de khi-2 $P(E < X^2_{v,1-\alpha})$	0,00%	0,00%	0,09%	0,02%

Tab.19 Résultats des paramètres de Weibull et des deux tests d'adéquation pour une Configuration d l'électrode disque sphère

Configuration de l'électrode disque –pointe ; Tension AC 50Hz				
d	1cm	3cm	5cm	7cm
(β)	37,870	13074,156	31,210	26,542
(η)	15,962	43,767	64,534	70,766
Test K-S	83,96%	99,52%	9,73%	62,09%
Test de khi-2 $P(E < X^2_{v,1-\alpha})$	0,01%	16,42%	0,00%	0,01%

Tab.20 Résultats des paramètres de Weibull et des deux tests d'adéquation pour une configuration de l'électrode disque -pointe

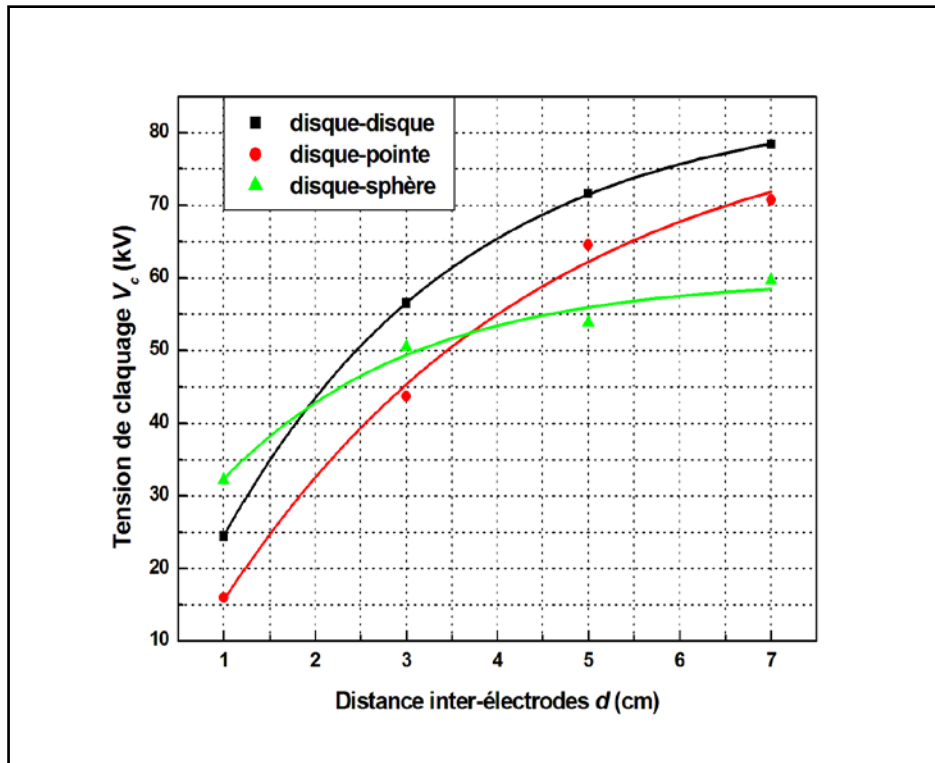


Fig.III.32 Tracé de la caractéristique de tension de claquage en fonction de la distance inter électrode pour l'électrode active disque

La figure (III.32) montre la variation de la tension de claquage en fonction de la distance inter-électrodes pour différentes configurations géométriques. De ce résultat, il en ressort qu'en plus de l'allure exponentielle $V_c(d)$, la tension de claquage est plus élevée pour une électrode passive de type disque. C'est-à-dire que le système est performant lorsque les électrodes active et passive sont de la même géométrie.

III.6 Influence de la nature des électrodes

III.6.1 Diagrammes de Weibull

Dans les figures (fig.III.33) à (fig.III.36) sont représentés les diagrammes de Weibull à deux paramètres pour différents configuration des électrodes (pointe-disque, pointe-sphère)

