

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

FACULTE DE TECHNOLOGIE
DEPARTEMENT DE GENIE
ELECTRIQUE
N° : RES 261



DOMAINE : GENIE ELECTRIQUE
FILIERE : ELECTROTECHNIQUE
OPTION : RESEAUX ELECTRIQUE

*Mémoire présenté pour l'obtention
Du diplôme de Master Académique*

Par: Choutri Yasser
Rebhi Houssam Eddine

Intitulé

**Etude de la rigidité diélectrique des intervalles
d'air pointe-plan avec les différentes formes de
tensions**

Soutenu devant le jury composé de:

Mr BENGUASSMIA Hani	Université de M'sila	Président
Mr CHOUCHOU Abdelmadjid	Université de M'sila	Rapporteur
Mr MERABET Elkheir	Université de M'sila	Examineur

Année universitaire : 2016 /2017

REMERCIEMENTS

En premier lieu, nous tenons à remercier Dieu, notre créateur Pour nous avoir donné la force afin d'accomplir ce travail. Un grand remerciement ainsi qu'une immense reconnaissance à nos très chers parents, qui nous ont soutenus et assistés dans les études et la vie, à nos frères et nos sœurs chacun par son nom, pour leur amour et soutien sans omettre nos familles. A tous mes amis et collègues de l'Université

Nos sincères remerciements à notre encadreur :
Monsieur **Mr CHOUCHOU Abdelmadjid** Pour son grand soutien, ses conseils ainsi que pour les efforts considérables déployés. Nous remercions également tous les professeurs du Département de « génie électrique » ayant participé de près ou de loin à la Réalisation de ce travail.

Dédicaces

On dédie ce modeste travail :

A Nos très chers parents et à notre grande famille.

A tous les enseignants

De département Génie électrique

À l'université de M'sila

A nos très chers frères et sœurs.

A mes tantes et oncles.

A tous nos amis.

A tous ceux qui nous aiment et que nous aimons.

A vous.

Table des matières:

Introduction Générale	1
I LA RIGIDITE DIELECTRIQUE DES INTERVALLES D'AIR POINTE-PLAN.....	3
I.1.Introduction	4
I.2. Rigidité diélectrique de l'air.....	4
I.3 Géométrie de l'intervalle	4
I.4 Type des l'intervalle d'air	5
I.4.1 Intervalle d'air point-plan.....	5
I.4.2. Intervalle d'air plan-plan.....	5
I.4.3. Intervalle d'air point-plan	6
I.5 Rappells des différents régimes de décharge en point plan.....	8
I.5.1. Champ électrique et topographie de décharge en géométrie point-plan.....	8
I.5.2. Effet de couronne.....	9
I.6 Décharges dans les gaz	10
I.6.1. Tenue diélectrique de l'air en champ uniforme	10
I.6.1.1. Mécanisme d'avalanche électronique (décharge de Townsend).....	12
I.6.1.2.Limite du Critère de Townsend	12
I.6.2. Mécanisme des canaux (streamers).....	13
II. ETUDE DES DIFFERENTS TYPES DE TENSIONS	17
II.1. Introduction	18
II.2 Influence du type de tension	18
II.3 Tension continu.....	18
II.3.1. Polarité positive	18
II.3.2Polarité négative.	19
II.4 Tension alternative	20
II.5. Tension impulsionnelle	20
II.5.1. contraintes de tension	20
II.6. chocs de foudre.....	21
II.6.1. Electricité atmosphérique	21
II.6.2. Par beau temps	21
II.6.2.1. Electrosphère	21
II.6.3. Par temps nuageux	22
II.6.3.1 Formation du nuage.....	22
II.6.3.2. Formation du charges	22
II.6.3.3 Répartition des charges.....	22
II.6.4. Classification et description des coups de foudre	23
II.6.4.1. Classification des coups de foudre	23
II.6.5. Déroulement d'un coups de foudre	24
II.6.5.1. Coups de foudre ascendant.....	24
II.6.5.2. Coups de foudre descendant.....	24
II.8. Conclusion générale	26

III TECHNIQUE DE SIMULATION DE LA TENSION ET ETUDE DE LA RIGIDITE DES INTERVALLE POINT PLAN	26
III.1. Introduction.....	28
III.2. ETUDE DU GENERATEUR DE CHOC (TYPE MARX).....	28
III.2.1 Principe de fonctionnement	28
III.2.2. Schéma pratique d'un generateur de choc	30
III.2.3. Etude de générateur de choc de type marx en utilisant les circuits équivalents	31
III.3. APPLICATION SUR DES TENSIONS USUELLES.....	36
III.3.a. Onde de manœuvre (250/2500 μ S)	36
III.3.b. Onde de manœuvre (500/10000 μ S)...	37
III.3.c. Onde de manœuvre (1.2/50 μ S)	38
III.4.Détermination de la tension U_{50}	39
III.5. Modèles réduits de simulation.	39
III.5.1. Cas du sol homogène bon conducteur	39
III.5.2. cas du sol discontinu	41
III.6. SOL HOMOGENE	42
III.6.1. Influence de la longueur de l'intervalle tige-plan "h"	42
III.6.2. Influence de la conductivité du sol	43
III.6.3. Influence de la polarité de la tige.....	44
III.7. SOL DISCONTINUE	45
III.7.1. Influence de la distance "d"	45
III.7.2. Influence de la longueur de l'intervalle "h"	49
III.7.3. Influence de la conductivité	20
III.7.4. Influence de l'épaisseur	51
III.7.5. Influence de la conductivité	51
III.8. Conclusion générale.....	54
Annexe	55
Référence bibliographique.....	59
Résumé.....	60

Liste des Figures

Figure I.1 - Electrode de décharge à barrière diélectrique (DBD) [3].....	5
Figure II.2 - Arc transféré [3].....	6
Figure II.3 - Arc non transféré (torche à plasma) [3].....	7
Figure II.4 - Décharges glissantes [3]	7
Figure II.17- Topographie de la décharge couronne en configuration pointe-Plan. [21].....	8
Figure II.18 - Système d'électrodes pointe –plan [21].....	9
Figure II.19 - Systèmes d'électrodes couramment utilisés pour la production de la décharge couronne [23] [24].....	10
Figure II.5- Schéma de l'avalanche de Townsend.[15].....	12
Figure II.6 - Avalanche électronique [11].....	13
Figure II.7- Schéma d'une avalanche électronique.[15].....	13
Figure II.8 - Etapes successives de développement du streamer positif [12].....	14
Figure II.9 - Etapes successives de développement d'un streamer dans un gaz en configuration d'électrodes pointe – plan	15
Figure II.10 - Etapes de développement d'un streamer positif en champ uniforme [13].....	15
Figure II.11 - Schéma du développement de décharges dans un système d'électrodes pointe –Plan avec une pointe positive (a) streamer ; (b) leader ; (c) décharge principale.[13].....	16
La flèche représente le sens de développement des différents stades de la décharge [13].....	16
Figure II.12 - Fréquence d'apparition des streamers dans l'air en fonction de la tension appliquée V Dans un système d'électrodes pointe – plan, en polarité positive; d = 31 mm -Rayon de la pointe = 0,17 mm [14].....	18
Figure II.13 - Constitution du nuage [15].....	22
Figure II.14 - Nuage fait apparaître sur la terre, par influence électrique [15].....	23
Figure II.15 - Représentation schématique des différents coups de foudre [15].....	23
Figure II.16 - Evolution spatio-temporel d'un coup descendant et courant mesuré à la surface de la terre [19].....	25
Figure III.1 - Schéma électrique d'un générateur de choc : noté les éclateurs à sphères pour la commutation en série des condensateurs [25].....	29
Figure III.2 - Circuit de générateur de choc [26].....	30
Figure III.3 - Schéma équivalent du générateur de Marx à trois étages [26].....	31
Figure III.4 - Schéma simplifié du générateur choc [27] [26].....	31
Figure III.5 - Bloc diagramme permettant le calcul des paramètres du schéma équivalent du générateur de Marx [27].....	35
Figure III.6 - Tension de générateur de choc d'une onde (250/2500) μ s est tension crête 850Kv.....	36
Figure III.7 - Tension de générateur de choc d'une onde (500/10000) μ s est tension crête 1870Kv.....	37
Figure III.8 - Tension de générateur de choc d'une onde (1.2/50) μ s est tension crête 600 Kv.....	38
Figure III.9 - Configuration du système tige-plan avec sol homogène mauvais conducteur.....	40
Figure III.10 - Configuration du système tige-plan avec sol homogène bon conducteur.....	40
Figure III.11 - Configuration du système tige-plan avec sol discontinu.....	41
Figure III.12 - U_{50} . en fonction de h. Intervalle tige positive-plan. Sol homogène.....	42
Figure III.13 - U_{50} en fonction de h. Intervalle tige négative-plan. Sol homogène.....	43
Figure III.14 - Variation de U_{50-} / U_{50+} avec la conductivité $\gamma(\mu$ S /cm).....	44
Figure III.15 - Evolution de U_{50} en fonction de la distance d dans le cas de la tige positive.....	46

Figure III.16 - Evolution de U_{50} en fonction de la distance d dans le cas de la tige négative.....	48
Figure III.17 - U_{50} en fonction de I 'intervalle dans le cas de la tige positive.....	49
Figure III.18 - Influence de longueur h sur U_{50}/U_{hom} dans le cas de la tige négative à droite de l'interface.....	50
Figure III.19 - Influence de l'épaisseur e sur U_{50}/U_{hom} dans le cas de la tige négative à droite de l'interface.....	51
Figure III.20 - U_{50} en fonction de la distance dans le cas de la tige positive ($h=4$ cm).....	52
Figure III.21 - U_{50} en fonction de la distance dans le cas de la tige positive ($h=8$ cm).....	52
Figure III.22 - U_{50} en fonction de la distance dans le cas de la tige négative ($h=4$ cm).....	53
Figure III.23 - U_{50} en fonction de la distance dans le cas de la tige négative ($h=8$ cm).....	53

Liste des Tableaux

Tableau II.1 - Rigidité diélectrique relative de quelques gaz par rapport à l'air dans un champ uniforme [8].....	11
---	----

Table de nomenclature

C : la capacité d'un condensateur sphérique.

R_t : Rayon de la terre.

R_e : Rayon de l'électro sphère.

W : l'énergie fournie par le coup de foudre.

R : la résistance.

t_i : Le temps initial du phénomène de foudre.

t_f : Le temps final du phénomène de foudre.

i : Le courant généré par le coup de foudre.

h : Constante de Planck : $6,63.10^{(-34)} m^2 kg / s$

v: Fréquence de l'onde lumineuse.

α : Premier coefficient de Townsend.

γ : Second coefficient de Townsend.

$T_1.T_a$: La durée conventionnelle du front.

$T_2.T_b$: La durée de queue à mi- amplitude.

T_{90} : Le temps au bout duquel l'impulsion atteint 90% de sa valeur crête U_{cr}

T_{30} : Le temps au bout duquel l'impulsion atteint 30% de sa valeur crête U_{cr}

C_1 :Condensateur du générateur chargé par une source de tension continue avec la tension désirée.

L_1 : Inductance du générateur et les conducteurs connectés au circuit de décharge, en général, prends de faibles valeurs.

R_1 : Résistance insérée pour contrôler la forme d'onde.

L_3, R_3 :Eléments externes qui peuvent être reliés au générateur pour contrôler la forme d'onde.

C_4 et C_2 : Condensateurs pour compenser la tension.

R_4 et R_2 : Résistance pour contrôler la durée d'onde.

R_c : Résistance de charge.

R_s : Résistance série équivalente.

R_p : Résistance parallèle équivalente.

C_1 : Condensateur de choc.

C_2 : Condensateur de charge.

T_f : La constante de temps de front.

T_q : La constante de temps de mi- amplitude.

U_m : L'amplitude maximum.

U(t) : La forme de tension générée par le générateur de choc.

$U_{50\%}$: La tension à 50% de décharges disruptives.

h : La longueur de l'intervalle d'air.

T_0 : Température ambiante.

P_0 : Pression atmosphérique.

d : La distance.

γ : La conductivité

Introduction Générale

Introduction Générale

L'étude des décharges électriques dans les intervalles d'air présente un grand intérêt du point de vue industriel, afin de faire face aux problèmes liés à l'isolation et à la protection des réseaux de transport et de distribution d'énergie (lignes HTA, HTB, transformateurs, appareils de coupure, ...etc.).

L'étude de la rigidité diélectrique et du champ électrique au niveau des isolations est très importante dans l'engineering haut tension. En effet, plus la tension est élevée, plus le champ électrique augmente. Les distances d'isolation nécessaires sont alors importantes et le matériel encombrant, donc cher. Il faut utiliser au mieux les systèmes d'isolation afin de réduire la taille des appareils, mais sans pour autant en diminuer la qualité. Ainsi, un champ trop élevé signifie une durée de vie courte et un manque de fiabilité.

La connaissance de valeurs des tensions disruptives est d'une grande importance pour la coordination de l'isolement dans l'engineering des systèmes de haute tension. Donc des modèles expérimentaux ont été proposés simulant les processus physiques réels qui se déroulent en certaine phase de la décharge qui est généralement le saut final pour le choc de foudre. Mais tous ces modèles sont limités à des distances inter-électrodes relativement petites. L'étude des grands intervalles d'air demande plus de moyens qui peuvent générer des tensions élevées.

La compréhension des phénomènes physiques intervenant lors des décharges permet d'expliquer les mécanismes fondamentaux qui régissent la propagation de la décharge dans les gaz. La reproduction de ces décharges électriques dans le laboratoire a permis d'étudier la rigidité diélectriques des intervalles d'air pointe-plan sous les différents type de tension. Ce n'est qu'à partir du début du vingtième siècle, avec l'évolution technique, que la connaissance sur le phénomène de la décharge atmosphérique a commencé à être de plus en plus approfondie.

Il est impossible de reproduire en laboratoire les formes complexes de surtensions observées ou attendues en réseau ; c'est pourquoi, la plupart des résultats ont été obtenus avec une onde de forme simple, en double exponentielle produite par les générateurs de choc. Si l'on veut étudier les problèmes de claquage de grands intervalles, il faut générer des tensions d'amplitude d'autant plus élevées que la distance inter-électrodes est grande.

Les mécanismes de rupture diélectrique sont extrêmement complexes, ils dépendent de la forme de la tension appliquée (principalement la vitesse de croissance et de l'amplitude ainsi que la polarité), mais les contraintes électriques ne sauraient pas elles les seules qui déterminent les caractéristiques constructives des isolations auto-régénératrices, qui sont soumises à des contraintes climatiques variées. Lorsque l'isolant est un gaz, la température et la pression en modifiant la densité du gaz, influent sur les performances de l'isolation.

Ce mémoire est organisé de la manière suivante :

- Dans la première partie, nous traitons les concepts de base concernant la rigidité diélectrique et les mécanismes de décharge disruptive dans les intervalles d'air pointe plan.
- Dans la deuxième partie, nous essayons de présenter les différents types de tensions et une présentation générale sur choc de foudre.
- Dans la dernière partie, nous présentons les techniques de simulation de la tension impulsionnelle et la rigidité des intervalles pointe-plan, et nous terminons notre mémoire par une conclusion générale.

I. LA RIGIDITE DIELECTRIQUE DES INTERVALLES D'AIR POINTE-PLAN

I.1 Introduction

La compréhension des mécanismes de rupture diélectrique des intervalles d'air est extrêmement importante, ces mécanismes dépendent énormément en premier lieu de la géométrie de l'intervalle, de la forme de la tension appliquée ainsi que des conditions climatiques variées. Dans cette étude, on se limite à l'étude de la géométrie pointé-plan en prenant en considération la nature électro-géologique de la terre.

I.2 Rigidité diélectrique de l'air

L'air est l'isolant le plus utilisé en Technique de la Haute Tension (lignes et postes). En l'absence de champ électrique, les molécules de gaz sont soumises à l'agitation thermique, et subissent une multitude de chocs. Ces chocs peuvent être élastiques, sans transfert d'énergie de la particule bombardant vers la particule bombardée, ou parfois non élastiques, avec transfert total ou partiel d'énergie. Ces chocs ont pour cause des agents extérieurs tels que la radioactivité terrestre et atmosphérique, ainsi que les différents rayonnements cosmiques. En présence d'un champ électrique, les molécules de gaz se mettent en mouvement dans la direction du champ. Leur vitesse variera en fonction de la distribution et de l'intensité du champ, ainsi que d'autres paramètres tels que la pression, la température et l'humidité du gaz.

Les mécanismes de décharge disruptive dans l'air sont principalement:

- ❖ Le mécanisme de Townsend
- ❖ Le mécanisme des canaux (streamers). [1]

I.3 Géométrie de l'intervalle

La géométrie de l'intervalle étudié joue un rôle prépondérant dans la mesure où c'est elle qui détermine, compte tenu d'une différence de potentiel donnée appliquée entre les deux électrodes, l'amplitude, l'orientation et la variation spatiale du champ électrique.

Comme les problèmes industriels relatifs aux hautes tensions sont généralement des problèmes de tenue diélectrique, nous nous intéresserons au type de géométrie présentant les plus faibles performances de tenue diélectrique c'est à dire menant le plus facilement au claquage de l'intervalle : la géométrie pointe - plan.

Ce type de géométrie présente certains avantages :

- Sa symétrie de révolution autour de l'axe de l'intervalle
- La simplicité de sa caractérisation qui ne nécessite que deux paramètres : le rayon de courbure de la pointe R_p et la distance pointe - plan D .

- La facilité de son étude, car la décharge ne concerne qu'une seule électrode durant la plupart du développement du leader. En effet, la cathode plane permet d'éviter des décharges issues d'anode qui viendraient masquer le processus étudié. [2]

I.4 Type de l'intervalle d'air

Les caractéristiques électriques des décharges dépendent fortement de la géométrie des électrodes. On classe celle-ci en trois familles qui induisent des comportements électriques et des applications différentes. [3]

I.4.1. Intervalle d'air pointe-pointe

L'utilisation de pointes métalliques pour l'étude des décharges est assez courante. Cela est dû à l'effet de pointe, qui permet d'obtenir localement un champ intense (au niveau des pointes et des angles métalliques). Ce champ intense favorise le claquage électrique des gaz, C'est pour cela que l'on utilise des pointes comme paratonnerre et que la machine de Watson était équipée d'une pointe...

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

I.4.2. Intervalle d'air plan-plan

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

Dans la plupart des cas, on utilise des électrodes qui sont recouvertes d'une couche de diélectrique côté décharge. Avec ce type de dispositif, il est beaucoup plus facile d'obtenir une décharge homogène sur tout le plan. Ce type de décharge met en jeu des tensions importantes (dizaine(s) de kV) et des courants relativement faibles (quelques centaines de mA pour des sections de l'ordre de 10 cm²). On utilise ces décharges à barrière diélectrique, entre autre, pour la production d'ozone [4] .

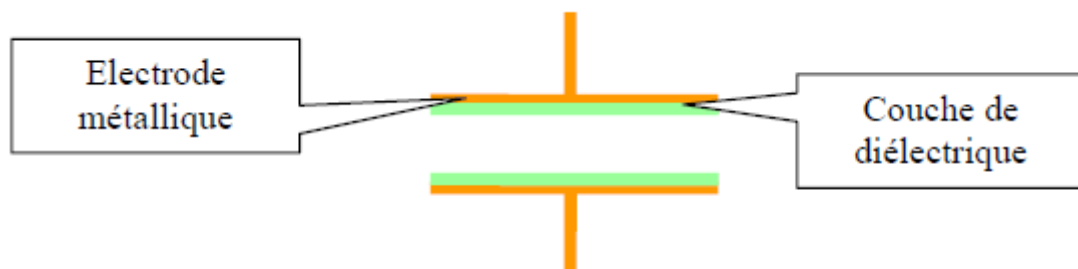


Figure I.1 - Electrode de décharge à barrière diélectrique (DBD) [3]

I.4.3. Intervalle d'air pointe-plan

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

- Arc transféré: un arc transféré est un arc pointe-plan utilisé couramment pour la soudure. La pointe est l'électrode utilisée par le soudeur et le plan est la plaque de métal à souder. Il arrive qu'on utilise un gaz sous pression pour protéger la zone de soudage (protection contre les oxydations) mais cela ne change pas fondamentalement le trajet de l'arc qui va naturellement d'une électrode à l'autre.[3]

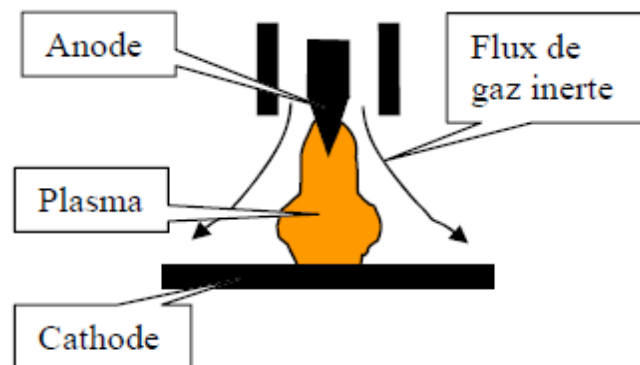


Figure II.2 - Arc transféré [3]

- Arc non transféré : la pointe de cet arc est le centre du dispositif et le plan est le tube qui entoure la pointe (cathode le plus souvent). La différence essentielle avec l'arc précédent est que celui-ci est soufflé par un flux de gaz (gaz plasmagène), ce qui crée un arc projeté (jet de plasma) ; c'est une torche à plasma. La plupart du temps, on se sert de ce type de dispositif pour réaliser des dépôts de métaux sur différents matériaux.[5]

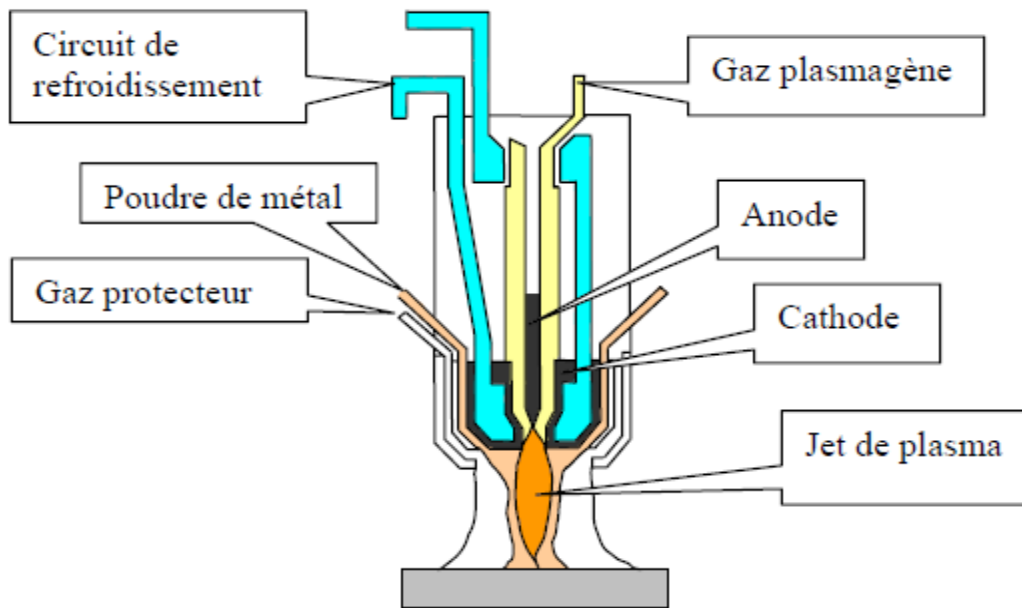


Figure II.3 - Arc non transféré (torche à plasma) [3]

- Décharge glissante : dans certains cas, on cherche à faire glisser l'arc en le soufflant le long d'une des électrodes, dans une configuration géométrique de décharge plan-plan ou pointe-plan. Ce sont des dispositifs à arc glissant, généralement caractérisés par un courant de faible intensité ; l'allongement de la longueur de l'arc qui résulte du soufflage peut conduire à des tensions élevées relativement à celles qui seraient obtenues sans soufflage. [6]

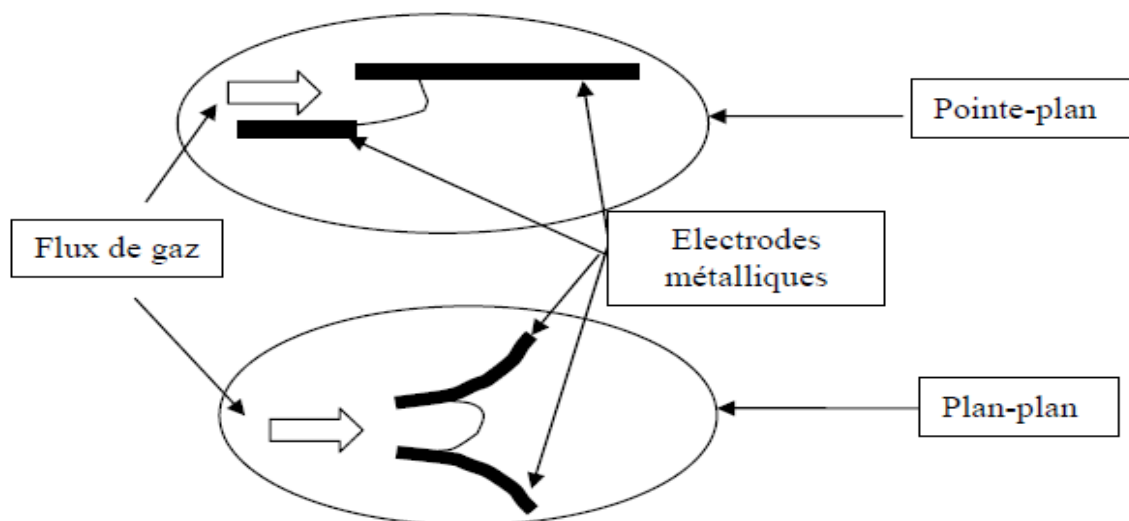


Figure II.4–Décharges glissantes[3]

I.5 Rappels des différents régimes de décharge en pointe-Plan

II.5.1. Champ électrique et topographie de la décharge en géométrie pointe-plan

La dissymétrie des électrodes entraîne le non homogénéité du champ électrique. Parmi les configurations les plus étudiées, nous retrouvons les configurations pointe-plan. La distribution spatiale du champ électrique est donnée en géométrie pointe hyperbolique-plan (Figure II.17) par la relation suivante :

$$E(Z) = \frac{V}{\left(Z + \frac{r}{2}\right) \ln\left(\frac{2d+r}{r}\right)}$$

Tel que :

$E(z)$: champ électrique (V/m).