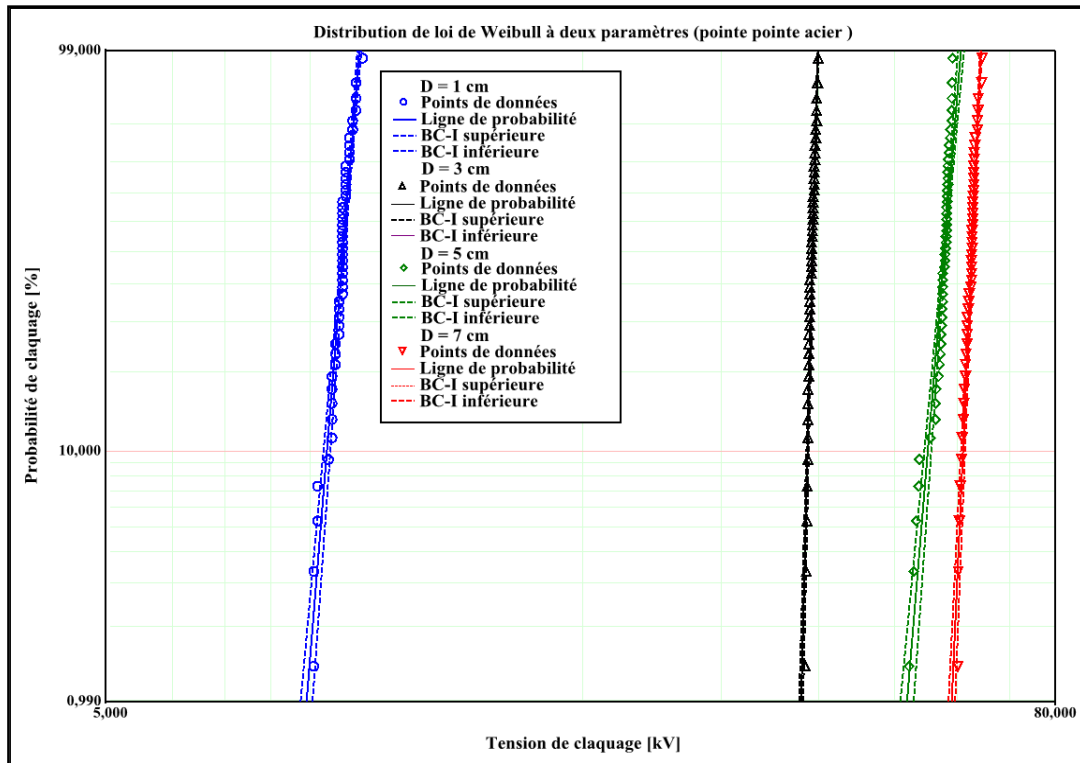


Fig. III.33 Diagramme de Weibull à deux paramètres pour une configuration d'électrode pointe-pointe en acier.

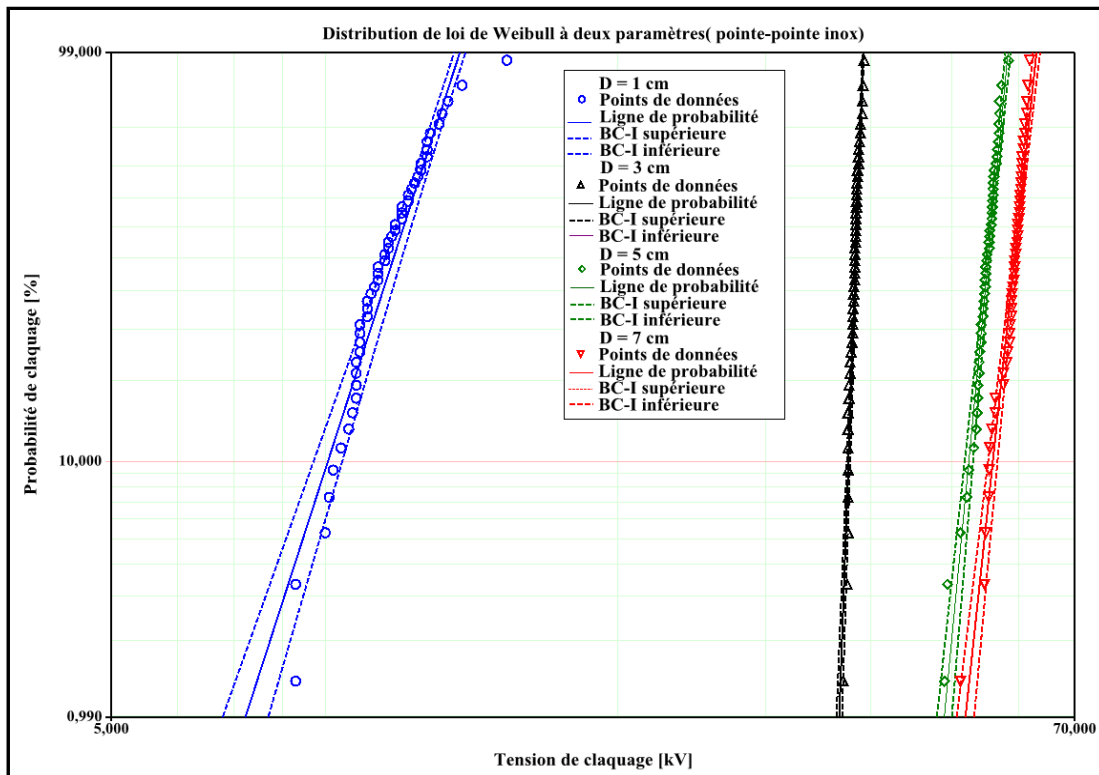


Fig.III. 34 Diagramme de Weibull à deux paramètres pour une configuration d'électrode pointe-pointe en inox

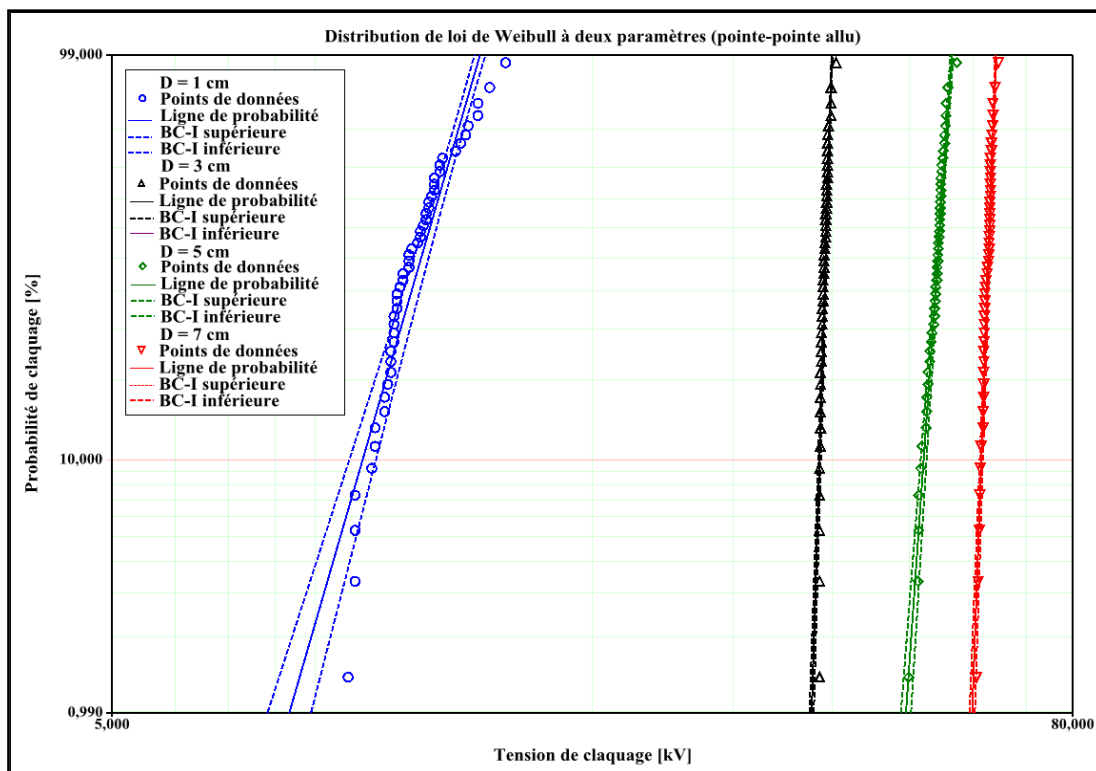


Fig.III. 35 Diagramme de Weibull à deux paramètres pour une configuration d'électrode pointe-pointe en aluminium