V : tension appliquée à la pointe (V).

z : distance à la pointe sur l'axe pointe-plan (m).

r : rayon de courbure de la pointe à son extrémité (m).

d : distance inter électrodes (m).

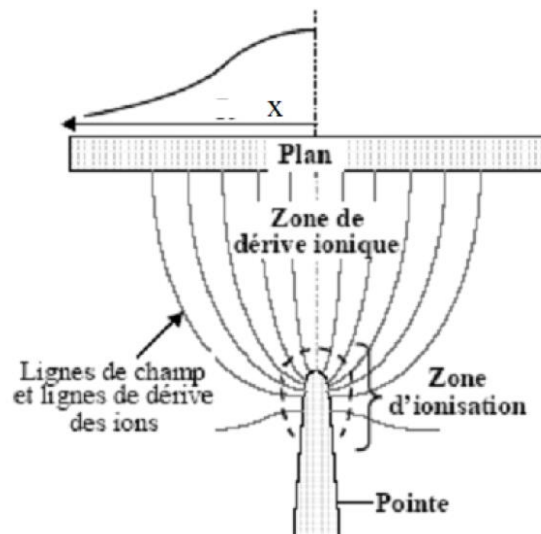


Figure II.17: Topographie de la décharge couronne en configuration pointe-Plan. [21]

Ce champ E_x axial peut être calculé en utilisant l'approximation hyperboloïdale, l'électrode pointe étant assimilée à un hyperboloïde de révolution

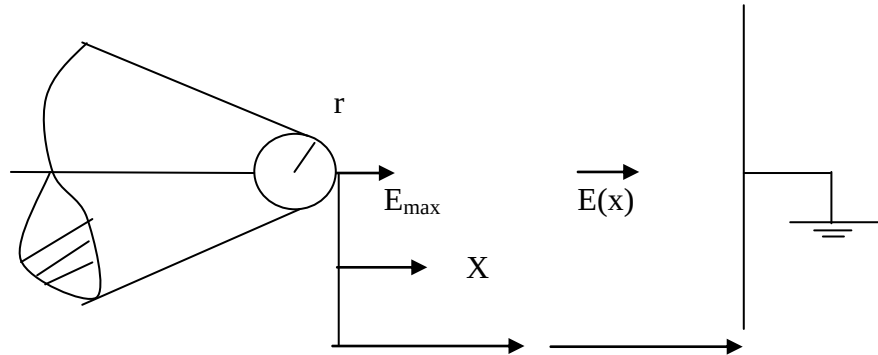


Figure II.18.- Système d'électrodes pointe –plan [21]

Dans le cas d'une géométrie pointe active permet l'ionisation du gaz. Les ions présents dans cette zone peuvent être positifs ou négatifs. Au-delà de cette région se trouve une zone de dérive ionique où le champ électrique est trop faible pour permettre les réactions d'ionisation. Des ions négatifs sont alors formés par attachement électronique. Ils sont ensuite entraînés le long des lignes de champ et réagissent avec les molécules rencontrées. A l'interface entre la zone d'ionisation et la zone de dérive ionique, la consommation d'électrons par attachement électronique égale leur libération par impact électronique.

On va rappeler ici la succession des régimes de pré-décharge qui apparaissent entre une pointe et un plan, dans l'air à la pression atmosphérique pour des petites distances inter-électrodes. [21][22]

I.5.2 Effet de couronne

Le terme effet couronne englobe l'ensemble des phénomènes se produisant dans un milieu gazeux au voisinage d'un conducteur de faible rayon de courbure, porté à une tension suffisamment élevée pour que le champ électrique soit supérieur au champ disruptif de ce gaz. Ce type de décharge ne nécessite aucune source d'ionisation externe pour se développer. C'est une décharge autonome qui, pourtant, nécessite un électron germe pour l'amorcer μ .

La décharge couronne se manifeste dans plusieurs configurations d'électrodes (Figure II.19). ce phénomène est d'une grande importance dans l'ingénierie en HT où les champs électriques sont inévitables. Il est responsable des pertes dans les lignes de transport d'énergie et conduit souvent à la détérioration de l'isolation sous l'action combinée de la décharge et des composants chimiques qu'elle produit. Ainsi la décharge couronne présente des aspects utiles (traitement de surface, précipitateurs électrostatiques, destruction des polluants par générateurs d'ozone..etc.) et des aspect nuisibles (pertes de puissance dans les lignes de transport d'énergie, défaut d'isolation, perturbations radioélectriques.., etc).L'effet couronne se manifeste par l'apparition d'effluves Lumineux entourant le conducteur HT et l'apparition d'un crépitement audible. [23][24.]

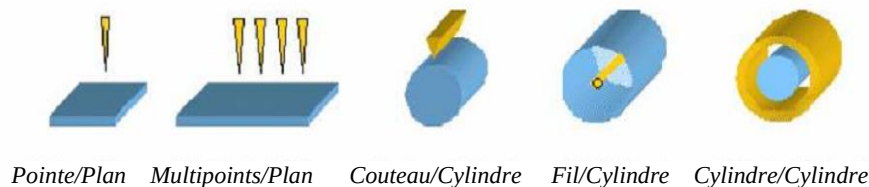


Figure II.19–Systèmes d'électrodes couramment utilisés pour la production de la décharge couronne [23] [24]

I.6 Décharges dans les gaz

La décharge est produite dans un gaz au moment où le champ électrique dépasse la valeur seuil nécessaire à l'amorçage de la décharge. Les mécanismes de décharge connus dans un gaz sont :

- 1- Mécanisme d'avalanche électronique.
- 2- Streamer.

I.6.1.Tenue diélectrique de l'air en champ uniforme

La tenue diélectrique de l'air est d'environ 30 kV/cm à pression atmosphérique. Le tableau II.1 [8] donne la rigidité diélectrique de quelques gaz en comparaison avec l'air sous champ uniforme à pression atmosphérique pour une distance inter électrode $ds = 1 \text{ cm}$.

Symbole	Masse (g)	Masse volumique à 0 C° (kg/m^3)	Température de fusion (C°)	Température d'ébullition (C°)	Conductivité thermique à 0 C° (en $10^{-3} \text{W}/\text{m.k}$)	Rigidité diélectrique
Air	28.96	1.292 9			23.547	1
O_2	31.999	1.429	-218.4	-182.962	23.965	0.91
CO_2	44	1.977	-56.6 (5.2bar)	-78.6	14.101	0.75
N_2	28.013	1.251	-203.8	-195.8	23.530	1
H_2	2.016	0.0899	-259.14	-252.8	169.565	0.45
He	4	0.178 5	-272.2	-268.9	139.63	0.14
Ar	39.948	1.784	-189.2	-185.7	16.27	0.27

Tableau II.1 - Rigidité diélectrique relative de quelques gaz par rapport à l'air dans un champ uniforme [8]

La rigidité diélectrique dans les conditions réelles dépend de plusieurs paramètres :

- La densité de l'air c'est-à-dire la pression et la température. Dans un champ non uniforme, les tensions d'apparition de l'effet couronne et de claquage sont aussi influencées par le taux d'humidité dans l'air. La tenue diélectrique augmente lorsque l'humidité augmente. Cela s'explique par le fait que la vapeur d'eau est capable de capter les électrons libres.

- La polarité des électrodes conditionnant la répartition du champ électrique prenant en considération la présence de charges d'espace. La tension de claquage de l'air est plus élevée en polarité négative qu'en polarité positive alors que c'est l'inverse pour ce qui est des tensions d'apparition de l'effet couronne. L'influence de la polarité est très marquée lorsque le champ électrique est fortement divergent comme dans le cas de l'humidité.

- Les barrières éventuelles introduites dans l'intervalle inter électrodes. L'introduction d'un solide diélectrique dans l'espace inter électrode permet, dans le cas d'un champ divergent, d'améliorer la tenue diélectrique du système. La barrière est d'autant plus efficace qu'elle est proche de l'électrode acérée (c'est-à-dire celle dont le rayon de courbure est le plus faible). La position optimale de la barrière, dans un système d'électrodes pointe – plan, se trouve entre 0 et 20% de la distance inter électrode. La position optimale exacte a été déterminée expérimentalement en fonction de la géométrie des électrodes par A. Beroual [13]. En plus de tous ces paramètres, la tenue de l'air dépend également de la géométrie des électrodes et de la caractéristique $U(t)$ [9].

I.6.1.1 Mécanisme d'avalanche électronique (décharge de Townsend)

Si on considère un gaz contenu entre deux électrodes, il peut exister dans ce gaz, en l'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 en 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 acquerront 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 des électrons et des 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. Le claquage donc lieu du fait du phénomène d'avalanche figure (II.5).

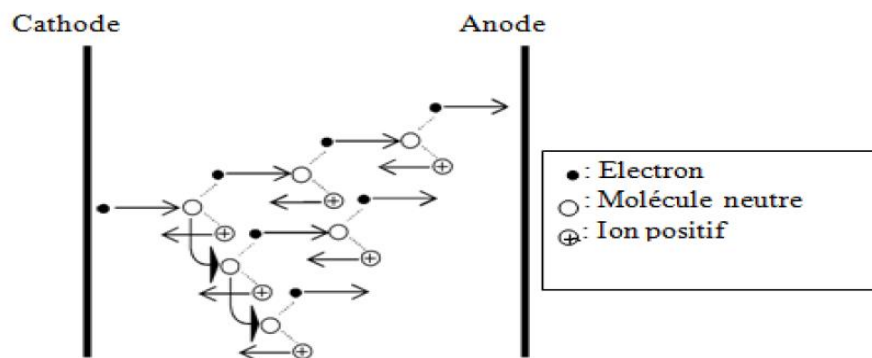


Figure II.5 Schéma de l'avalanche de Townsend.[15]

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

I.6.1.2 Limite du Critère de Townsend

Townsend définit deux coefficients, l'un concernant l'ionisation par choc dans l'air et l'autre l'ionisation superficielle caractérisée par une émission d'électrons à la cathode, après le bombardement de cette dernière par des ions positifs en particulier. Le premier coefficient de Townsend (α) représente le nombre d'électrons libres par unité de longueur dans la direction du champ engendrés par l'ionisation par choc. Le second coefficient de Townsend (γ) représente le rapport du nombre d'électrons libérés de la cathode par émission secondaire sur le nombre d'ions positifs ayant bombardés la cathode.

Dans le mécanisme de Townsend, la décharge disruptive a lieu dès la formation d'avalanches électroniques provoquées par les électrons quittant la cathode. Le critère de décharge autonome de Townsend s'écrit comme suit:

$$\gamma(e^{(\alpha-a)} - 1) = 1$$

Le critère de claquage selon Townsend est alors défini comme la tension pour laquelle le courant devient infini [10].

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

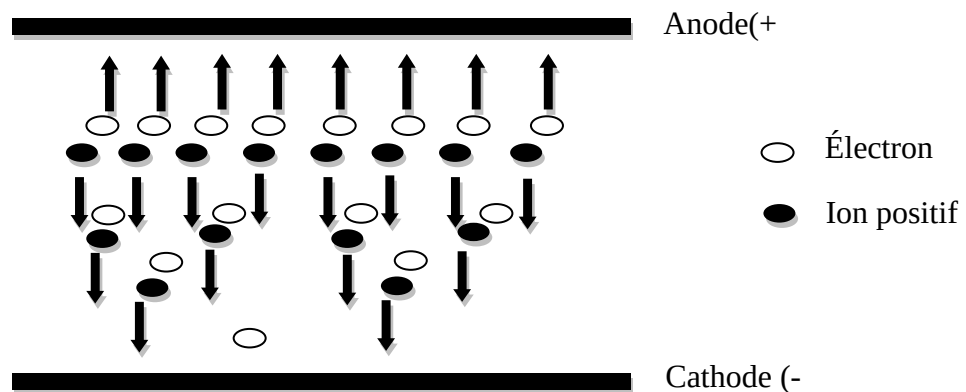


Figure II.6 Avalanche électronique [11]

I.6.2 Mécanisme des canaux (streamers)

La vitesse des électrons étant environ 100 fois supérieure à celle des ions c'est bien quel 'avalanche conduite à la formation d'une structure dipolaire comme le montre la figure (II.7).

- Une région (vers l'anode) à forte densité d'électrons
- Une région (vers la cathode) à forte densité d'ions positifs.

Le champ électrique est alors fortement perturbé par ces charges d'espace.

Si ces densités sont importantes un nouveau mécanisme est déclenché: le streamer [12].

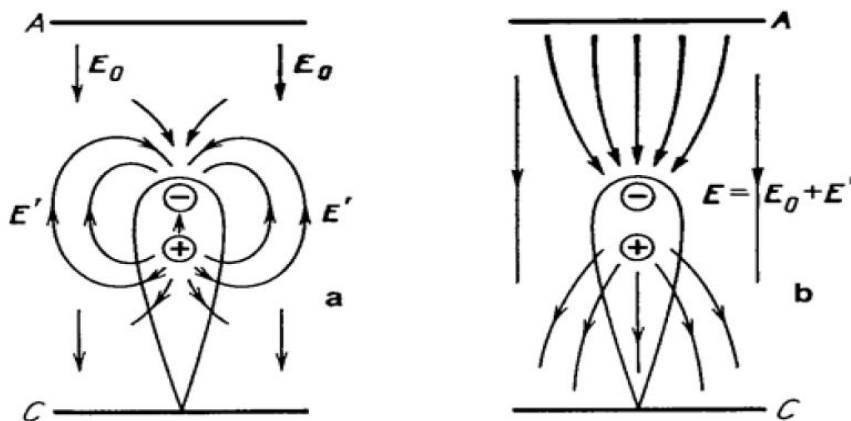


Figure II.7 Schéma d'une avalanche électronique.[15]

En la direction de la cathode, le champ électrique est augmenté par la charge d'espace positive. Dans cette région de nombreux électrons sont créés (par photo-ionisation) et de nouvelles avalanches dites "secondaires" se développent en direction de la première (l'avalanche principale). Les électrons de ces avalanches viennent neutraliser la charge d'espace positive figure (II.8).

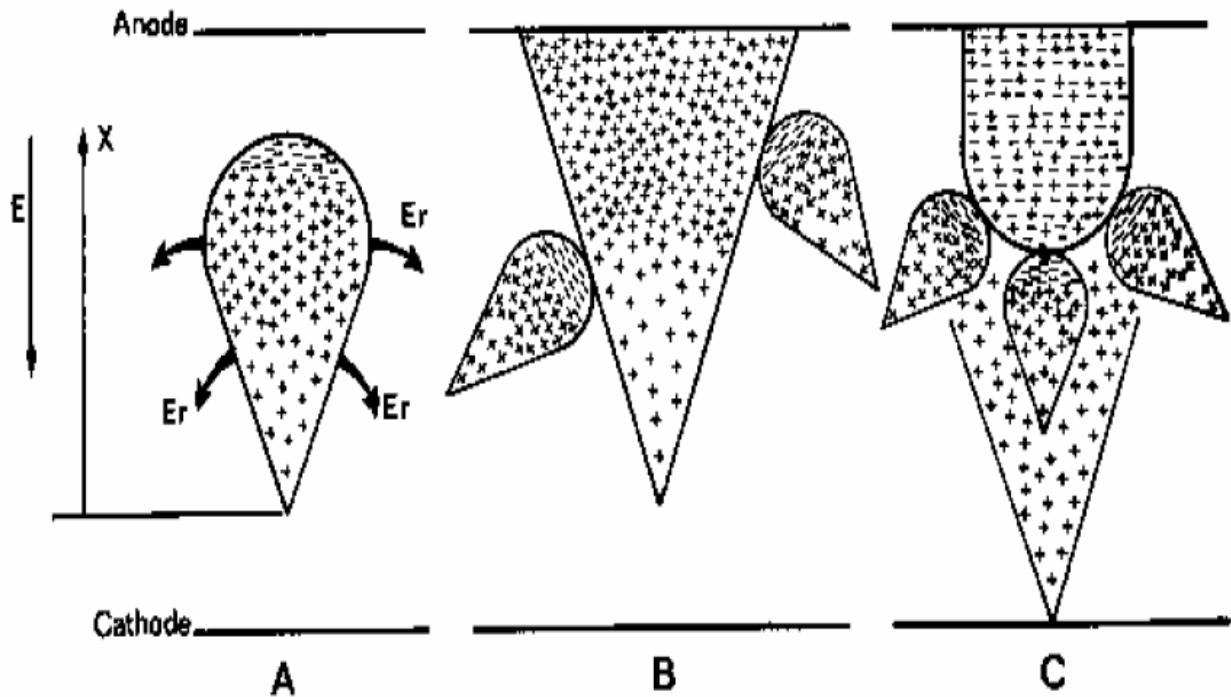


Figure II.8 Etapes successives de développement du streamer positif [12].

E_r : champ décharge d'espace.

De l'endroit où naissent les avalanches secondaires, de nouvelles "têtes" de charges d'espace positives apparaissent augmentant le champ électrique en aval. Le déclenchement de nouvelles avalanches est encore favorisé vers la cathode [12].

Ainsi le streamer consiste en:

- Une région ionisée, légèrement conductrice (5kV/cm) composée d'ions positifs et d'électrons
- Une région "active" composée d'ions positifs qui favorisent les développements d'avalanches électroniques secondaires.

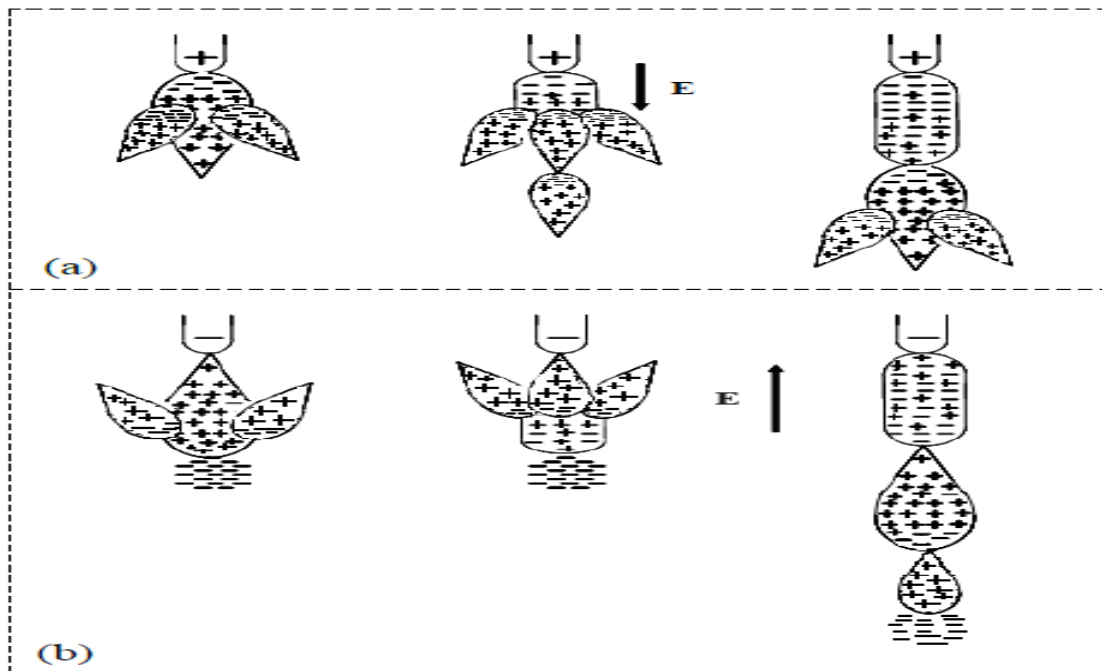
La taille critique de l'avalanche qui donne naissance au streamer est définie par plusieurs critères:

* **Critère de Meek:** l'avalanche peut se transformer en streamer si le champ de charge d'espace E_r des ions positifs est sensiblement égal au champ appliqué E_g .

$$E_r = K \cdot E_g \quad K \approx 1$$

Bon accord pour des valeurs de $p \cdot d$ de l'ordre de 10 000 torr.cm.

* Critère de *Raether*: l'avalanche peut se transformer en streamer si le nombre de charges de l'avalanche principal atteint 10⁸ à 10¹⁰ électrons. Critère énoncé pour une pression atmosphérique.