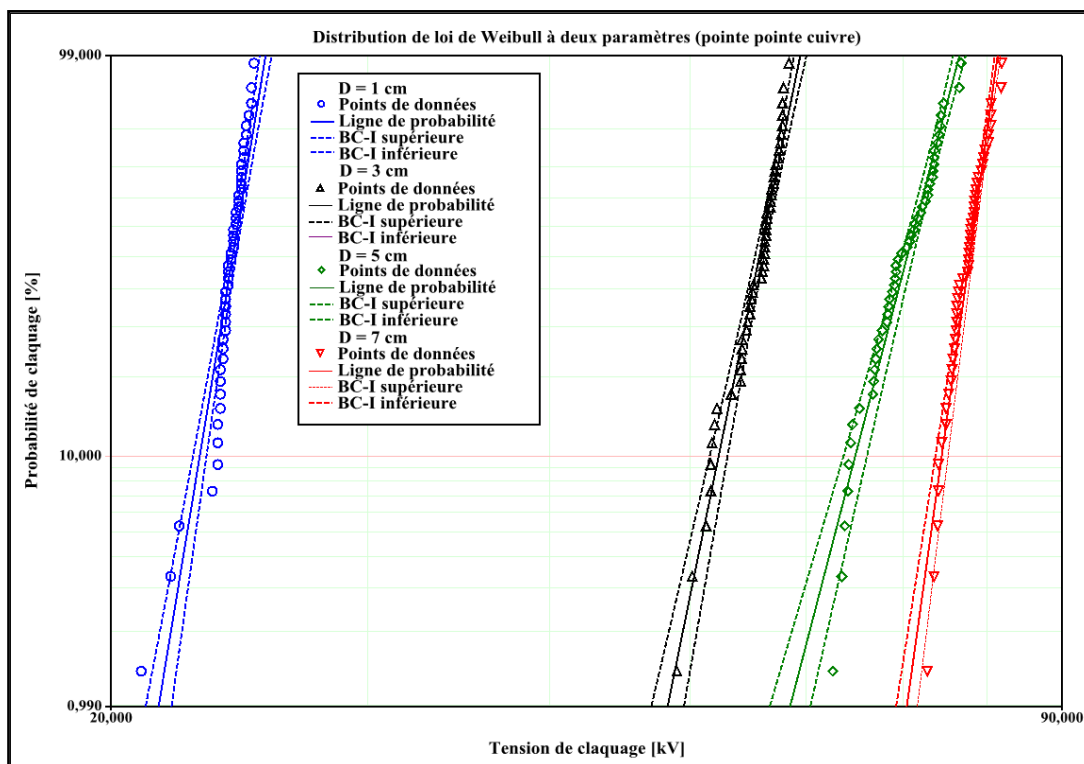


Fig.III. 36 Diagramme de Weibull à deux paramètres pour une configuration d'électrode pointe-pointe cuivre

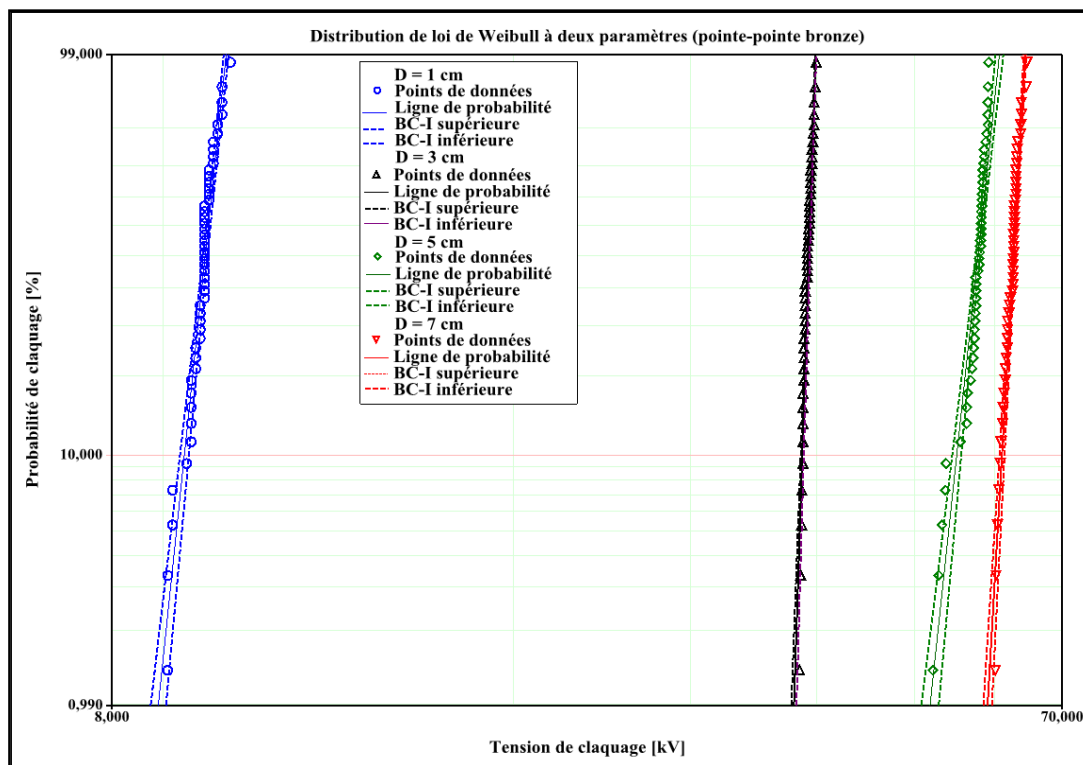


Fig. III.37 Diagramme de Weibull à deux paramètres pour une configuration d’électrode pointe-pointe en bronze