(a) pointe positive ;

(b) pointe négative [13]

Figure II.9 - Etapes successives de développement d'un streamer dans un gaz en configuration d'électrodes pointe - plan :

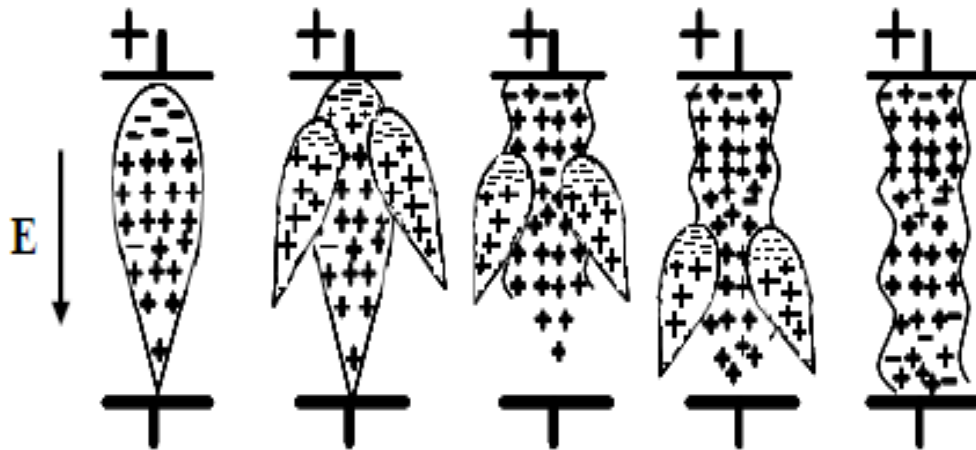
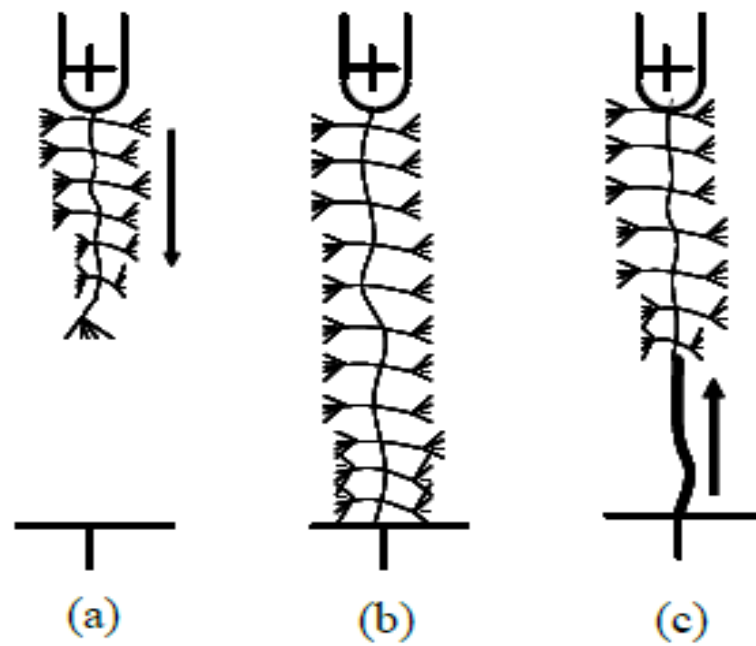


Figure II.10 - Etapes de développement d'un streamer positif en champ uniforme [13]



**Figure II.11 - Schéma du développement de décharges dans un système d'électrodes pointe – Plan avec une pointe positive : (a) streamer ; (b) leader ; (c) décharge principale.
La flèche représente le sens de développement des différents stades de la décharge [13]**

II. ETUDE DES DIFFERENTS TYPES DE TENSIONS

II.1 Introduction

Les mécanismes de rupture diélectrique sont extrêmement complexes, ils dépendent de la forme de la tension appliquée (principalement la vitesse de croissance et de l'amplitude ainsi que la polarité) mais les contraintes électriques ne sont pas les seules qui déterminent les caractéristiques constructives des isolations auto-régénératrices, qui sont soumises à des contraintes climatiques variées. Lorsque l'isolant est un gaz, la température et la pression en modifiant la densité du gaz, influent sur les performances de l'isolation. Il est utile de noter que les résultats des travaux effectués sur l'étude de la rigidité des intervalles d'air tige-plan à L'ENP ont montré que les propriétés électro-géologiques du sol ont une grande influence sur la valeur de la tension $U_{100\%}$ [1].

II.2 Influence du type de tension

La rigidité diélectrique dépend de l'amplitude et de la forme de la tension appliquée aux électrodes. Dans le cas des petits intervalles d'air (inférieurs à 1m), beaucoup de travaux de recherches ont été effectués aussi bien sous tension continue, que sous tension alternative ou de choc de foudre. En ce qui concerne les longs intervalles d'air, les travaux ont été surtout effectués sous la contrainte de tension la plus défavorable, représentée par les chocs positifs de manœuvres à durée de front relativement longue

II.3 Tension continue

II.3.1.Polarité positive

Les phénomènes qui apparaissent en champ non uniforme (pointe - plan, fil - plan, fil - cylindre ...) dépendent de la nature et de la pression du gaz, de la forme, de la polarité et du temps d'application de la tension.

Dans un intervalle d'air pointe - plan à pression atmosphérique, différents phénomènes répétitifs peuvent être observés selon la valeur de la tension (figure II.12)

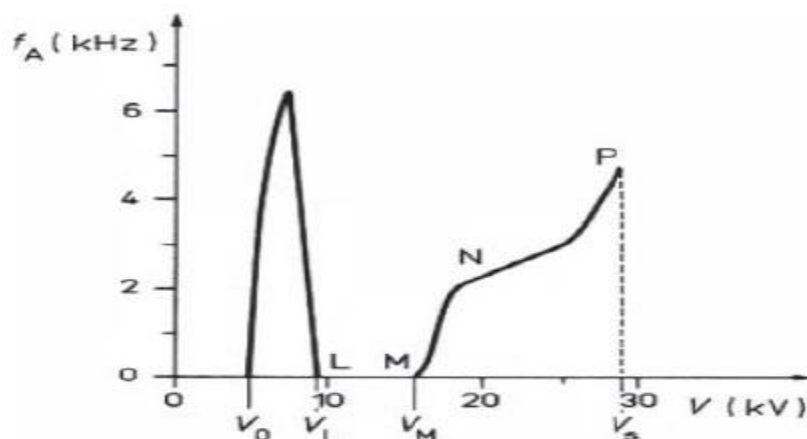


Figure II.12 - Fréquence d'apparition des streamers dans l'air en fonction de la tension appliquée V
Dans un système d'électrodes pointe – plan, en polarité positive : $d = 31$ mm -Rayon de la pointe = 0,17 mm [14]

On distingue trois régimes entre le seuil V_S de l'apparition de l'effet couronne et la tension de claquage V_S

- Entre V_0 et V_L , on observe des impulsions (*burst pulses*) qui se manifestent au niveau de la pointe et dont le courant est faible (de l'ordre du microampère) ; à ces impulsions s'ajoutent des dards préliminaires (*preonset streamers*) qui s'étendent assez loin de la pointe ;
- Entre V_L et V_M , apparaît un régime parfaitement stabilisé dans lequel subsiste un courant continu, sans aucune impulsion ; cette région est appelée zone d'Hermstein .
- Au-delà de V_M , de nouvelles impulsions régulières apparaissent avec des dards qui soit disparaissent avant d'atteindre la cathode (dards prédisruptifs ou *prebreakdown streamers*, zone MN), soit traversent tout l'espace inter électrodes (dards disruptifs ou *breakdown streamers*, zone NP). Le courant continu de la zone d'Hermstein se manifeste par une décharge lumineuse entourant l'électrode. Si l'on change le rayon de courbure de la pointe ainsi que la distance inter électrodes, les différentes zones que l'on vient d'indiquer peuvent être absentes ou apparaître dans un ordre différent. Par exemple,

la totalité des phénomènes de pré-décharge ne se produit qu'à partir d'une distance inter électrodes de 30 cm quand le rayon de la pointe est de 1 cm . Cette distance décroît quand le rayon de l'anode diminue.

L'humidité ne joue un rôle important que lorsqu'il existe des phénomènes de pré-décharge. Si le claquage se produit après les dards pré-disruptifs, l'humidité entraîne une augmentation de la tension disruptive; si le claquage intervient après la décharge lumineuse, la tension est abaissée

- Dans l'hexafluorure de soufre, les phénomènes observés sont globalement similaires à ceux observés dans l'air sec, excepté le fait que la pression pour laquelle ils apparaissent est plus faible dans le SF_6

- Dans d'autres gaz ou mélanges de gaz, selon qu'ils soient plus ou moins électronégatifs, les phénomènes peuvent être similaires à ceux observés dans l'air ou, au contraire, être très différents [14]

II.3.2. Polarité négative

Dans l'air, en géométrie pointe - plan, le courant de décharge est constitué d'un courant continu de faible amplitude sur lequel se superposent des impulsions de Trichel dont la fréquence, très élevée et très régulière, est comprise entre 2 et 50 MHz.

L'aspect visuel de la décharge est essentiellement localisé à la pointe. Lorsque la tension croît, le nombre d'impulsions ainsi que leur amplitude augmentent. Le courant correspondant aux impulsions de Trichel est de l'ordre de 1 mA. La tension de claquage dépend fortement de la distance inter électrodes. Tandis que pour les très faibles distances, la tension de claquage dépend fortement du rayon de courbure de la pointe r alors qu'elle en est indépendante pour les plus grandes distances.

La tension d'amorçage de la décharge lumineuse est, en revanche, indépendante de r quelque soit l'intervalle inter électrodes. Dans l'hexafluorure de soufre, des régimes de décharge sensiblement identiques apparaissent.

Toutefois les impulsions de Trichel sont beaucoup plus irrégulières que dans l'air. Ils dépendent de la nature des électrodes ainsi que du pourcentage de la vapeur d'eau à l'intérieur du gaz [14].

II.4 Tension alternative

Sous tension alternative, les mécanismes conduisant au claquage sont plus complexes qu'en continue ou en impulsion par suite de l'influence des charges d'espace créées dans une alternance donnée sur l'alternance suivante. En général, aux pressions intermédiaires, la tension disruptive la plus basse est celle correspondant au développement de la décharge générée pendant l'alternance positive. Dans l'air à pression atmosphérique et pour une pointe de 5 mm de rayon de courbure, des impulsions de Trichel peuvent apparaître pendant l'alternance négative. L'influence de l'humidité n'est pas très importante durant l'alternance positive.

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

II.5 Tension impulsionnelle

D'une manière générale, l'écart entre la tension de claquage et la tension d'apparition de l'effet couronne est plus grand pour une onde dite lente, que pour une onde courte. Ce phénomène est dû à l'effet stabilisant de la décharge couronne. Cet effet est évidemment plus important quand le temps de montée de l'onde est grand, la charge d'espace ayant plus de temps de se former que dans le cas d'une onde rapide dont la durée est plus faible ou du même ordre de grandeur que le temps de transit des ions. En outre, la tension de claquage d'une onde lente est en général plus basse en polarité positive qu'en polarité négative. L'application d'une impulsion de tension peut conduire, dans certains cas, à une augmentation anormale de la tension disruptive. Par exemple, à partir d'une certaine valeur de la pression, la tension disruptive du mélange SF₆air avec seulement 1% de SF₆ est supérieure à la tension disruptive du SF₆ pur. Cela est d'autant plus surprenant que la tension disruptive du mélange est inférieure à celle du SF₆ pur dans le cas d'une tension continue. L'effet stabilisant de la décharge couronne (plus important dans le mélange que dans le gaz pur) doit à nouveau être évoqué pour expliquer ce phénomène.[14]

II.6.1 Contraintes de tension

Il est impossible de reproduire en laboratoire les formes complexes de surtensions observées ou attendues en réseau ; c'est pourquoi, la plupart des résultats ont été obtenus avec une onde de forme simple, en double exponentielle produite par les générateurs de choc. Si l'on veut étudier les problèmes de claquage de grands intervalles, il faut générer des tensions d'amplitude d'autant plus élevées que D est grand. Le principe des générateurs utilisés (générateur de MARX) est basé sur la charge de condensateurs en parallèle, puis de leur décharge en série à travers des résistances. La tension délivrée est caractérisée par deux paramètres :

- La durée conventionnelle de front $T_1 = 1.67(T_{90} - T_{60})$
- La durée de queue à mi - amplitude T_2

Où T_{90} est le temps au bout duquel l'impulsion atteint 90% de sa valeur crête U_{cr} et T_{30} , celui correspondant à 30% U_{cr} . Chaque forme d'onde est notée $\frac{T_1}{T_2}$, les deux temps étant exprimés en μs [15]

II.6 Chocs de foudre

La foudre est un phénomène naturel de décharge électrostatique disruptive qui se produit lorsque de l'électricité statique s'accumule entre des nuages d'orage, ou entre un tel nuage et la terre. La différence de potentiel électrique entre les deux points peut aller de 10 à 20 millions de volts et produit un plasma lors de la décharge, causant une expansion explosive de l'air par dégagement de chaleur. En se dissipant, ce plasma crée un éclair de lumière et le tonnerre.

La foudre a tendance à frapper de préférence les régions de haute altitude et les objets proéminents par effet de pointe. Le tonnerre peut résonner d'un craquement sec lorsque l'éclair est proche ou gronder au loin. Comme la lumière voyage beaucoup plus vite que le son, l'éclair est visible avant que le tonnerre ne soit audible, ce qui permet d'estimer la distance à laquelle la foudre est tombée.

Elle présente de nombreux dangers : électrocution, déclenchement d'incendie, interférences électromagnétiques nuisibles à l'aviation et à la navigation, etc. C'est pourquoi, plusieurs techniques ont été développées pour la détecter et la canaliser afin de protéger les êtres vivants et les équipements.

II.6.1. Electricité atmosphérique

II.6.2.Par beau temps

II.6.2.1Electrosphère :c'est une couche atmosphérique ionisée. L'électro sphère et la terre forment un gigantesque condensateur terrestre, ou le champ électrique par beau temps dirige du haut vers la terre vaut environ 100 à 120 V/m. Les armatures du condensateur terrestre sont l'électrosphèreet le globe terrestre, entre lesquelles il y a la troposphère et la stratosphère qui constituent le diélectrique, dont l'épaisseur est d'environ 100 km. L'épaisseur du diélectrique formant le condensateur terrestre est d'environ 50 km.

La capacité de ce condensateur sphérique est donnée par:
$$C = 4\pi\epsilon_0 \frac{R_t R_e}{R_e - R_t}$$

Tel que :

$R_t = 6367$ km rayon de la terre

$R_e = (6367 + 100)$ km = 6467 km est le rayon de l'électro sphère.

Dans ce cas, nous trouvons : $C = 46$ mF.

L'air comprend en permanence des charges électriques, positives et négatives, créées par les rayonnements cosmiques ou la radioactivité de la terre. Par beau temps, il en résulte un courant atmosphérique de densité J , tendant à décharger le condensateur.

II.6.3.Par temps nuageux

II.6.3.1Formation du nuage

Le nuage orageux est généralement du type Cumulo-nimbus (forme d'enclume, couleur sombre a la base). Il constitue une gigantesque machine thermique dont la base est à 2 km et le sommet à 14 km d'altitude environ. Sa constitution est rendue possible par l'élévation d'air chaud en provenance du sol. Lors de son ascension, cette masse d'air se charge d'humidité jusqu'à devenir un nuage.

La partie supérieure ou il fait plus froid est occupé par les particules de glace, tandis que les gouttes d'eau s'établissent dans la partie inférieure. Ces dernières se chargent positivement tandis que les gouttes d'eau prennent une charge négative.[15]

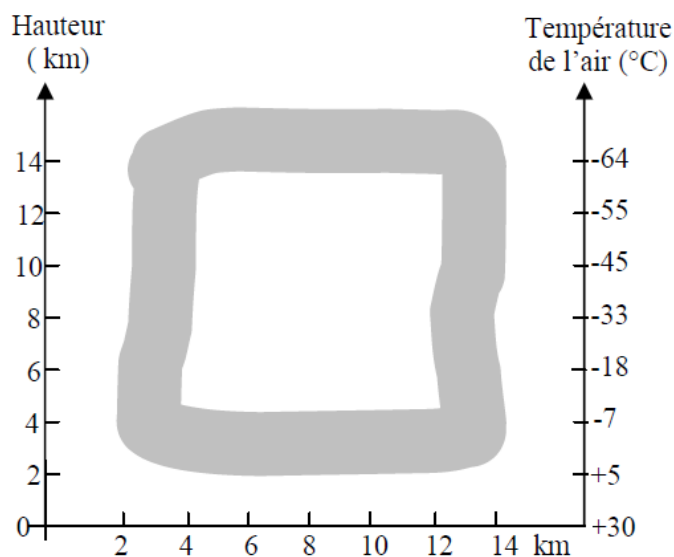


Figure II.13 : Constitution du nuage [15]

II.6.3.2 Formation des charges

Les violents courants d'air ascendants provoquent des collisions entre les gouttes d'eau et les microparticules de glace, ce qui provoque la création des charges électriques par frottement.

II.6.3.3Répartition des charges

Les microparticules de glace plus légères et chargées positivement, sont emportées par le courant d'air ascendant vers le haut, occupent la partie supérieure du nuage et forment le pôle positif. Tandis que les gouttes d'eau chargées négativement s'établissent dans la partie inférieure et créent le pôle négatif. Une petite quantité de charges positives demeurent a la base du nuage.

Le nuage fait apparaître sur la terre, par influence électrique, une charge de signe oppose et crée ainsi deux véritables dipôles électriques:

- Un dipôle interne, génère entre les pôles positif et négatif du nuage: si le champ interne E_{int} devient suffisamment grand, il provoque un claquage interne dans le nuage $\Rightarrow$ ECLAIR.

- Un dipôle externe, entre la base nuage et la surface de la terre: si le champ externe E_{ext} atteint les conditions critiques, il finit par provoquer une grande décharge entre le nuage et la terre $\Rightarrow$ FOUDRE. [15]

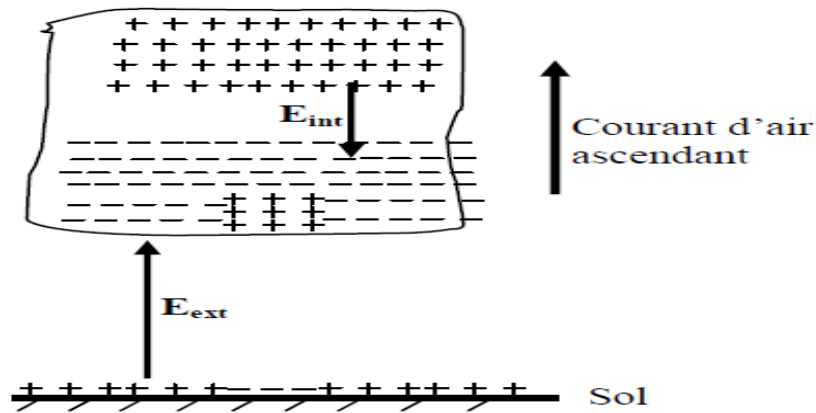


Figure II.14 : Nuage fait apparaître sur la terre, par influence électrique [15]

II.6.4. Classification et description des coups de foudre

II.6.4.1 Classification des coups de foudre

Sous l'effet des charges électriques d'un nuage orageux et au cours de leur formation, le champ électrique au sol et à l'intérieur du nuage varie considérablement. Lorsqu'il atteint la valeur limite de claquage, il y a une décharge électrique, qui se répartit en trois types principaux [16] [17].

La première phase d'un coup de foudre commence par le développement d'un pré-décharge peu lumineuse ou traceur soit à partir de la base du nuage ou à partir du sol. On assiste après à l'amorçage d'un arc empruntant le canal ionisé du pré-décharge.

On définit quatre grandes catégories de coup de foudre, en fonction de la polarité de la base de nuage déchargé, positive ou négative et en fonction du sens de propagation du traceur ascendant ou descendant (Fig. II. 15)

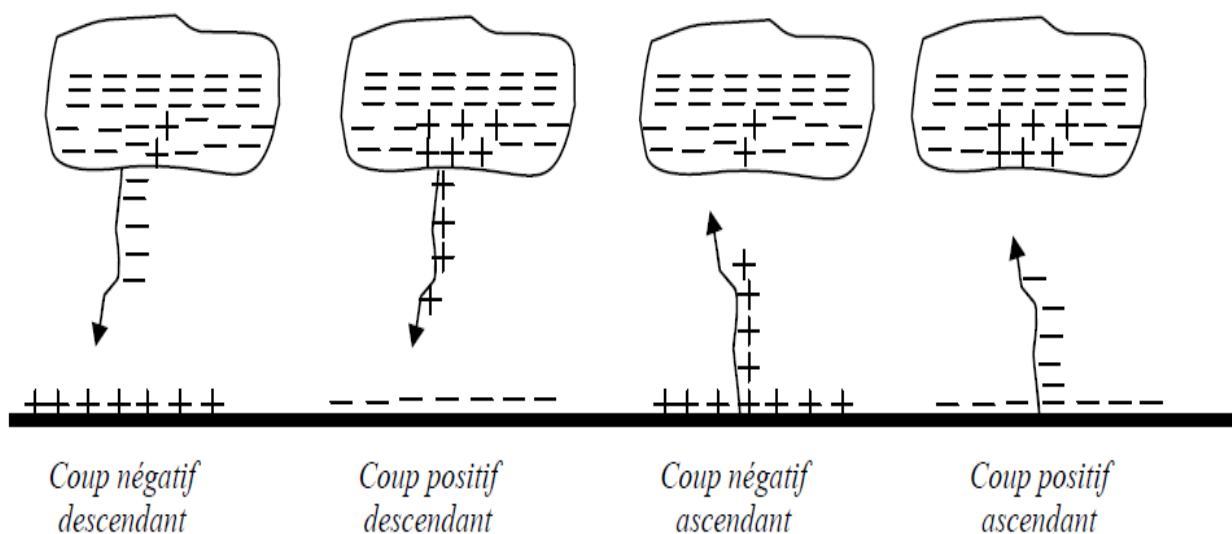


Figure II.15 - Représentation schématique des différents coups de foudre [15]

Remarque : Dans les régions à climat tempère, il a été observé que 80 à 90 % des coups de foudre sont de type négatif descendant, mais les plus énergétiques sont les positifs. En montagne ou en présence d'une proéminence, des coups négatifs ascendants peuvent se développer. Dans les pays plats, les coups de foudre les plus fréquents sont les descendants négatifs. Pour qu'il y ait un coup de foudre ascendant, il faut la présence d'une proéminence importante, telle qu'une tour élevée.[15]

II.6.5. Déroulement d'un coup de foudre

II.6.5.1 Coup de foudre ascendant

Les coups de foudres ascendants sont généralement produits dans des endroits d'importantes prééminences, où les effluves d'effet couronne apparaissent au sommet des aspérités. Ces effluves se développeraient d'autant plus loin et avec plus d'intensité que la dimension de la prééminence est importante.

A partir d'une certaine intensité d'effluves, le phénomène se modifie brusquement et peut se développer plus loin pour atteindre le nuage, c'est le coup de foudre ascendant. Ceci est fréquemment observé à partir des tours dont la hauteur dépasse 300m, et à partir des gratte-ciels.

La chronologie des évènements pour le cas le plus fréquent (ascendant positif) est la suivante:

Aux premiers temps on observe l'apparition de filaments couronnes issus d'un tronc ionisé commun, qui est l'amorce d'un traceur. A partir d'une certaine valeur du champ électrique, ce traceur se développe brusquement en direction du nuage avec une vitesse moyenne de 2 à $6 \cdot 10^4$ m/s[18].

Au cours de cette progression, le traceur se ramifie plusieurs fois, et on assiste à la formation d'une arborescence. Au moment où ces ramifications lèchent la base de nuage, il s'établit une décharge, dont la durée peut atteindre la seconde, et qui écoule des courants de l'ordre du millier d'ampères [16].

II.6.5.2 Coup de foudre descendant

L'inverse du traceur positif, le traceur d'un coup de foudre descendant négatif [19] [16] se développe en progressant vers la terre par bonds successifs de 50 à 100m (Stepped leader). Entre les bonds, on observe des temps d'arrêt de l'ordre de 40 à 100 ms, avec une vitesse de progression moyenne de 0,15 à 0,20 m/ms (deux fois plus grande que celle du traceur ascendant positif). Dès que la pointe du traceur se rapproche du sol, des prés décharges ascendantes se développent généralement depuis un arbre, une salie, en direction du traceur descendant, alors qu'elles n'existaient auparavant que sous forme d'effluves d'effet couronne localisées.