Les différents résultats des paramètres Weibull à deux paramètres ainsi que les résultats des deux tests d’adéquation ; que se soit le test de khi-deux ou celui de Kolmogorov – Smirnov, sont représentés dans les tableaux (Tab.21) à (Tab.26)

Configuration de l’électrode pointe –pointe ; acier				
d	1cm	3cm	5cm	7cm
(β)	39,628	123,808	38,763	71,922
(η)	9,992	39,400	58,339	62,975
Test K-S	89,83%	87,53%	75,25%	41,15%
Test de khi-2 $P(E < X^2_{v,1-\alpha})$	0,25%	0,00%	1,84%	0,01%

Tab.21 Résultats des paramètres de Weibull et des deux tests d’adéquation pour une configuration de l’électrode

pointe-pointe en acier

Configuration de l'électrode pointe –pointe ; aluminium				
d	1cm	3cm	5cm	7cm
(β)	17,258	16,785	24,996	59,253
(η)	9,501	35,494	42,303	56,0197
Test K-S	71,81%	55,64%	96,45%	74,28%
Test de khi-2 $P(E < X^2_{v,1-\alpha})$	0,01%	0,03%	0,02%	0,59%

Tab.22 Résultats des paramètres de Weibull et des deux tests d'adéquation pour une configuration de l'électrode pointe-pointe en aluminium

Configuration de l'électrode pointe –pointe ; cuivre				
d	1cm	3cm	5cm	7cm
(β)	10,446	93,472	35,187	31,503
(η)	11,227	38,596	55,857	60,091
Test K-S	42,13%	47,74%	7,69%	42,65%
Test de khi-2 $P(E < X^2_{v,1-\alpha})$	0,03%	0,01%	0,18%	0,09%

Tab.23 Résultats des paramètres de Weibull et des deux tests d'adéquation pour une configuration de l'électrode pointe-pointe en cuivre

Configuration de l'électrode pointe –pointe ; bronze				
d	1cm	3cm	5cm	7cm
(β)	11,15	104,686	46,254	89,828
(η)	12,612	39,363	54,632	63,024
Test K-S	66,53%	59,99%	24,16%	62,34%
Test de khi-2 $P(E < X^2_{v,1-\alpha})$	0,05%	0,02%	0,02%	0,01%

Tab.24 Résultats des paramètres de Weibull et des deux tests d'adéquation pour une configuration de l'électrode pointe-pointe en bronze

Configuration d l'électrode pointe –pointe ; inox				
d	1cm	3cm	5cm	7cm
(β)	11,15	104,686	46,254	89,828
(η)	12,612	39,363	54,632	63,024
Test K-S	66,53%	59,99%	24,16%	62,34%
Test de khi-2 $P(E < X^2_{v,1-\alpha})$	0,05%	0,02%	0,02%	0,01%

Tab.25 Résultats des paramètres de Weibull et des deux tests d'adéquation pour une configuration de l'électrode pointe-pointe en inox