Lorsque l'une de ces pré décharges et le traceur par bonds se rejoignent, il s'établit un court-circuit entre le nuage et le sol, qui va permettre le passage d'un courant de forte intensité, neutralisant les charges de ce dernier ; on observe alors un trait fortement lumineux qui progresse depuis le sol jusqu'au nuage avec une vitesse estimée à 108 m/s. C'est l'arc de retour ou « return stroke ».

Lorsque la première décharge cesse de s'écouler, il peut se passer 100 ms avant qu'une seconde décharge n'apparaisse. Cette seconde décharge commence par l'apparition d'un traceur (d'Art leader) qui progresse d'une façon continue (contrairement au stepped leader) en suivant le même chemin établi par le stepped leader dont la vitesse de propagation est de l'ordre de 106 m/s et plusieurs décharges successives peuvent ainsi avoir lieu selon ce type de mécanisme. La figure (II.16) montre l'évolution temporelle d'un coup de foudre descendant négatif.

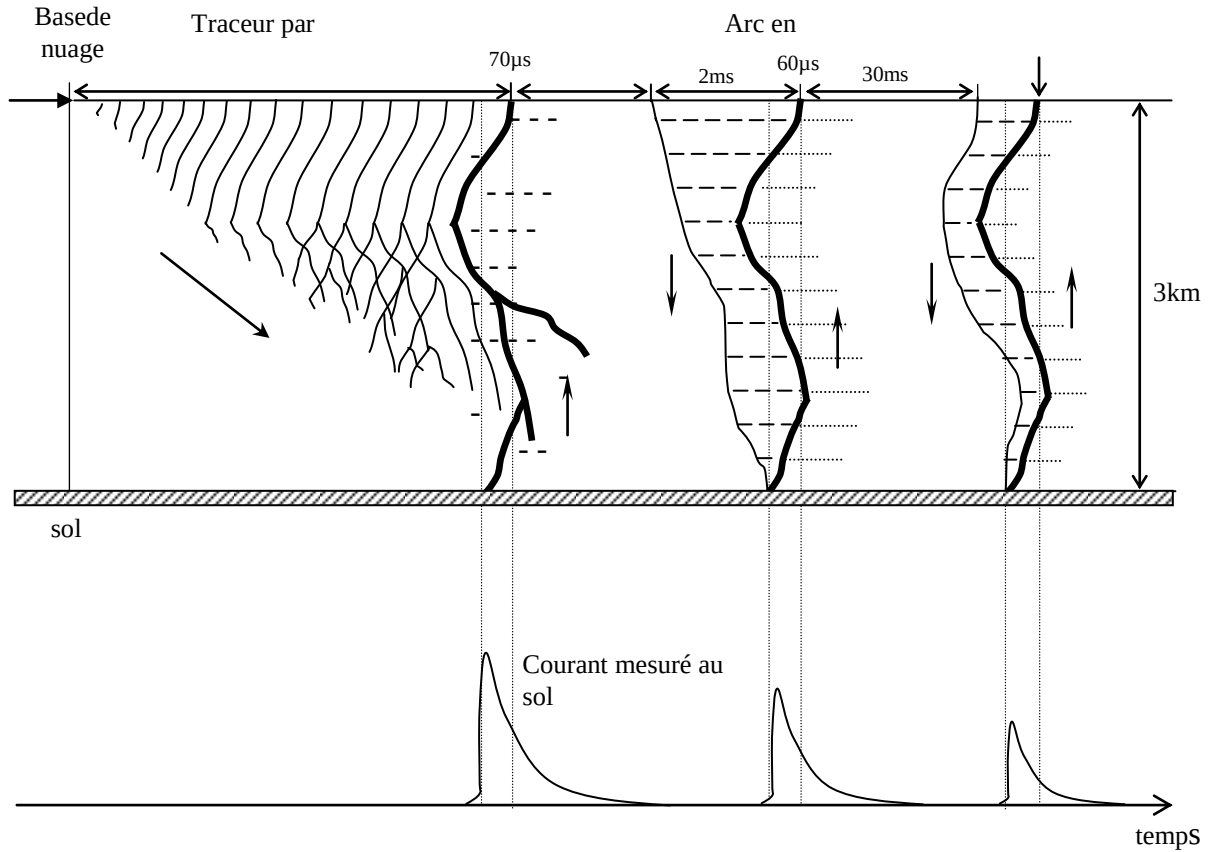


Figure II.16 -Evolution spatio-temporel d'un coup descendant et courant mesuré à la surface de la terre [19]

II.8 Conclusion

Dans ce mémoire, nous avons exposé les concepts de base concernant la rigidité diélectrique des intervalles d'air pointe-plan ainsi que les mécanismes de rupture dans les gaz en particulier l'air qui représente l'isolant le plus utilisé. La reproduction des tensions appliquées : continue, alternative et impulsionnelle de type choc de foudre sur des modèles réduits a permis d'étudier les différents facteurs d'influence comme la nature de la terre et la conductivité. Cette étude permet une meilleure connaissance des intervalles d'air pointe-plan dans le but d'une meilleure conception des systèmes d'isolation.

Particulièrement dans le cas de la foudre, la connaissance des tensions disruptives, permet à l'homme de réaliser une meilleure protection contre ce phénomène météorologique, par l'utilisation des Paratonnerres, cage de Faraday et autres dispositifs permettent de limiter les dégâts à grande échelle.

III TECHNIQUES DE SIMULATION DE LA TENSION ET ETUDE DE LA RIGIDITE DES INTERVALLES POINTE-PLAN.

III.1 Introduction

L'étude de la nature de la terre sur la rigidité diélectrique des intervalles d'air pointe-plan représente un intérêt majeur dans la conception et la coordination de l'isolement. Pour cela, des nombreux travaux ont été réalisés pour mettre en évidence l'influence de l'homogénéité du sol sur les tensions disruptives des petits intervalles d'air tige-plan, sous l'onde de choc de foudre [26] ces travaux ont utilisé des modèles expérimentaux ou modèles réduits qui simulent la terre avec sa nature ainsi que le choc de foudre pendant le saut final.

La notion d'hétérogénéité du sol est employée ici du point de vue « résistivité » ou « conductivité » du sol.

III.2 Etude du générateur de choc (type Marx)

III.2.1. Principe de fonctionnement

Dans le but d'obtenir une grande tension de crête, le générateur d'impulsions en un seul étage présente plusieurs inconvénients à savoir ;

- La taille des éléments de circuit devient très grande.
- Nécessité de grande tension continue de charge.
- La suppression de décharges de couronne autour des éléments et des conducteurs devient très difficile.
- La fermeture des circuits par les éclateurs à sphères devient très complexe.

En 1923, **E. Marx** a inventé un générateur à plusieurs étages ou Générateur de Marx qui devient par la suite le principal appareil d'un laboratoire à très haute tension.

A l'aide du schéma de la figure (III.1), montrons en quelques mots comment fonctionne un générateur de choc. Cet appareil comporte en premier lieu une série de condensateurs, montés en colonne verticale, qui peuvent être chargés en parallèle par une source de tension continue. Ces condensateurs sont reliés les uns aux autres par des résistances dites de décharge (à gauche sur le schéma), de sorte que toutes les bornes de gauche vont être connectées à la sortie de la source, les bornes de droite seront bien évidemment connectées à la sortie négative par l'intermédiaire des résistances R_q du schéma.

Entre le (+) de l'un des condensateurs et le (-) du condensateur suivant se trouvent des petits éclateurs à sphères, ils sont constitués essentiellement par deux électrodes dans l'air, qui sont réglés pour amorcer une étincelle, à partir d'une certaine valeur, que l'on peut faire varier, de la tension de charge.

Lorsque la charge des condensateurs a atteint cette valeur critique, tous ces éclateurs amorcent simultanément et créent un chemin conducteur qui va mettre tous les condensateurs en série, de sorte qu'au sommet du générateur, on va trouver la somme des tensions de charge individuelles. Ainsi, si chaque condensateur est chargé à la tension U et s'il y a n étages de condensateurs, on obtiendra au sommet de la colonne une tension égale à (nU) .

A cet instant, chaque condensateur va se décharger à travers sa résistance associée R_q , et il en résulte une décroissance à loi exponentielle de la tension, avec une constante de temps fixée par le produit $(R_q C)$. Pour cette raison, on appelle ces résistances les "résistances de queue". Mais pour générer les formes de tensions de choc souhaitées, il faut aussi créer un front de montée [25].

A cet effet, on charge un condensateur C_f , que l'on appelle "Condensateur de front", à travers une résistance R_f : on obtient alors une charge exponentielle du condensateur C_f qui se superpose à la décharge des condensateurs principaux [25]. Dans le schéma de la figure (III.1), nous avons représenté par souci de clarté une seule résistance de front, mais dans les générateurs, cette résistance est répartie sur tous les étages. La forme de tension que fournit le générateur dans les conditions décrites ci-dessus est dite "bi-exponentielle", et répond à l'équation:

$$U(t) = nU (\exp(-t/T_q) - \exp(-t/T_f)) \quad (3.1)$$

Où T_q et T_f sont respectivement les constants de temps de queue et de front du choc de tension généré.

Éclateur pendant le claquage

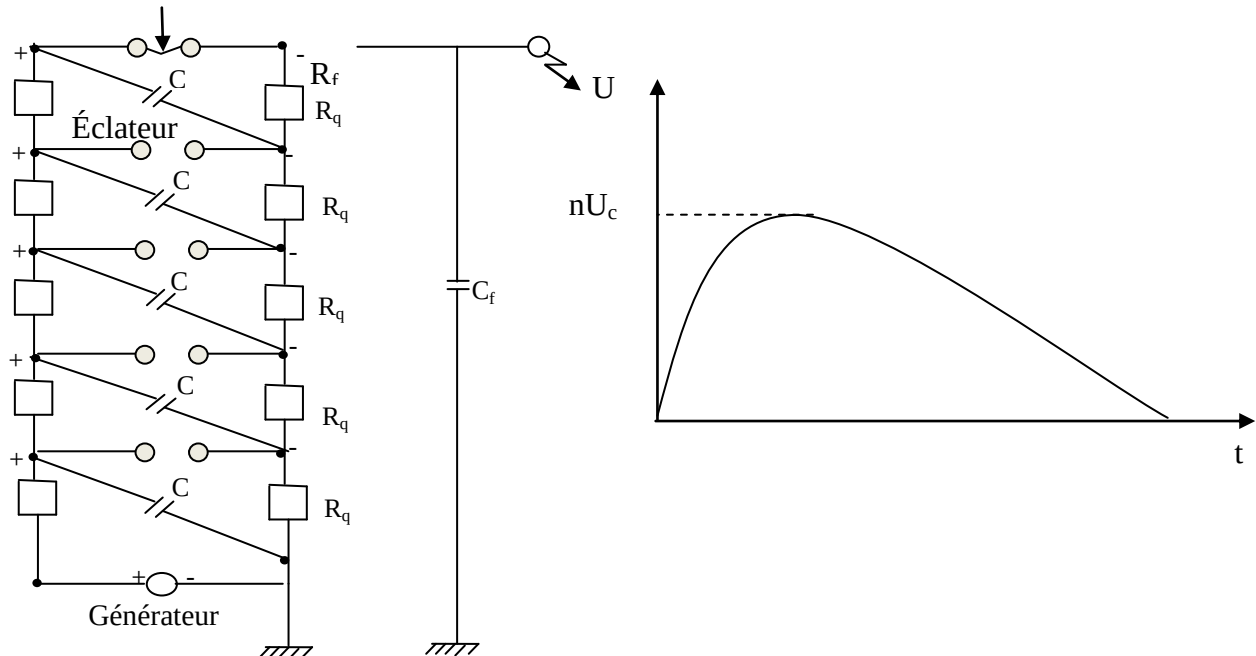


Figure III.1.- Schéma électrique d'un générateur de choc : noté les éclateurs à sphères pour la commutation en série des condensateurs [25].

III.2.2. Schéma pratique d'un générateur de choc

Le générateur de choc exige une source de tension continue pour son alimentation en énergie pour charger le condensateur de charge C_1 , cette alimentation est constitué d'un transformateur et un redresseur. La charge dure de 3 à 10s pour chaque application, ce qui exige un temps de séparation entre deux applications successives pour des raisons pratiques. La figure (III.2), montre un schéma pratique détaillé d'un générateur de choc. [26].

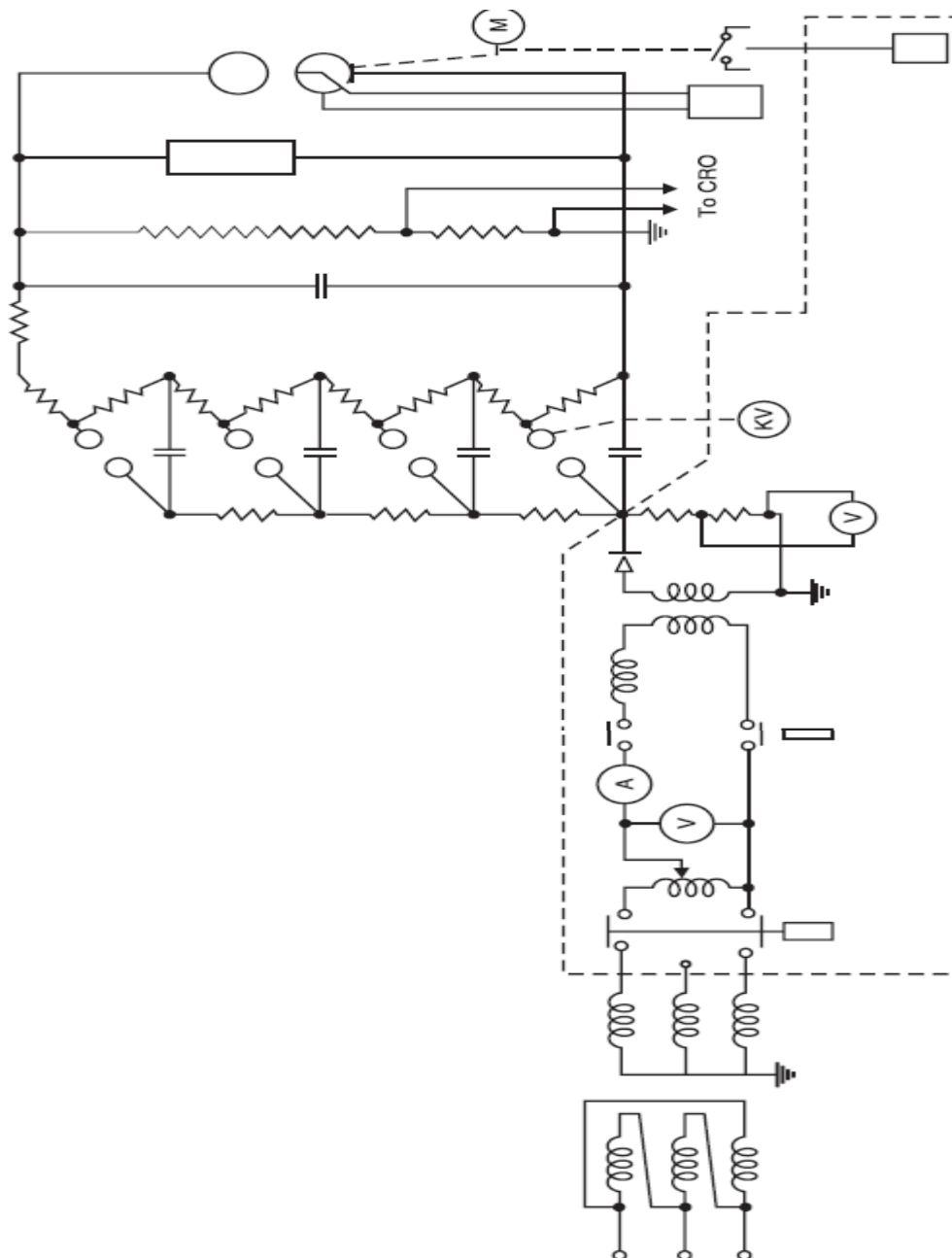


Figure III.2.- Circuit de générateur de choc [26]

III.2.3. Etude de générateur de choc de type Marx en utilisant les circuits équivalents

La figure (III.3), montre un générateur de choc qui contient trois étages .Le condensateur C_1 est chargé par la grande tension de charge V_0 à travers les résistances de charge en parallèle R_c . La tensions V_0 est déchargé à travers les éclateurs G avec une valeur suffisante à travers les condensateurs C'_1 vers le condensateur C_2 .

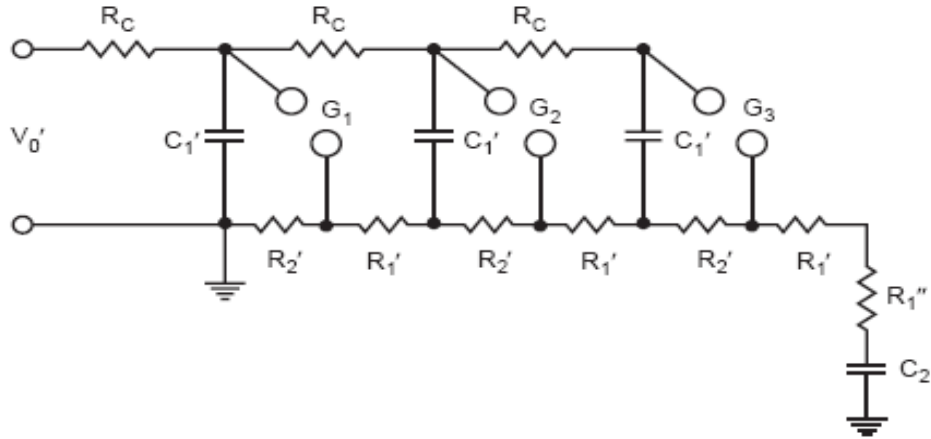


Figure III.3.- Schéma équivalent du générateur de Marx à trois étages [26].

Ce circuit peut être réduit vers un générateur de choc à un seul étage.

$$R_1 = \sum^n R'_{1+} R''_1 \quad (III.2)$$

$$R_2 = \sum^n R'_2 \quad (III.3)$$

$$1/C_1 = \sum^n \frac{1}{C'} \quad (III.4)$$

Avec n les nombre des étages.

Afin de faciliter l'étude, on utilise le schéma équivalent de générateur de Marx simplifié présenté à la figure (III.4). Ceci consiste en une capacité C_g qui est chargée à la tension requise U_t et qui se décharge à travers un circuit ; les constantes de temps peuvent être ajustées afin d'obtenir la forme de l'onde de tension désirée [27] [28].

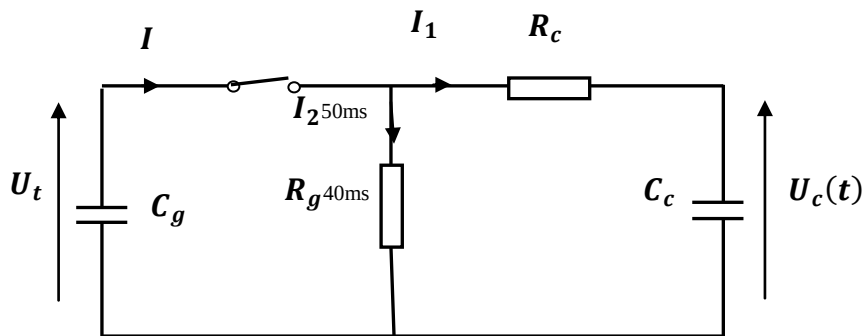


Figure III.4.- Schéma simplifié du générateur choc [27] [26].

Les éléments R_c et C_c contrôlent le front et R_g et C_g , la queue de l'onde.

En utilisant les propriétés de la transformée de Laplace pour obtenir l'expression de la tension $U_c(t)$.

L'analyse de ce circuit, nous donne :

$$\frac{U_t}{p} = I_1 R_g + (I_1 + I_2) \frac{1}{p C_g} \quad (\text{III.5})$$

$$I_1 R_g = I_2 \left(R_c + \frac{1}{p C_c} \right) \quad (\text{III.6})$$

$$U_c(p) = \frac{I_2}{p C_c} \quad (\text{III.7})$$

En remplaçant les équations (III.5) et (III.6) dans (III.7), nous obtenons : [32]

$$U_c(p) = \frac{U_t}{R_c C_c} \frac{1}{p^2 + bp + c} \quad (\text{III.8})$$

Où

$$U_c(p) = \frac{U_t}{R_c C_c} \frac{1}{\left(p + \frac{1}{T_a}\right) \left(p + \frac{1}{T_b}\right)} \quad (\text{III.9})$$

Avec:

$$b = \frac{1}{R_c C_c} + \frac{1}{R_g C_g} + \frac{1}{R_c C_g} \quad (\text{III.10})$$

$$c = \frac{1}{R_g R_c C_g C_c} \quad (\text{III.11})$$

$$T_{a,b} = \frac{2}{b \pm \sqrt{b^2 - 4c}} \quad (\text{III.12})$$

Où : $(1/T_a)$ et $(1/T_b)$ sont les racines de l'équation : $p^2 + bp + c = 0$.

Finalement, en inversant la transformée de Laplace dans l'équation (III.5), nous obtenons :

$$U_c(t) = \frac{U_t}{R_c C_c} \frac{T_a T_b}{T_a - T_b} \left[\exp\left(-\frac{t}{T_a}\right) - \exp\left(-\frac{t}{T_b}\right) \right] \quad (\text{III.13})$$

Nous voyons ainsi que la forme de l'onde de tension $U_c(t)$ dépend des constantes de temps T_a et T_b : leurs expressions sont bien connues :

$$T_a = \frac{T_2 - T_{cr}}{0,7} \quad (3.14)$$

Et:

$$T_b = \frac{T_a}{\exp(1,35 + 1,2 \ln \frac{T_2}{T_{cr}})} \quad (III.15)$$

La valeur maximale de $U_c(t)$ sera:

$$T_{cr} = \frac{T_a T_b}{T_a - T_b} \ln \frac{T_a}{T_b} \quad (III.16)$$

Où T_a , T_b , T_2 , T_{cr} et U_t sont respectivement le temps de montée, le temps de descente, le temps à mi-amplitude, le temps crête et un facteur amplitude.

En posant:

$$\frac{T_a T_b}{(T_a - T_b) R_c C_c} = 1 \quad (III.17)$$

Nous pouvons écrire $U_c(t)$ sous la forme :

$$U_c(t) = U_t \left(\exp\left(-\frac{t}{T_a}\right) - \exp\left(-\frac{t}{T_b}\right) \right) \quad (III.18)$$

C_c sera alors :

$$C_c = \frac{T_a T_b}{T_a - T_b} \frac{1}{R_c} \quad (III.19)$$

Les éléments du générateur sont tels que R_g et C_g sont très grands devant R_c et C_c respectivement.

L'examen de l'équation (III.6), nous donne alors :

$$T_a \approx R_g(C_g + C_c) \quad (III.20)$$

$$T_b \approx R_c \frac{C_g C_c}{C_g + C_c} \quad (III.21)$$

Ces équations nous permettent de déduire C_g et R_g . D'autre part, en posant : $\delta = T_a/T_b$ on peut déduire U_t .

$$U_t = \frac{U_{cr}}{\delta^{1/(1-\delta)} - \delta^{\delta/(1-\delta)}} \quad (III.22)$$

Finalement, $U_c(t)$ sera obtenue à partir du bloc diagramme de la figure (III.5).