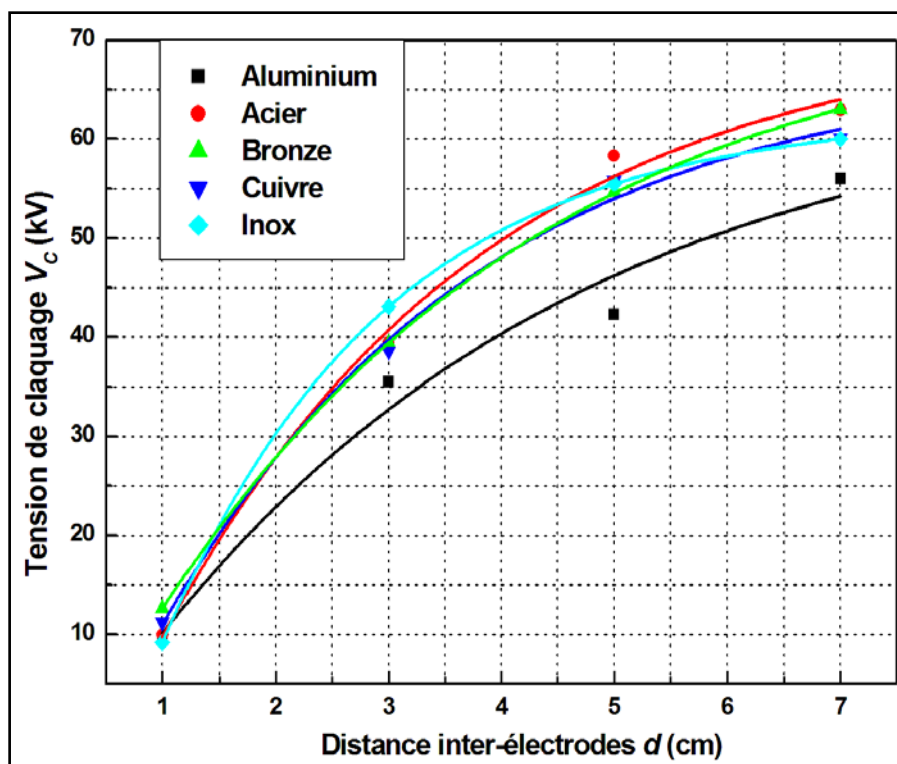


Fig.III.38 tracé la tension claquage en fonction de la distance inter-électrodes

Les résultats obtenus à partir de la mesure des tensions de claquage sont montrés à la figure (III.38). Ils concernent des électrodes actives (pointes) en Aluminium, Acier, Bronze, Cuivre, Inox pour différentes distances inter-électrodes. À l'examen de ces résultats, nous remarquons que les tensions de claquage sont plus élevées pour $d \geq 5$ avec une pointe en Acier et pour $d \leq 5$ la tension de claquage est plus élevée avec une pointe en Inox.

III.7 Conclusion

Le but de ce chapitre est l'étude expérimentale sur l'effet de différents paramètres influents sur la rigidité diélectrique dans l'air atmosphérique, tel que la nature de la tension appliqué, la distance interélectrode, la vitesse de la rampe de tension, la nature et la géométrie de l'électrode.

Conclusion générale

Conclusion générale

La rigidité diélectrique est une caractéristique importante symbolisant les isolants en matière de qualité électrique, le claquage n'est jamais causé par un champ électrique seul mais par un effort combinatoire entre ce dernier et d'autres phénomènes d'origine thermique, mécanique, chimique, ..., et aussi par l'influence de plusieurs paramètres.

Le champ de claquage est un phénomène aléatoire, des échantillons identique placé dans les mêmes conditions ne fournissent pas une seule valeur de tension de rupture, mais une distribution de valeurs, d'où la nécessité d'une analyse statistique approprié au traitement des données engendrées par ce phénomène.

Nous avons évoqué dans le contexte théorique les concepts physiques de base intervenant dans les gaz; tels des phénomènes et des mécanismes pré disruptifs rencontrés en présence d'un champ électrique. Ensuite nous avons donné une base théorique sur les statistiques de la rupture diélectrique ainsi que les principales lois utilisées en fiabilité, entre autre, l'application du modèle de Weibull à la caractérisation de la rupture diélectrique.

Dans ce travail, nous nous sommes intéressés à l'étude de l'air atmosphérique. Le but est de vérifier et d'étudier expérimentalement les paramètres influents sur sa rigidité diélectrique sous tension alternative sinusoïdale 50Hz, plusieurs paramètres d'influence sont traités à savoir ; l'influence de la montée en tension, la forme de tension appliquée, la géométrie des électrodes, leurs nature et la distance inter-électrode.

Le support et les différents types d'électrodes utilisés lors des essais de claquage, ont été réalisés au Hall de Technologie de l'université de Bejaia. Et les différents essais ont été effectués au laboratoire de décharges électriques dans le bloc de Haute Tension, au sein de la même université. En tout 5700 mesures ont été effectuées et traitées par le modèle statistique de Weibull pour réaliser ce travail.

Ce travail nous a permis de tirer ces quelques points de conclusion :

- ✓ Pour l'étude de valeurs de claquage où rupture, la méthode de Weibull reste la meilleure pour sa capacité à aller chercher un seuil de claquage s'il y a lieu.
- ✓ La dispersion des valeurs nous a imposée les intervalles de confiance pour bien cerner les points qu'ils sont en grande dispersion pour les faibles probabilités.
- ✓ Vu le nombre important des essais, il est préférable, d'utiliser le test d'adéquation de khi-deux pour l'ajustement de la loi de Weibull.