Dans la pratique, les systèmes d'isolation, ou de protection, liés au transport d'énergie électrique ne sont soumis que rarement à des contraintes de formes purement bi-exponentielles telles que les chocs dits de manœuvre. Les opérations d'ouverture et de fermeture des disjoncteurs, ou des sectionneurs, sont responsables d'oscillations apparaissant sur le front d'onde des perturbations (tension) en raison de l'existence d'inductances parasites ou de réflexions de ces ondes. Il est donc intéressant d'analyser le comportement d'une décharge pilotée par de telles ondes oscillantes. En laboratoire, il est possible de superposer une oscillation sur l'onde de tension bi-exponentielle en introduisant, dans le circuit de charge, des inductances de différentes valeurs [27] [28].

Le schéma proposé pour cette étude est la totalité de la figure (III.5). La fréquence des oscillations de l'onde de tension est :

$$f = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{1}{LC} - \left(\frac{R}{2L}\right)^2} \quad (III.23)$$

Où R et C sont définis comme suit:

$$R = \sqrt{2} \frac{L}{(R_g + R_c) \left(\frac{C_c}{C_m} \right) (C_m + C_c)} \quad (III.24)$$

$$\text{Et } C = \frac{C_m C_c}{C_m + C_c} \quad (3.44)$$

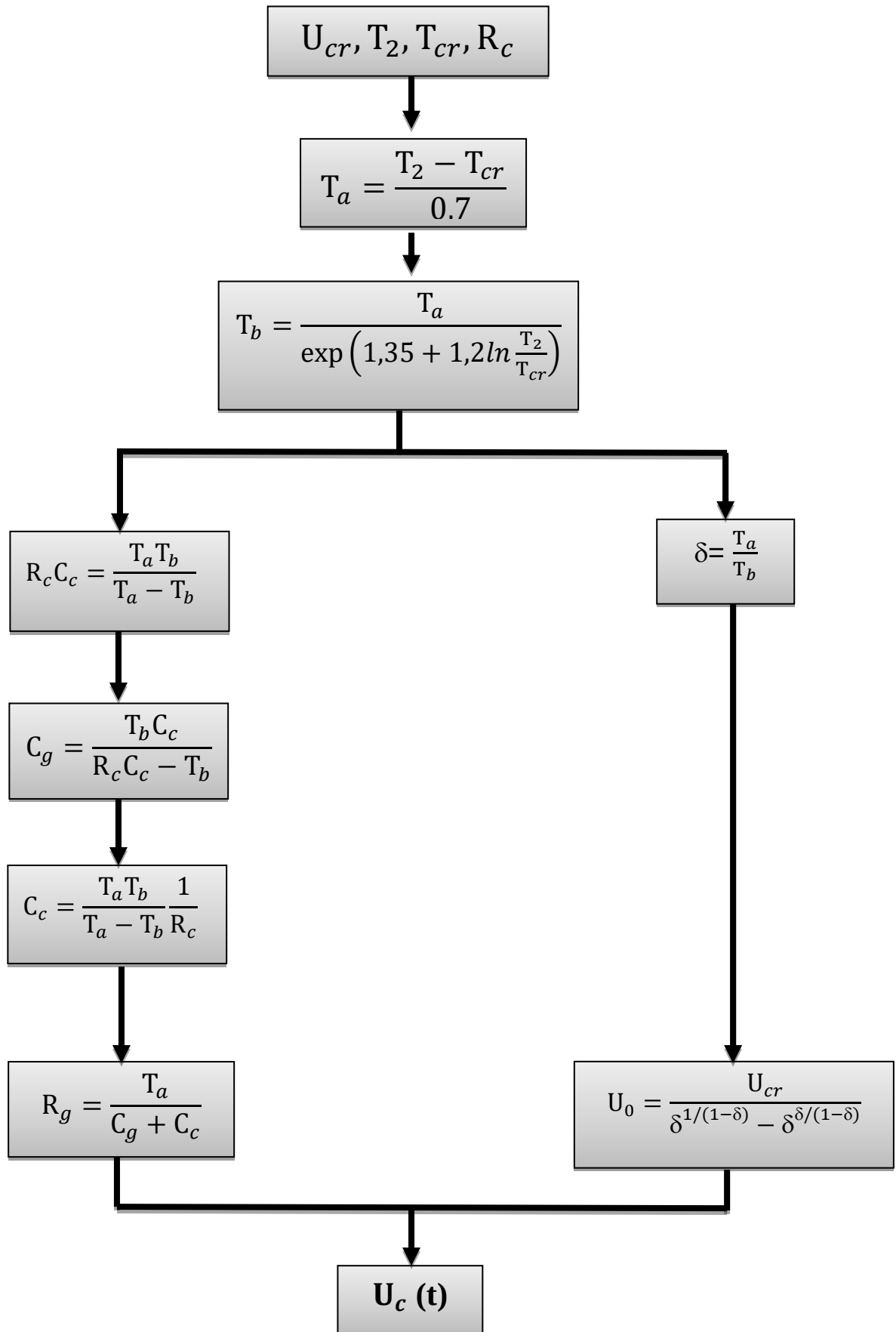


Figure III.5.- Bloc diagramme permettant le calcul des paramètres du schéma équivalent du générateur de Marx [27].

III.3 APPLICATION SUR DES TENSIONS USUELLES

III.3.a. Onde de manœuvre (250/2500 μ s)

L'application du diagramme précédent sur une onde de type manœuvre normalisée a donné :

La courbe

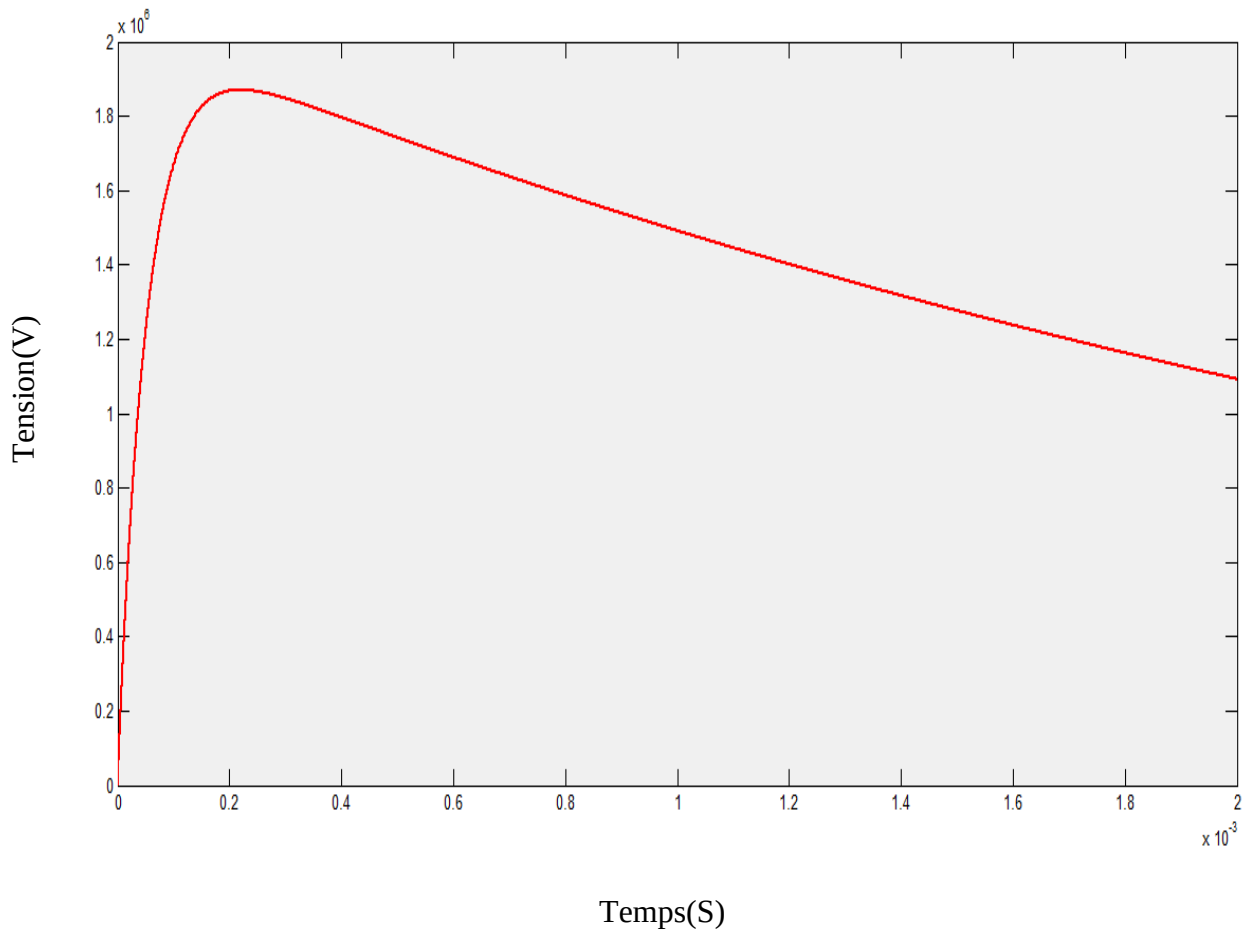


Figure III.6.- tension de générateur de choc d'une onde (250/2500) μ s est tension crête 850kV

Les résultats des paramètres de circuit équivalent pour l'onde de manœuvre (250/2500) μ s

$$R_c = 160 \, \Omega$$

$$R_g = 157,382 \, \Omega$$

$$C_g = 20,089 \, \mu F$$

$$C_c = 0,334 \, \mu F$$

III.3.b. Onde de manœuvre (500/10000 μ s)

L'application du diagramme précédent sur une onde de type manœuvre normalisée a donné :

La courbe

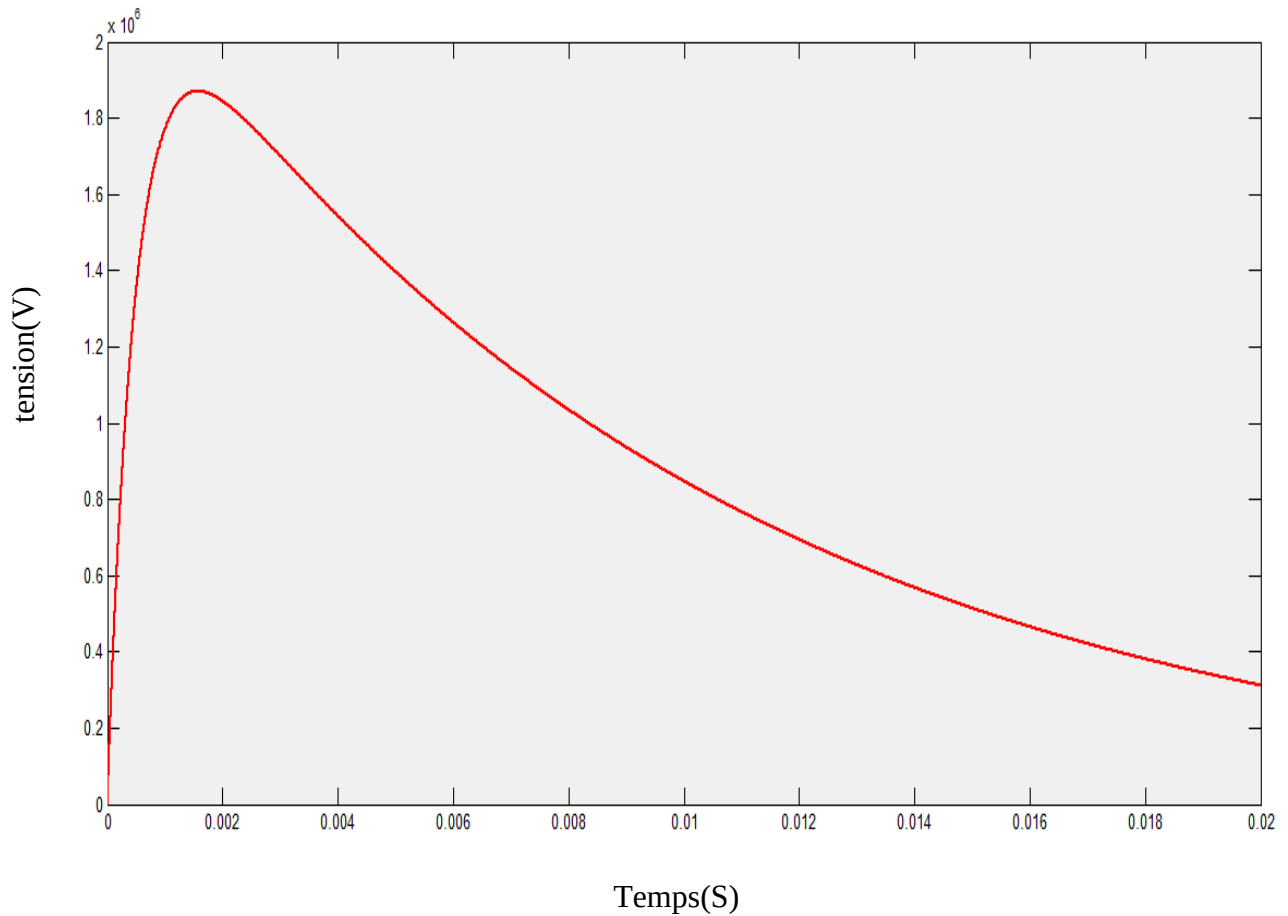


Figure III.7.- tension de générateur de choc d'une onde (500/10000) μ s est tension crête 1870kV

Les résultats des paramètres de circuit équivalent pour l'onde de manœuvre (500/10000 μ s)

$$Rc = 160 \, \Omega$$

$$Rg = 48,65 \, \Omega$$

$$Cg = 2,76.10^{-4} \, F$$

$$Cc = 1,98.10^{-6} \, F$$

III.3.C. Onde de Choc de foudre (1.2/50 μ s)

L'application du diagramme précédent sur une onde de type manœuvre normalisée a donné :

La courbe

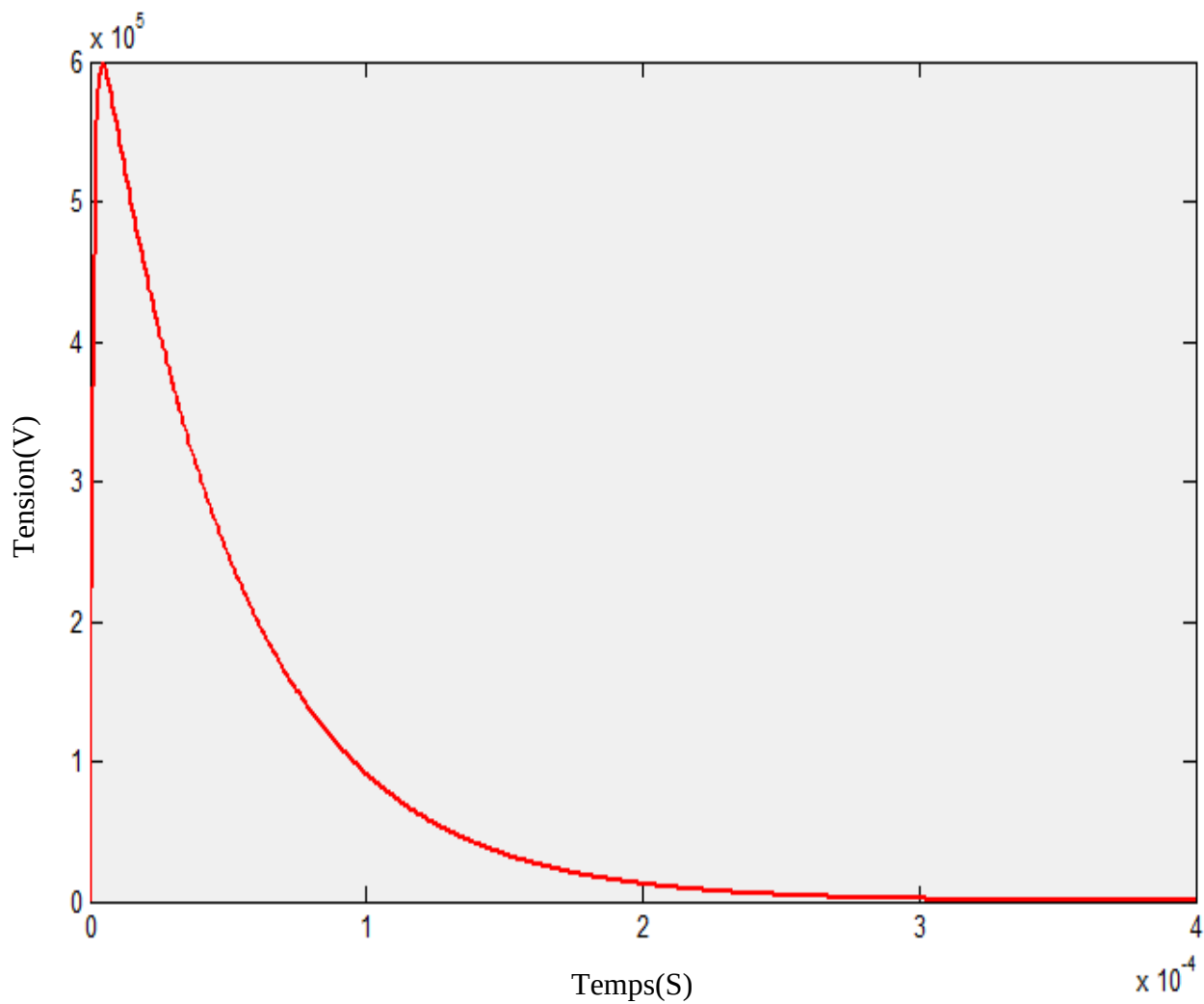


Figure III.8.- tension de générateur de choc d'une onde (1.2/50) μ s est tension crête 600 kV

Les résultats des paramètres de circuit équivalent pour l'onde de manœuvre (1.2/50 μ s)

$$R_c = 49\Omega$$

$$R_g = 159,527\Omega$$

$$C_g = 4,35 \cdot 10^{-7}F$$

$$C_c = 1,28 \cdot 10^{-9}F$$

III.4 Détermination de la tension U_{50}

En cours de mesure, la tension à 50% de décharge disruptive est déterminée par la méthode des paliers multiples constants avec application de 20 chocs par palier. Nous avons généralement utilisé quatre paliers de tension différents. Le temps entre deux chocs successifs est de l'ordre de 30 secondes. A chaque niveau correspond une probabilité de décharge. Les valeurs de tension avec leurs probabilités respectives serviront à trouver la répartition de probabilités qui peut s'adapter à nos données avec un degré de confiance suffisant. Dans le passé, la répartition normale a été généralement acceptée [29] et les travaux antérieurs de notre laboratoire [30] [31] ont montré que la courbe des fréquences cumulées sur une échelle Gaussienne s'apparent suffisamment avec les données dont on dispose à un tracé rectiligne. La répartition normale a donc été admise dans la présente étude. Il faut autrefois prendre en garde, dans les déductions qui en résultent au fait qu'il peut très bien y avoir d'autres répartitions convenant aussi bien ou même mieux à ces données.

III.5 Modèles réduits de simulation

III.5.1 Cas du sol homogène bon conducteur

Ce modèle utilisé pour étudier la configuration tige-plan dans le cas du sol homogène mauvais conducteur est représenté à la (figure III.9) l'électrode de haut tension du système est une tige métallique de 4,8 mm de diamètre présentant une extrémité Hémisphérique de même diamètre. La terre du système est constituée d'une couche d'eau distillée de 8 cm d'épaisseur. Elle a une surface de $(1,2 \times 1,2 \text{ m}^2)$ et une conductivité γ variant de $8 \mu\text{S/cm}$ à $130 \mu\text{S/cm}$. Cette couche d'eau repose sur un plan conducteur mis à la terre. Pour chaque conductivité du sol mauvais conducteur, la longueur de l'intervalle h est variée. Nous avons choisi quatre valeurs de h comprises entre 4 cm et 14 cm (4, 8, 12 et 14 cm). Pour chacune de ces valeurs, la tension U_{50} et l'écart type σ sont mesurés pour des tensions du type choc de foudre, respectivement pour la polarité positive et la polarité négative

Nous avons aussi étudié la configuration tige-plan avec sol homogène « bon conducteur » pour comparer tous les résultats à une même référence. Dans ce cas, le sol de l'intervalle est constitué seulement d'une plaque métallique mise à la terre (Figure III.10). Les mesures sont effectuées dans le cas du sol bon conducteur en respectant les mêmes longueurs d'intervalle utilisées dans le cas du sol mauvais conducteur.

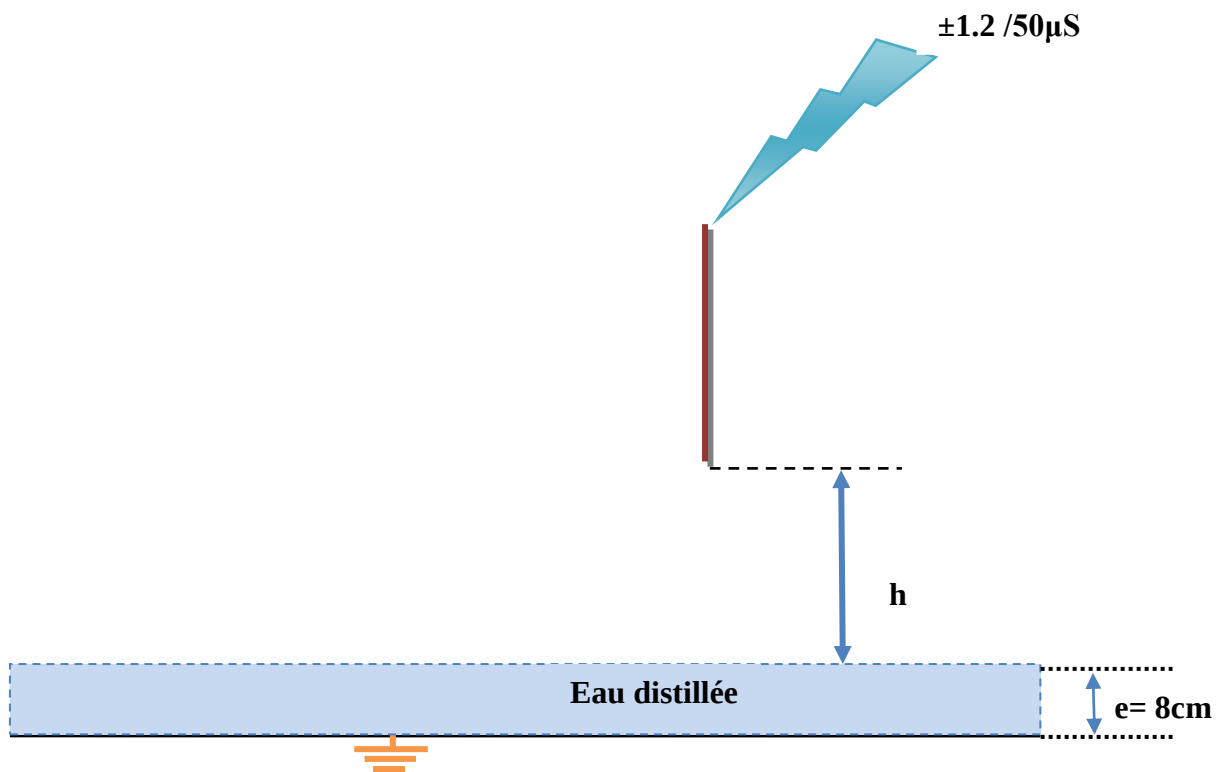


Figure III.9.- Configuration du système pointe-plan avec sol homogène mauvais conducteur

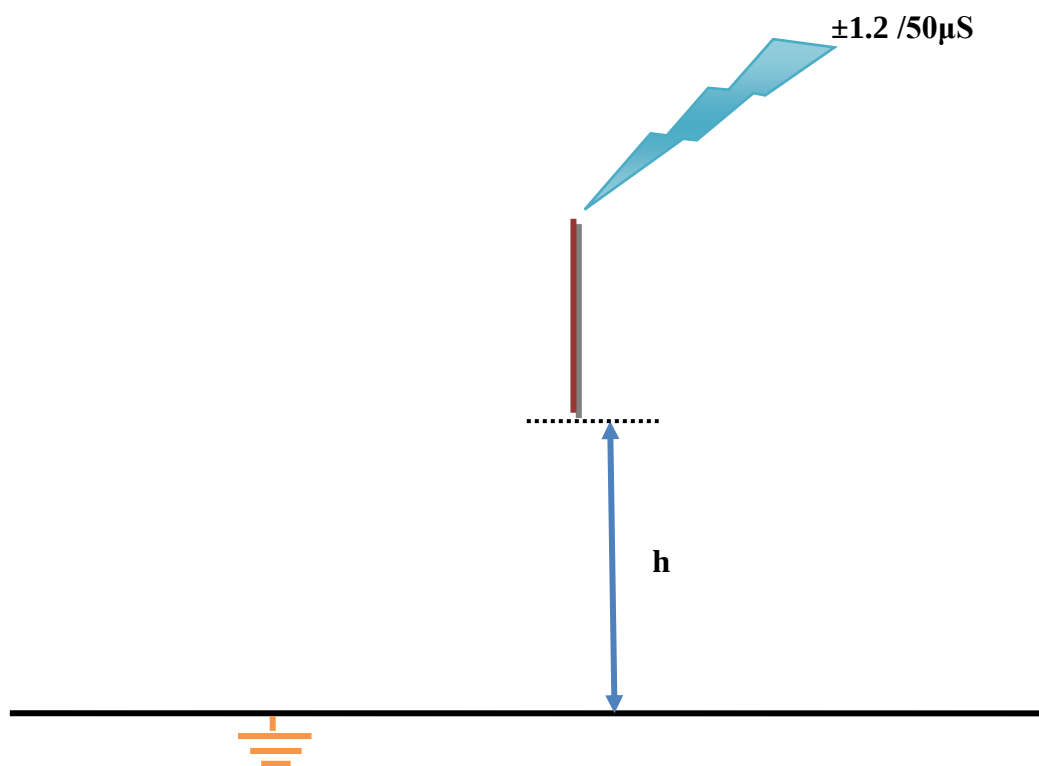


Figure III.10.- Configuration du système pointe -plan avec sol homogène bon conducteur

III.5.2. cas du sol discontinu

Le terme sol discontinu concerne une terre homogène à deux niveaux différents notées la partie haute et la partie basse de la terre.

L'étude de ce cas a été réalisée pour les deux polarités positive et négative. Pour la polarité positive l'étude a été faite pour trois longueurs seulement $h = (4 \text{ cm}, 8 \text{ cm et } 12 \text{ cm})$. Tandis que Pour la polarité négative, la rigidité diélectrique a été étudiée pour deux longueurs 4 cm et 6 cm. Pour cette polarité et dans le but d'avoir un grand nombre de données, l'épaisseur de la terre constitue une deuxième variante. (Figure III.11)

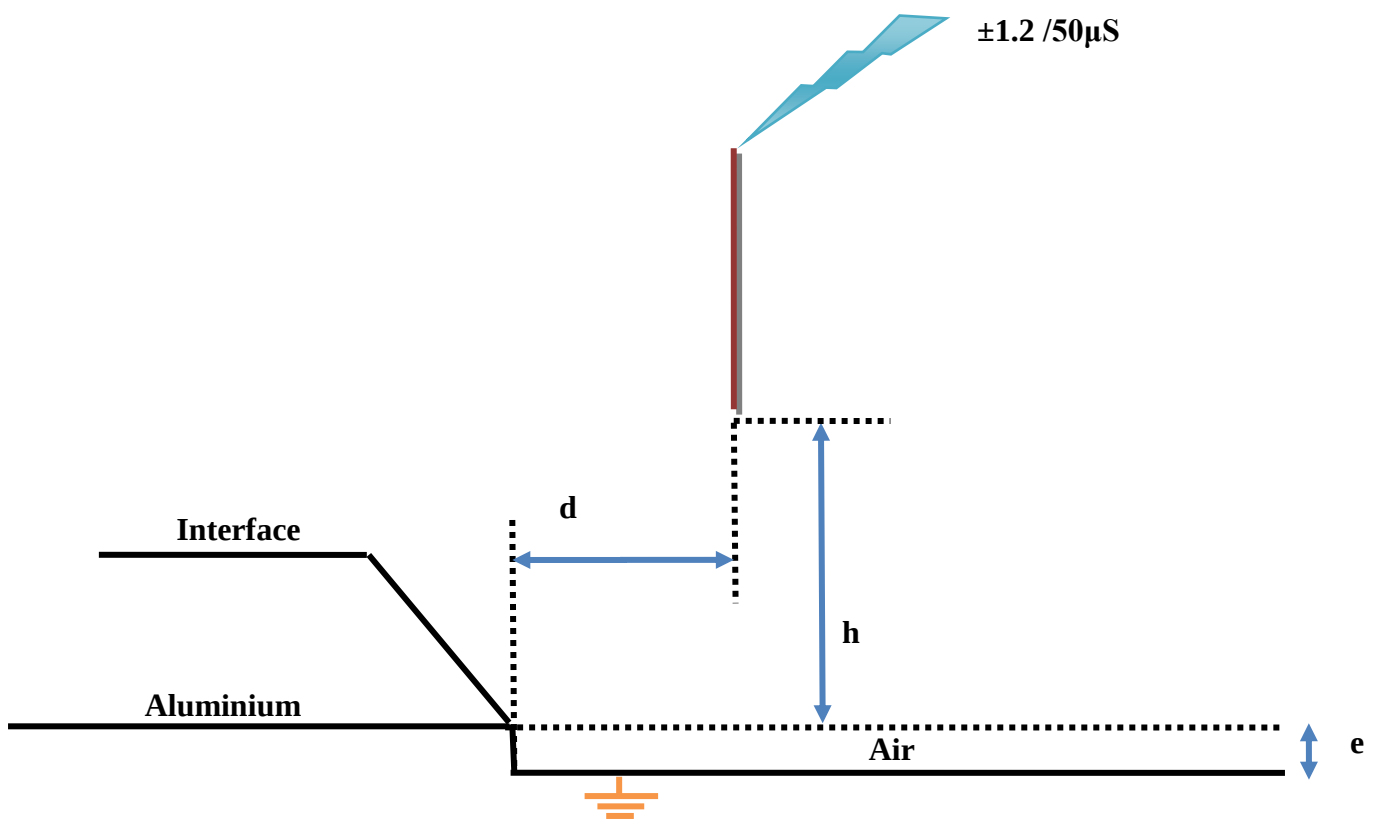


Figure III.11.- Configuration du système pointe -plan avec sol discontinu.

III.6 SOL HOMOGENE

III.6.1 influence de la longueur de l'intervalle tige-plan "h"

La figures (III.12 et III.13) donnent la variation de la tension disruptive U_{50} en fonction de la longueur d'intervalle h , ces courbes montrent d'une part que lorsque l'intervalle h augmente la tension disruptive augmente aussi, et de l'autre part que lorsque h varie, la tension disruptive conserve son caractère linéaire, pour les différentes valeurs de la conductivité du sol homogène

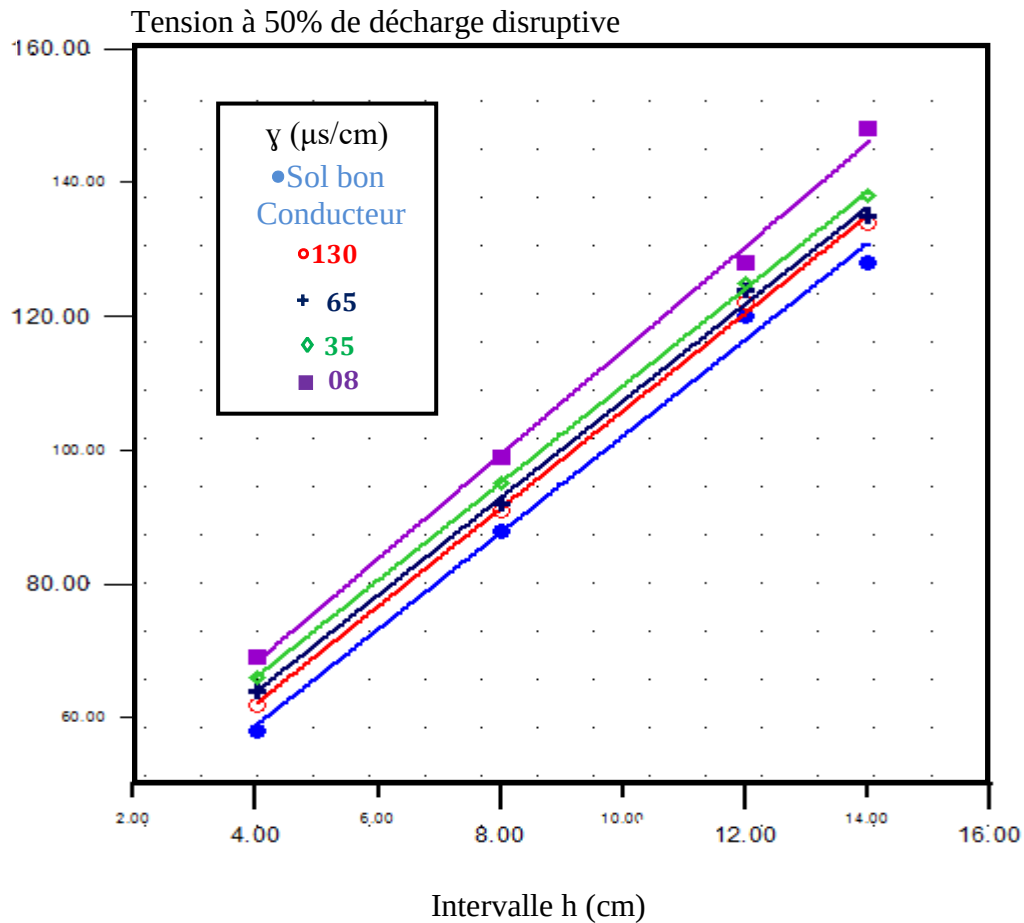


Figure III.12.- U_{50} . en fonction de h . Intervalle pointe positive-plan. Sol homogène.

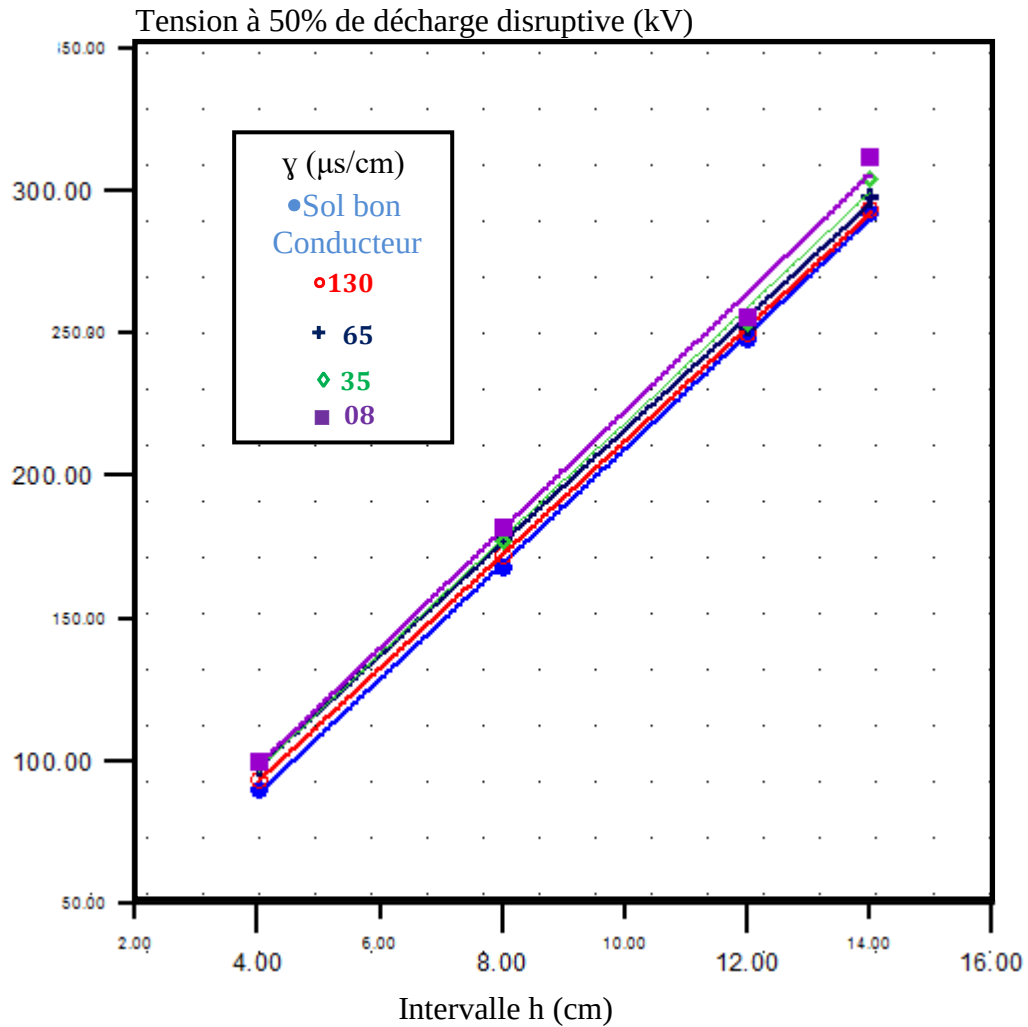


Figure III.13. $-U_{50}$ en fonction de h. Intervalle pointe négative-plan. Sol homogène.

III.6.2 influence de la conductivité du sol

Les deux (figures III.12 et III.13) montrent aussi que, pour une même longueur d'intervalle, la tension U_{50} s'éloigne de la valeur obtenue pour le sol bon conducteur de plus en plus que la conductivité du sol s'affaiblit. Puis, une diminution de la conductivité du sol entraîne une augmentation de la tension U_{50} . Il est important de noter aussi qu'aux les droites donnant U_{50} en fonction de m'intervalle h sont parallèles. Chacune de ces droites peut être donc obtenu par une translation de la droit relative au sol bon conducteur dans le sens des h négatives. Ceci laisse supposer que l'intervalle tige-plan avec sol bon conducteur dont la longueur est majorée d'une certaine valeur constante qui n'est autre que la constante de translation.

III.6.3 influence de la polarité de la tige

La comparaison des résultats obtenus pour les deux polarités positive et négative montre que le comportement du système sous tension positive et son conduit sous tension négative sont dans leurs grandes lignes similaires. En effet les tensions U_{50} dans le cas de la polarité négative sont nettement supérieures à celle sous tension positives (figure III.14). Le rapport U_{50-} / U_{50+} augmente avec la longueur d'intervalle h .

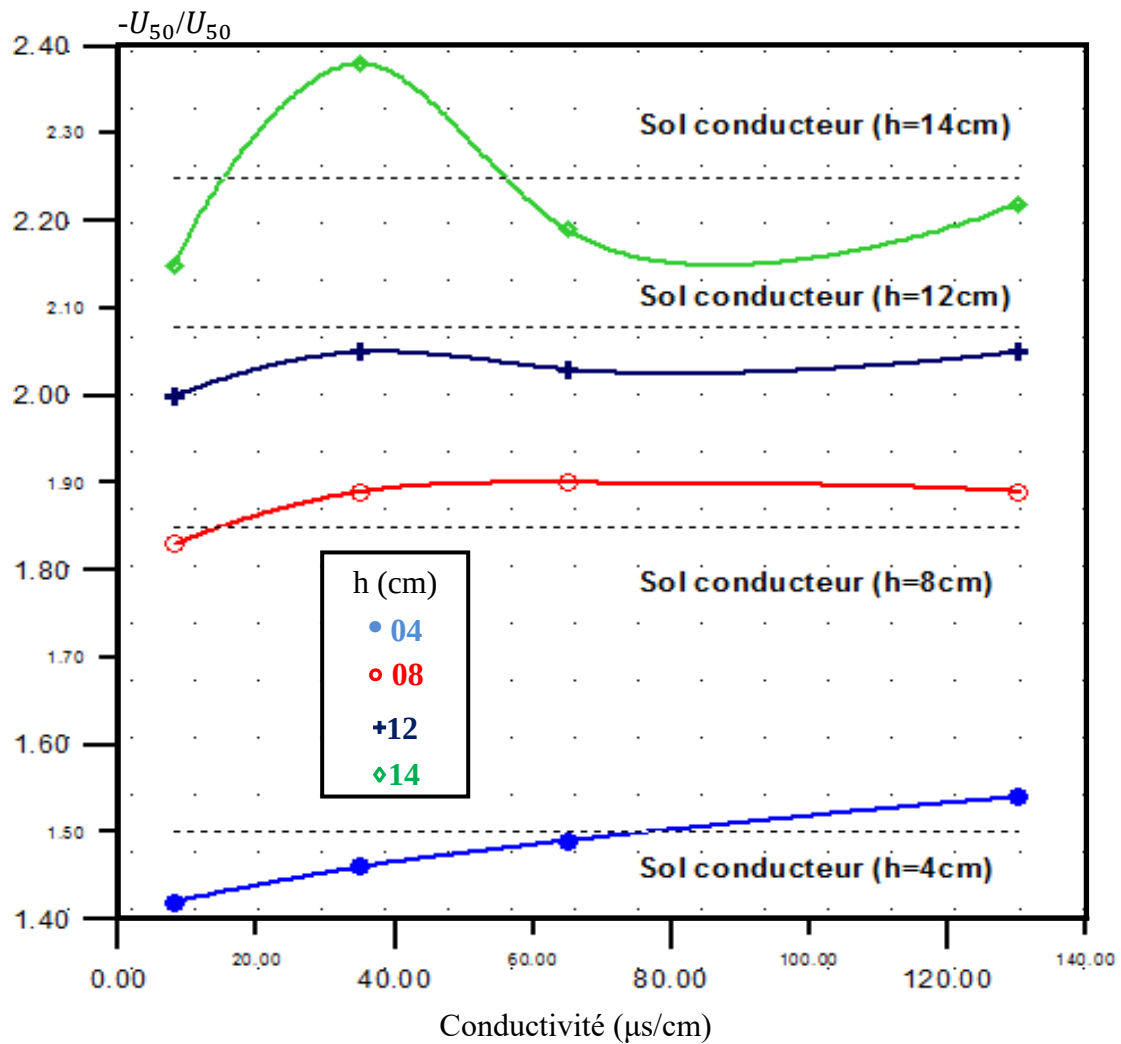


Figure III.14.- variation de U_{50-} / U_{50+} avec la conductivité $\gamma(\mu\text{S} / \text{cm})$

III.7 SOL DISCONTINU

Pour cette configuration tige-plan avec sol discontinu on peut définir :

Pour la tige positive :

d : Distance d entre l'axe de la tige et l'interface.

h : La longueur de l'intervalle.

Pour la tige négative : En plus des deux paramètres précédents on ajoute :

e : Epaisseur de la terre discontinue.

III.7.1. Influence de la distance “ d ”.

a) Polarité positive :

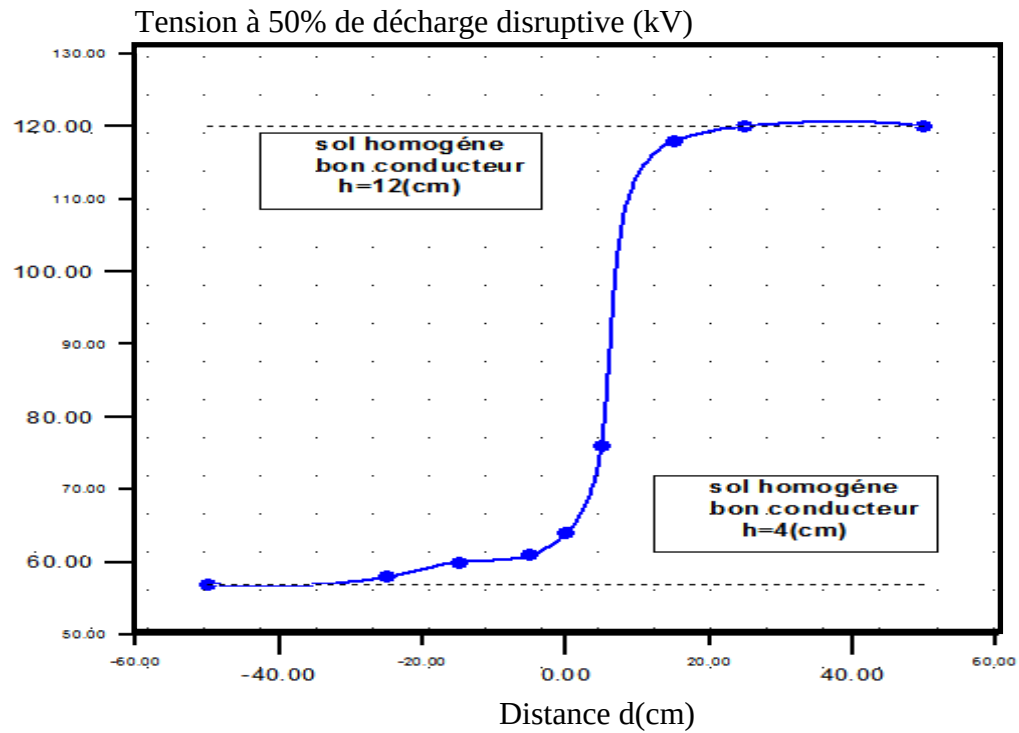
Les figures III.15.a.b donnent les variations de la tension U_{50} en fonction de la distance d . la rigidité de l'intervalle est influencée considérablement par la position de la tige par rapport à l'interface.

- Pour la tige au dessus de la partie haute de la terre discontinue (d négative) la tension U_{50} s'affaiblit au fur et à mesure que la tige s'éloigne de l'interface, le système est équivalent à un système pointe - plan homogène bonne conductrice de même longueur.

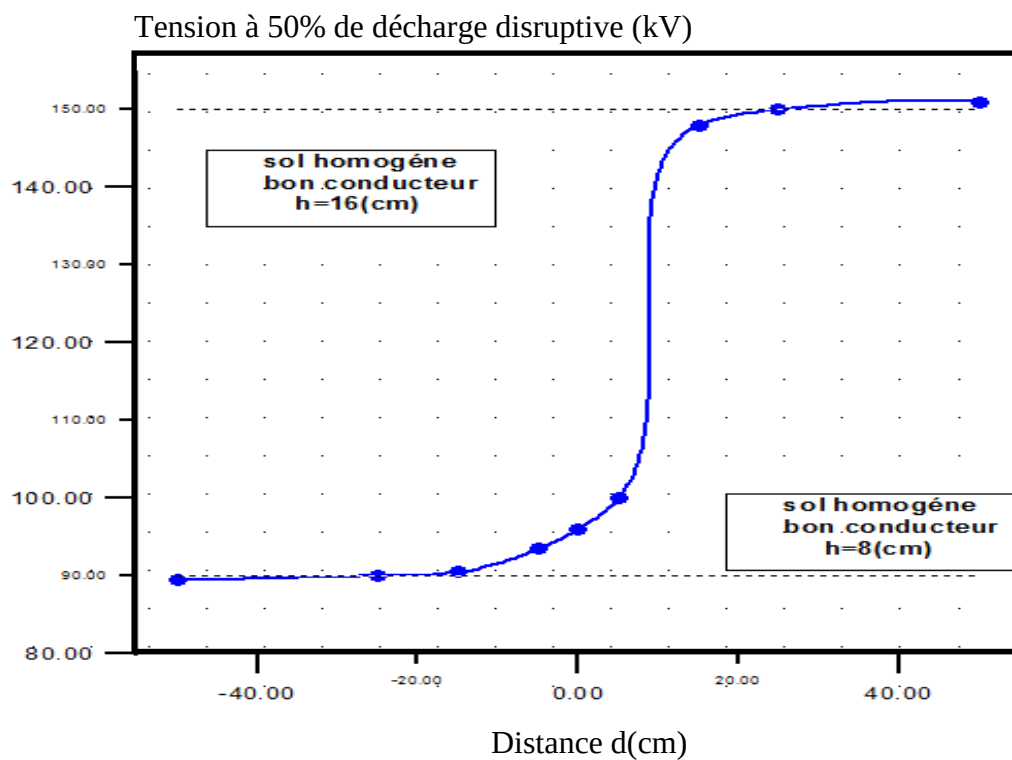
- Tige au dessus de la partie basse de la terre :

Pour des grandes distances d positives, c'est-à-dire la tige est suffisamment éloignée de l'interface, le système est équivalent à un système pointe-sol homogène bon conducteur dont la longueur est majorée par l'épaisseur de la terre ($e=8$ cm).