- ✓ La méthode du maximum de vraisemblance, s'impose dans le cas; où des valeurs de rupture se répètent.
- ✓ La dispersion de valeurs a lieu pour des faible probabilité de rupture, d'ailleurs; la méthode des intervalles de confiance permette d'encadrer et de cerner la vraie valeur de claquage recherchée.
- ✓ La nature du champ et aussi la nature de sa polarité, joue un rôle important à influencer la rigidité diélectrique de l'air atmosphérique. Ceci est dû; qu'en polarité négative, les électrons peuvent être extraits par effet de champ de la cathode ou du détachement à partir d'ions négatifs. En polarité positive, les ions positifs proviennent uniquement de l'ionisation du gaz.
- ✓ Nous avons montré que la vitesse de montée de la rampe de tension joue un rôle important dans le phénomène de la rupture diélectrique dans l'air atmosphérique. On peut consentir, à priori, que l'accroissement de la raideur de la rampe, diminuant en quelque sorte le délai laissé à l'incubation. En effet, pour les faibles vitesses de la rampe, la tension de claquage croît linéairement. Pour les vitesses élevées, on assiste à une variation de forme exponentielle, puis assiste à un phénomène de saturation pour des vitesses très élevées.
- ✓ La tension d'amorçage de l'air atmosphérique croît exponentiellement avec l'augmentation de la distance inter-électrodes.
- ✓ La nature de l'électrodes joue un rôle très important dans la rigidité diélectrique de l'air. qui est justifié par la différence dans le travail d'extraction d'électron de chaque matériau conducteur.
- ✓ la géométrie de l'électrode passive ou active, est un paramètre très important dans l'étude de la rigidité diélectrique de l'air atmosphérique. Ceci est dû à la dépendance du champ électrique du rayon de courbure de l'électrode utilisée.

Enfin, et en perspective, il est judicieux de compléter ce travail par l'étude de l'influence des paramètres physique de l'air (Pression, Humidité et Température) sur sa rigidité diélectrique et de voir l'influences des paramètres évoqués dans ce manuscrit sous tension continue.

Références bibliographiques

- [1] G. Le Roy, C. Gray, B. Hutzler, J. Lalot, ChDubanton , " les propriétés diélectriques de l'air et les très hautes tension". Edition eyrolles, Paris 1984.
- [2] A.Boubakeur, "FOUDRE – zone d'attraction d'un paratonnerre", support pour conférence, Alger, 2004.
- [3] E. Kuffel and M. Abdoullah, "High voltage engineering", Library of Congress Catalog Card N° 72□85501, first édition 1970.
- [4] A. Beroual, "Note de cours Master 2 Recherche Génie électrique : Matériaux du Génie Electrique Rigidité diélectrique des gaz", 2005
- [5] Y.Zebboudj « phénomène de conduction dans les gaz ». Cours de Master 2, technique de haute tension, université de Bejaia septembre 2013.
- [6] A. Brahmia, A.Saci "étude de l'influence de la barrière isolante sur la rigidité diélectrique de l'air " mémoire master académique, université kadi Mrbah ouargla ,2013
- [7] I. W. Mcallister, G.C grichton, and E.Bregnsbo «experimental study on the onset of positive corona ice atmospheric». J, Appl Physic 50(11), 6791-6805, 1979.
- [8] Flavien.Koliatene « contribution à l'étude de l'existence des décharges dans les systèmes de l'avionique ». Thèse de doctorat de l'université de Toulouse III-Paul Sabatier, le 5 janvier 2009.
- [9] R. Fournié, "Les isolants en électrotechnique- Concepts et Théories-" Préface ; Christian Rioux, Edition Eyrolles, 1986.
- [10]R.farhi, c.Morel, G. chéron <<matières plastiques et adjuvant hygiène et sécurité>>. INRS, ED638, octobre 2006
- [11]Saad Djedjigua <<Effet de la décharge couronne sur les surfaces isolantes et les surfaces métalliques>>. Mémoire de magister, Université Mouloud Mammeri de TIZI OUZOU, Avril 2011.
- [12]Des boues d'épuration sous très haute tension CEA Technologies, CEA Technologies, décembre 2002.
- [13]A.Samuila, L.Dasalescu et R.Tabazeon, "breakdown of ionize d air gapsin the presence of spherical conductive particle " Graz 1995.