- Au voisinage de l'interface ($d = \pm 10$ cm) : la tension U_{50} bascule brusquement entre deux tensions (la tension qui correspond à $h=4$ cm et celle qui correspond à $h=12$ cm). Au niveau de l'interface, le système est équivalent à un système pointe-pointe.



(a)



(b)

(a)-h= 4 cm.

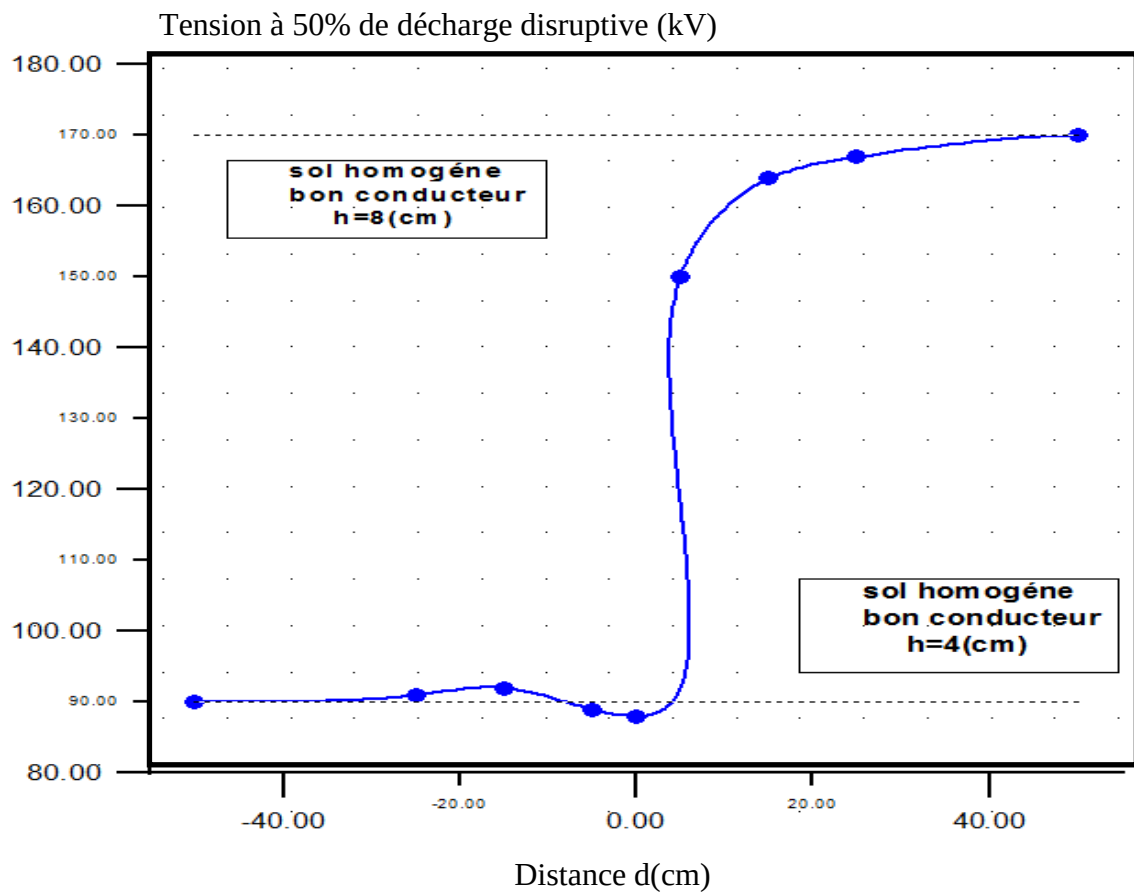
(b)-h= 8 cm.

Figure III.15.- Evolution de U_{50} en fonction de la distance d dans le cas de la pointe positive.

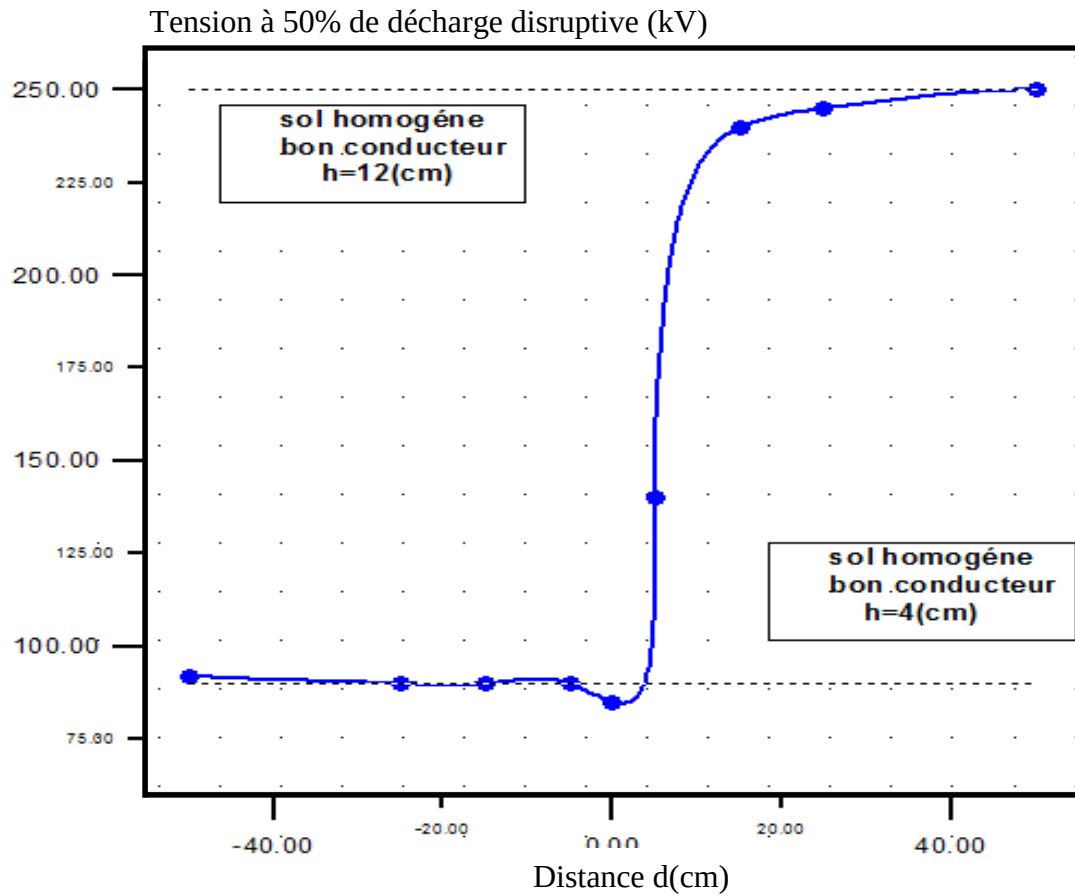
b) Polarité négative

La figure III.16. Donne les variations de la tension en fonction de la distance d .

- Pour les grandes distances d de la tige par rapport à l'interface, le comportement de l'intervalle sous la tension négative est similaire à sous tension positive.
- Au voisinage de l'interface, on constate que la tension U_{50} est inférieure au système pointe-plan homogène de même longueur, cela est expliqué par le fait que le système tige-tige sous tension négative est moins rigide que le système pointe-plan ce qui n'est pas le cas pour la tension positive.



(a)



(b)

(a)-h= 4 cm.

(b)-h= 8 cm.

Figure III.16. - Evolution de U_{50} en fonction de la distance d dans le cas de la pointe négative.

III.7.2. influence de la longueur de l'intervalle "h"

a) Polarité positive

Sur la (figure III.17) on présente les variations de la tension disruptive U_{50} en fonction de la longueur de l'intervalle h pour différentes distances d .

Quelque soit la position de la tige par rapport au sol discontinu, U_{50} est linéaire en fonction de longueur d'intervalle.

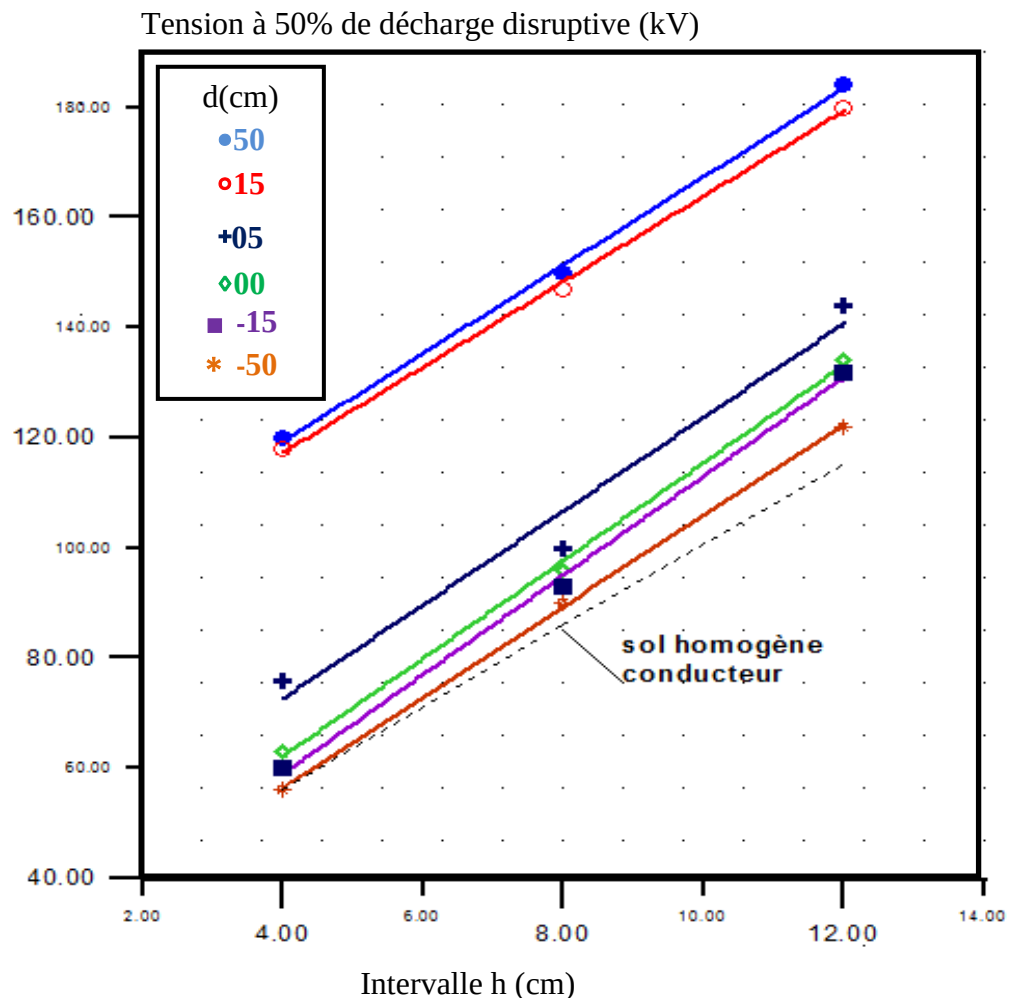


Figure III.17. - U_{50} en fonction de l'intervalle dans le cas de la pointe positive.

b) Polarité négative

Les résultats obtenus permettent de faire les remarques sur l'effet de la longueur de l'intervalle h sur la tension U_{50} , dans le cas de la tige négative sont :

- pour les distances négatives aucune influence importante de h n'est remarquée. Le rapport U_{50}/U_{hom} est voisin de l'unité pour les deux intervalles.
- pour les grandes distances positives, le rapport U_{50}/U_{hom} est plus grand pour $h=4$ cm que pour $h=6$ cm (figure III.18)
- la réduction de la tenue au voisinage de l'interface est plus marquée pour $h=4$ cm (9,71%) que pour $h=6$ cm (3,85%) (Figure III .16)

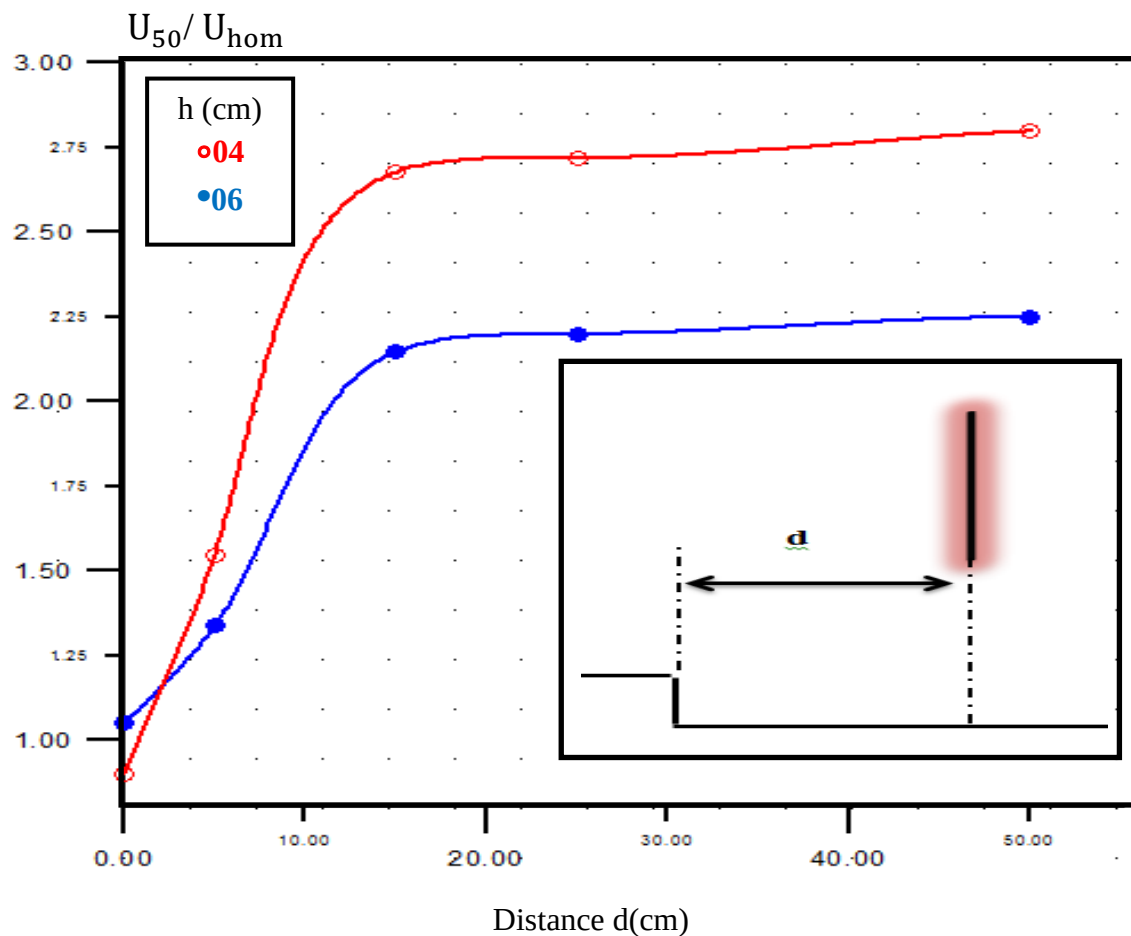


Figure III.18. - Influence de longueur h sur U_{50}/U_{hom} dans le cas de la pointe négative. Tige à droite de l'interface.

III.7.4. influence de l'épaisseur

En comparant les résultats obtenus pour les deux épaisseurs, pour l'intervalle 4cm, on peut noter que :

- pour les grands distances positives l'influence de la discontinuité est plus importante pour $e=8$ cm que pour $e=4$ cm (figure III.19).
- pour les distances négatives aucune influence importante n'est remarquée. Le rapport U_{50}/U_{hom} est voisin de l'unité pour les deux épaisseurs.
- Au voisinage de l'interface la diminution de la tension U_{50} est plus sensible pour $e=8$ cm (9,71%) que pour $e=4$ cm (5,9%) (Figure III.16)

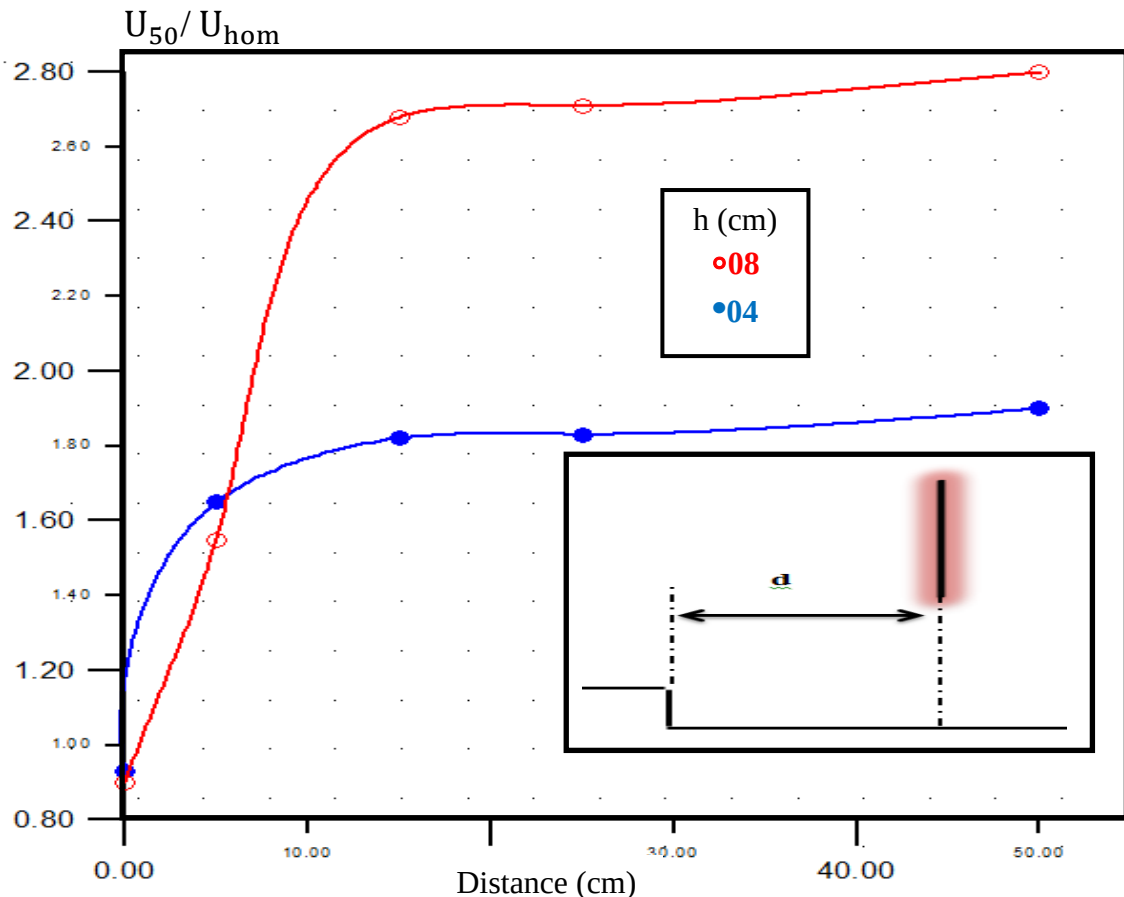


Figure III.19. - Influence de l'épaisseur e sur U_{50}/U_{hom} dans le cas de la pointe négative. Tige à droite de l'interface.

II.7.5. influence de la conductivité

Les figures III. 20 à III.23 sont illustrée que les variations de la tenue avec la position de la tige sont plus importantes lorsque la conductivité de sol s'affaiblit, c'est-à-dire lorsque le degré d'hétérogénéité du sol est élevé.

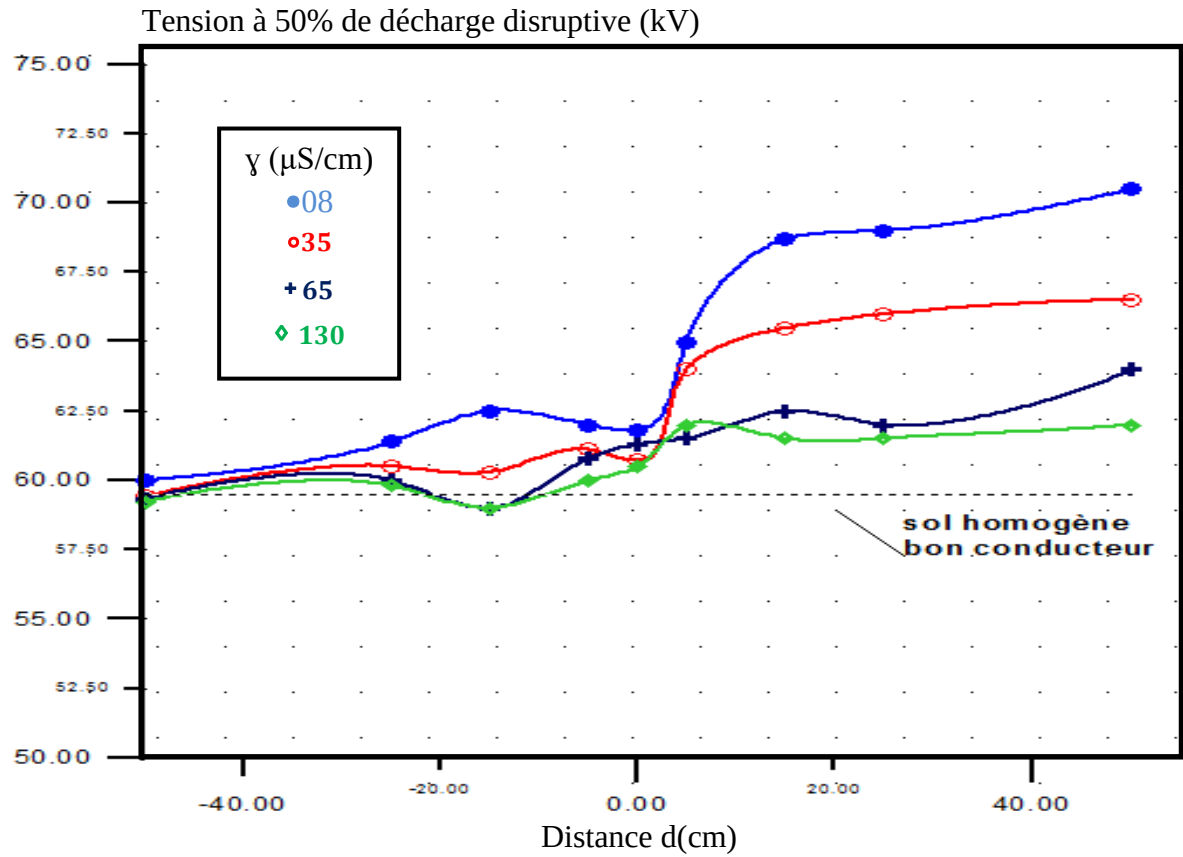


Figure III.20. - U_{50} en fonction de la distance dans le cas de la pointe positive ($h=4$ cm).