- [14] R. Boudissa, «cours de technique d'isolation en électrotechnique, master THT, université de Bejaia, septembre 2013.
- [15] M. Nedjar, "Evaluation de la tenue diélectrique à court et à long termes des polymères utilisés dans les dispositifs haute tension", Thèse doctorat, Université de Tizi Ouzou, Algérie 2003.
- [16] IEEE Guide for the statistical analysis of electrical insulation voltage endurance data, ANSI/IEEE Std. 930, 1987.
- [17] G.C. Motanari, G. Pattini and L. Simoni, "Long term behaviour of XLPE insulated cable", IEEE Trans. Power Delivery, Vol. 2, pp. 596-602, 1987.
- [18] W. Nelson, Applied Life Data Analysis, John Wiley and sons, New York, 1982.
- [19] J.F. Lawless, Statistical Models and Methods for Lifetime Data", John Wiley and sons, New York, USA, 1982.
- [20] W. Weibull, "A statistical distribution function of wide applicability", J. Appl. Mechanics, Vol. 18, pp. 293-297, 1951.
- [21] K. Wu, Y. Wang, Y. Cheng, L. A. Dissado and X. Liu, "Statistical behavior of electrical breakdown in insulating polymers", J. Appl. Phys., Vol. 107, 064107, pp. 064107-1-064107-6, 2010.
- [22] F. Chang, "Electrical properties of flexible polypropylene based cable insulation materials", J. Mater. Sci., Vol. 41, pp. 2037-2043, 2006.
- [23] A. Laifaoui, J. M. Reboul, M. Aissou, M.S. Herzine, M. Nedjar et Y. Zebboudj: « Etude de la rupture diélectrique du polychlorure de vinyle », SFE'2012, Cherbourg-Octeville, France, 3-5 juillet 2012.
- [24] A. Laifaoui, J. M. Reboul, M. Aissou, M.S. Herzine, M. Nedjar and Y. Zebboudj: «Study of the dielectric failure of polyvinyl chloride sheaths under AC and DC high voltages», ICEEAC, Setif, Algeria, 24-26 November 2013.
- [25] A. Laifaoui, J. M. Reboul, M. Aissou, M.S. Herzine, M. Nedjar and Y. Zebboudj: «Influence de la rampe de tension ainsi que de sa forme sur la tension de claquage des gaines en PVC», ICEL'13, Oran, Algérie, 03-04 décembre 2013.
- [26] Bernard Delmas, Statistique descriptive, Paris, Nathan, pp. 143, 1996.

- [27] R. Lacoste, « nouveaux développements sur la notion de champ seuil », S.E.E, Mai 1986, pp. 13-18.
- [28] A. C. Cohen, "Maximum likelihood estimation in the Weibull distribution based on complete and on censored samples", *Thechnometrics*, Vol. 7, No. 4, pp. 579-588, 1965.
- [29] J. F. Lawless, "Confidence interval estimation for the Weibull and extreme-value distribution", *Thechnometrics*, Vol. 20, No. 4, pp. 355-363, 1978.
- [30] J. F. Lawless, "Construction of tolerance bounds for the extreme-value and Weibull distributions", *Thechnometrics*, Vol. 17, No. 2, pp. 255-261, 1975.
- [31] G. C. Stone and R. G. Van Heeswijk, "Parameter estimation for Weibull distribution", *IEEE Trans. Electr. Insul.*, Vol. 12, No. 4, pp. 253-261, 1977.
- [32] G. C. Stone, "Personal computer software to analyse extreme-value and Weibull statistical data", Ontario Hydro Research Division, 1986.
- [33] Commission Electrotechnique Internationale, comité d'étude N°63, « systèmes d'isolation : évaluation de l'endurance électrique des systèmes d'isolation électrique, procédure d'évaluation basée sur des distributions de valeurs extrêmes », Septembre 1989.
- [34] B. Grais, "Méthodes statistiques", Edition Dunod, 1990.
- [35] P. Chapouille, R. de Paizzis, « fiabilité des systèmes », édition Masson, 1965.
- [36] R. Lacoste, E. Loudghiri, J. Meric, "Sur la notion du gradient de seuil dans le phénomène de rupture diélectrique des isolants solides soumis à des rampes de tension", *REG*, 10/85, Octobre 1985, pp. 769-775.
- [37] C. Chauvet, C. Laurent, « Weibull statistics in short-term dielectric breakdown of thin polyethylene films », *IEEE Trans. On Elect. Insul.*, Vol. 28, N°1, February 1993, pp. 18-29.
- [38] L. Simoni, « Dielecttrici proprieta e comportamento nel tempo », Université de Bologne, Italie, 1974.