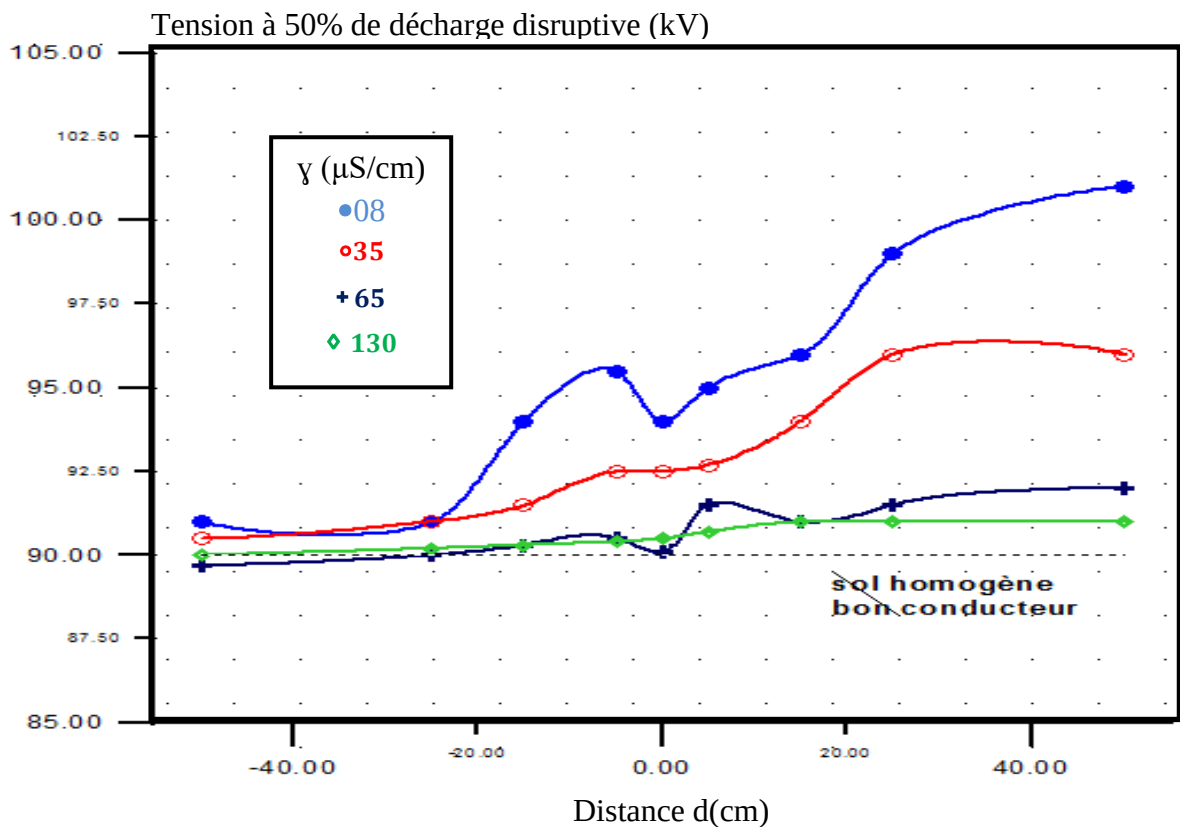
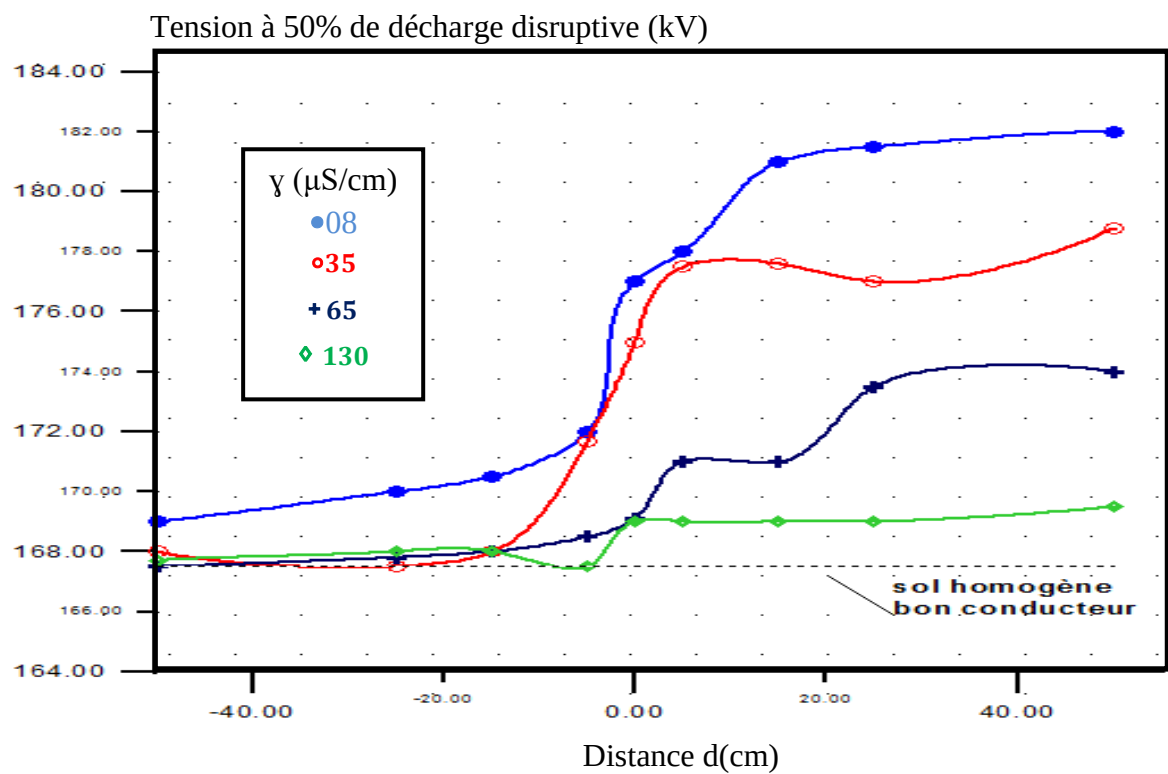
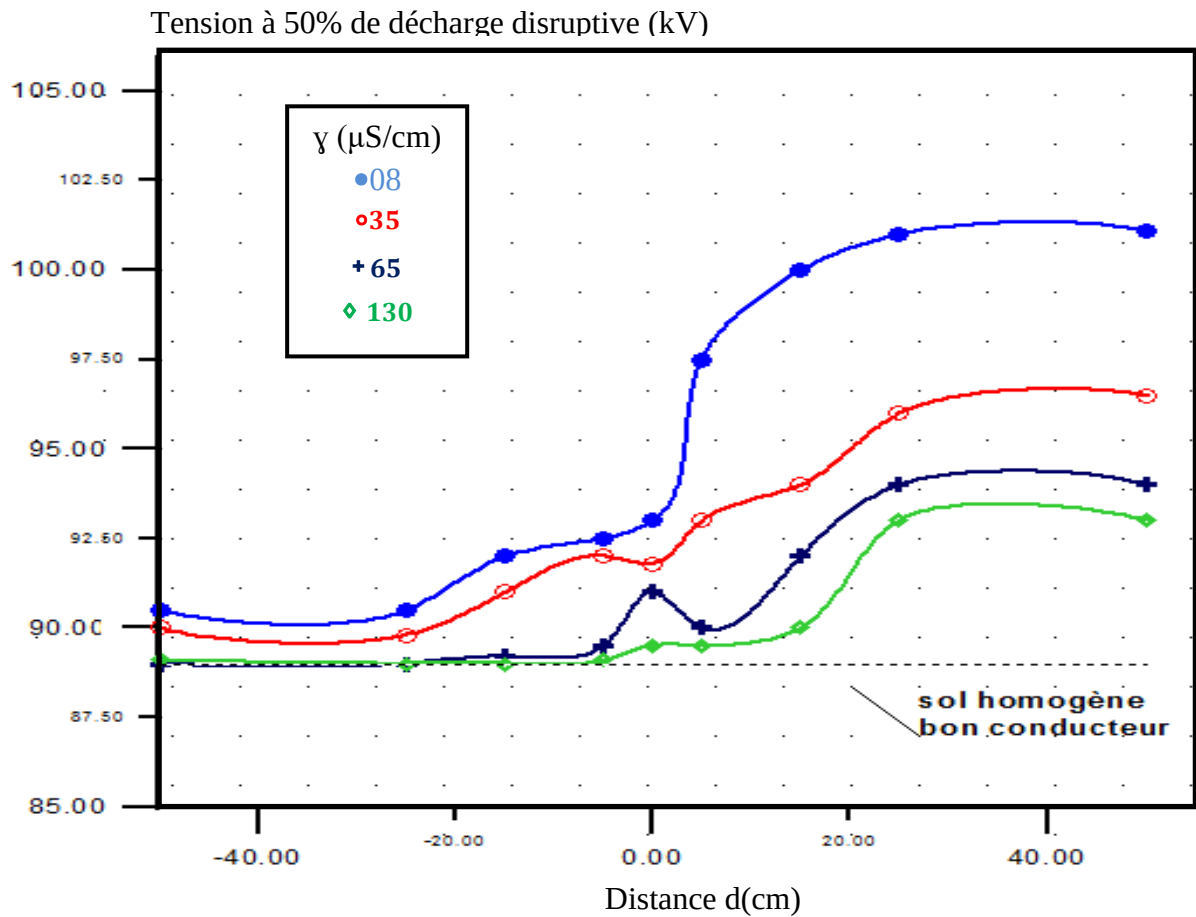


Figure III.21. - U_{50} en fonction de la distance dans le cas de la pointe positive ($h=8$ cm).



Conclusion générale

L'objectif de notre travail a été l'étude de l'influence de ce qui est homogène du sol sur les tensions à 50% de décharges disruptives des petits intervalles d'air pointe-plan sous les ondes de choc de foudre positif et négatif. Deux configurations du sol ont été considérées : la première concerne un sol homogène de conductivité variable, la seconde un sol discontinu.

La première partie de ce travail a été consacrée à l'étude théorique de la décharge des intervalles d'air pointe-plan et les différents mécanismes existants.

Dans la deuxième partie, nous avons étudié les caractéristiques des différents types de tensions à savoir : continue, alternative et impulsionnelle de type choc de foudre normalisée.

Dans la troisième partie, nous avons exposé les moyens de simulation utilisés pour étudier la rigidité diélectrique des intervalles d'air pointe-plan à savoir ; le générateur de choc et les modèles réduits qui simulent la nature de la terre.

Dans la dernière partie, nous avons présenté l'influence des différents paramètres comme, la polarité de la tension appliquée à la tige et sa position par rapport à l'interface ainsi que la conductivité de la terre et la longueur de l'intervalle pour la polarité positive. Pour la polarité négative de la tige on a ajouté l'épaisseur de la terre discontinue.

- Dans le cas de la terre homogène, la rigidité diélectrique de l'intervalle dépend de la conductivité du sol. L'intervalle est plus rigide pour les plus faibles conductivités. Cette influence est de même ordre pour les deux types de polarité de la tige.
- Dans le cas de la terre discontinue, la rigidité diélectrique de l'intervalle dépend essentiellement de la position, au-dessus du sol, de l'électrode sous tension. Une nette différence est apparue au voisinage de la discontinuité entre le comportement de l'intervalle sous tension positive et comportement sous tension négative. L'influence de la conductivité paraît dépendre de la grandeur relative de la longueur de l'intervalle par rapport à la profondeur de la discontinuité. Les résultats sont cependant trop peu nombreux pour que cette orientation puisse être affirmée sans réserve. Il serait très intéressant de faire une étude plus approfondie de ce cas en envisageant plusieurs profondeurs et des intervalles plus longue.

Les résultats obtenus permettent aussi de faire les conclusions suivantes :

- La caractéristique linéaire de la relation liant la tension à 50% de décharge disruptive et l'intervalle est conservée pour les deux structures étudiées. Le système point négative-plan reste toujours plus rigide que le système point positive-plan pour les deux configurations.

Annexe

III.6 SOL HOMOGENE [32]

III.6.1. influence de la longueur de l'intervalle tige-plan "h"

γ ($\mu\text{S}/\text{cm}$) \ h (cm)	4	8	12	14
Sol homogène	58	88	121	129
130	62	91	123	133
65	64	92	124.3	136
35	66	96	125.4	138
08	69	99	128.3	148

Tableau.1.- U_{50} en fonction de h . Intervalle tige positive-plan. Sol homogène.

γ ($\mu\text{S}/\text{cm}$) \ h (cm)	4	8	12	14
Sol homogène	90	186	248	292
130	94	172	250	294
65	98	178	251	298
35	99	177	254	304
08	100	182	256	312

Tableau .2. - U_{50} en fonction de h . Intervalle tige négative-plan. Sol homogène.

III.6.3. influence de la polarité de la tige

h (cm) \ γ ($\mu\text{S}/\text{cm}$)	8	35	65	130
4	1.44	1.5	1.53	1.52
8	1.83	1.86	1.93	1.89
12	2	2.03	2.03	2.04
14	2.1	2.2	2.21	2.17

Tableau .3.- variation de U_{50}^- / U_{50} avec la conductivité $\gamma(\mu\text{S}/\text{cm})$

III.7.1. Influence de la distance “d”

a) Polarité positive :

$\begin{matrix} d(\text{cm}) \\ h(\text{cm}) \end{matrix}$	-50	-25	-15	-5	0	5	15	25	50
4	57	58	60	61	64	76	118	120	120
8	90	90	93	93.4	96	136	136	146	150

Tableau.4.- Evolution de U_{50} en fonction de la distance d dans le cas de la tige positive.

b) Polarité négative

$\begin{matrix} d(\text{cm}) \\ h(\text{cm}) \end{matrix}$	-50	-25	-15	-5	0	5	15	25	50
4	90	91	92	89	88	150	164	167	170
8	92	90	90	90	95	140	240	245	250

Tableau .5.- Evolution de U_{50} en fonction de la distance d dans le cas de la tige négative

III.7.2. Influence de la longueur de l'intervalle “h”

a) Polarité positive

$\begin{matrix} h(\text{cm}) \\ d(\text{cm}) \end{matrix}$	4	8	12
-50	56	90	122
-15	60	93	132
00	63	96	134
05	76	100	144
15	118	136	186
50	120	160	184

Tableau.6. - U_{50} en fonction de l'intervalle dans le cas de la tige positive.

b) Polarité négative

$\begin{matrix} d(\text{cm}) \\ h(\text{cm}) \end{matrix}$	0	5	15	20	50
4	1.05	1.34	2.15	2.20	2.25
6	0.9	1.55	2.68	2.72	2.8

**Tableau.7.- Influence de longueur h sur U_{50}/U_{hom} dans le cas de la tige négative.
Tige à droite de l'interface.**

III.7.5. influence de l'épaisseur

$\begin{matrix} d(\text{cm}) \\ h(\text{cm}) \end{matrix}$	0	5	15	20	50
4	0.3	1.55	2.69	2.71	2.8
6	0.9	1.65	1.82	1.83	1.9

**Tableau.8.- Influence de l'épaisseur e sur U_{50}/U_{hom} dans le cas de la tige négative.
Tige à droite de l'interface.**

III.7.6. influence de la conductivité

$\begin{matrix} Y(\mu\text{S}/\text{cm}) \\ d(\text{cm}) \end{matrix}$	8	35	65	130
50	70.5	66.5	64	62
15	68	65	62.5	61.5
00	61.2	60.9	61.3	59
-15	62.5	60.3	59	59
-50	60	59.3	59	59

Tableau.9. - U_{50} en fonction de la distance dans le cas de la tige positive (h=4 cm).

γ ($\mu\text{S}/\text{cm}$) d(cm)	8	35	65	130
50	101	95.8	92	91.7
15	96	94.3	91	91.4
00	94	92.6	90.5	91.2
-15	94	91.5	90.3	91
-50	91	90.5	89.8	90

Tableau.10. - U_{50} en fonction de la distance dans le cas de la tige positive (h=8 cm).

γ ($\mu\text{S}/\text{cm}$) d(cm)	8	35	65	130
50	101.5	96.5	90	93
15	100	94	92	90
00	93	91	91.3	89.7
-15	92	91	89.2	89.1
-50	90.2	90	89	89.3

Tableau.11. - U_{50} en fonction de la distance dans le cas de la tige négative(h=4 cm).

γ ($\mu\text{S}/\text{cm}$) d(cm)	8	35	65	130
50	188.5	175	179	109.5
15	181	171	177.6	109
00	177.5	168.6	175	169
-15	170.5	168	168	168
-50	169	167.5	168	167.7

Tableau.12. - U_{50} en fonction de la distance dans le cas de la tige négative (h=8 cm).

Références bibliographiques

- [1] A. Boubakeur, «Phénomène de décharge électrique et Protection primaire», Ecole Nationale Polytechnique, 3 Mars 2014
- [2] I. Fofna «Modélisation de la décharge positive dans les grands intervalles d'air», Thèse de Doctorat, l'Ecole Doctorale, Lyon, France 1996
- [3] M. Salanne Jean-Philippe, «Contrôle du point de fonctionnement des décharges électriques par l'intermédiaire de leur alimentation», Thèse De Doctorat, École doctorale : GEET, 2005
- [4] Anne-Marie Pointu, Jérôme Perrin, Jacques Jolly « Plasmas froid de décharge– Applications et diagnostic » Les techniques de l'ingénieur Dossier D2835 (11/1997).
- [5] S. VAQUIE «Arc électrique» Les techniques de l'ingénieur Dossier D2870 -03/1995
- [6] A. Fridman, A. Petrousov, J. Chapelle, JM. Cormier, A. Czernichowski, H. Lesueur & J. Stevefelt «Modèle physique de l'arc glissant» J. PPhys. III France. 4 (1994) 1449-1465
- [7] Fieux R. and Bouteau M. (1970) Bull. Direction Etudes Recherches, EDF France, série B, N° 2, 55-88.
- [8] P. Ségur, «Gaz isolants», Techniques de l'ingénieur, traité de génie électrique, D 2 530, 1990.
- [9] A. Beroual and A. Boubakeur, «Influence of barriers on the lightning and switching impulse strength of mean air gaps in point/plane arrangements» IEEE Trans. Electr. Insul., Vol. 26, N°6, p. 2230-1139, December 1991.
- [10] C. GARY, « La Foudre : nature, histoire risques et protection », Dunod, Paris, 2004.
- [11] Y. Bourek, «Détermination des conditions d'ionisation caractérisant le seuil de claquage de l'air par la logique floue» Thèse de Magister, 2005
- [12] G. Le Roy, C. Gary, B. Hutzler, J. Lacot, C. Dubaton; «Les propriétés diélectrique de l'air et les très hautes tensions (la foudre)», Ed Eyrolles, 1984, Paris. pp.92-251
- [13] A. Beroual, «Note de cours Master 2 Recherches Génie électrique : Matériaux du Génie Electrique Rigidité diélectrique des gaz», 2005
- [14] Mamadou Lamine COULIBALY, «Caractérisation des décharges électriques se propageant aux interfaces gaz/solide–Relation entre propriétés des matériaux et dimension fractale », Thèse De Doctorat, L'école Centrale De Lyon, 2009.
- [15] Université de sidi belaabes Cours de A. Tilmatine. PDF
- [16] G. Le Roy, C. Gary, B. Hutzler, J. Lacot, C. Dubaton; «Les propriétés diélectrique de l'air et les très hautes tensions (la foudre)», Ed Eyrolles, 1984, Paris. pp.92-251
- [17] T. Horvath; « Computation of Lightning Protection », Research Studies Press LTD, England 1991
- [18] C. GARY, «La Foudre : des méthodologies antiques à la recherche moderne», Masson, 1994.

- [19] E. Kuffel, W. S. Zaengl: «High voltage engineering», PergamonPress, G.B; 1ère Ed; 1984. pp: 463-488.
- [20] Abdelghani ROUINI : «Etude de l'influence des barrières dans les intervalles d'air pointe-plan par le calcul numérique du champ à l'aide de la méthode des volumes finis (MVF)», Mémoire de Magister, École Doctorale en Génie Électrique, USTO ORAN, Sept 2011
- [21] I. Ndiaye, « Initiation et développement des décharges couronnes sur une surface de glace », Mémoire de maîtrise présentée devant l'Université du Québec à Chicoutimi, 2003.
- [22] N. St. J. Braithwaite, « Introduction to gasdischarges », Plasma Sources Sci.Technol, vol 9, pp 517 - 527, 2000.
- [23] E. Badaru, J. Popescu, « Gaz ionisé –décharges électriques dans les gaz », Edition Dunod Paris,1965.
- [24] C. Gary, « Effet couronne sur les réseaux électriques aériens », Technique de l'ingénieur, D4440, pp. 1-25.
- [25] C. GARY, « La Foudre : nature, histoire risques et protection », Dunod, Paris, 2004.
- [26] C. L. WADHWA « High voltage engineering », New Age International (P) Ltd., PublishersPublished by New Age International (P) Ltd., Publishers Copyright © 2007.
- [27] I. FOFANA, « Modélisation de la grandes intervalles d'air », Thèse Doctorat, Ecole Centrale de Lyon, 1996.
- [28] J. H. RAKOTONANDRASANA, «Modélisation de la décharge négative dans les grands intervalles d'air application à la foudre », L'école doctorale électronique, électrotechnique, automatique de Lyon, 2008.
- [29] M. Ouyang, ‘’ Interception of implse tests ‘’, Electr. Times, Vol, 151, 1967, pp, 165-167.
- [30] R. Belaicha, Zones d'attraction d'un paratonnerre vertical dans le cas d'une terre mauvaise conductrice, Thèse de Magister. U, T, O Tizi-Ouzou, 1994.
- [31] A. Rahmani, Zones d'attraction d'un paratonnerre horizontal dans le cas d'une terre mauvaise conductrice, Thèse de Magister, C, U Bejaia, 1996.
- [32] S.A.A. Boumaza, Amorçage aux chocs de foudre des intervalles d'air tige-plan avec terre hétérogène, Thèse de Magister, ENP, 1998.

Résumé :

L'objectif de notre travail est d'étudier la tension à 50% de décharges disruptives des petits intervalles d'air pointe-plan sous les ondes de choc de foudre, l'influence de la nature homogène de la terre est prise en considération ainsi que d'autres facteurs d'influence comme la polarité, la longueur d'intervalle et la conductivité de la terre, Dans la première partie, nous traitons les concepts de base concernant la rigidité diélectrique et les mécanismes de décharge disruptive dans les intervalles d'air pointe-plan, alors que dans la deuxième partie nous essayons de présenter les différents types de tensions et une présentation générale sur choc de foudre, Dans la dernière partie, nous présentons les techniques de simulation de la tension impulsionnelle et la rigidité des intervalles pointe-plan.

Mots clés:

Décharge de foudre, Intervalles d'air, Pointe-plan, Rigidité diélectrique, Terre homogène, Tension disruptives 50%.

ملخص :

في هذه المذكرة قمنا بدراسة الجهد 50٪ من الانحناء الثغرات الهواء الصغيرة نقطة السطح تحت موجات صدمة البرق، ويتم أخذ تأثير طبيعة متجانسة من الأرض في اعتبار كذلك تأثيرات أخرى مثل قطبية، وطول فترة توصيل من الأرض، في الجزء الأول، ونحن نناقش المفاهيم الأساسية فيما يتعلق بآليات قوة والتفريغ انهيار عازلة داخل نطاقات الهواء نقاط السطح، بينما في الجزء الثاني نحاول تقديم أنواع مختلفة من التوتر وعرض عام على دفعة البرق، في الجزء الأخير، نقدم تقنيات المحاكاة من الجهد النبض وفترات ذروة صلابة السطح

الكلمات المفتاحية :

التفريغ البرق، فجوات الهواء، نقطة السطح، قوة عازلة، متجانسة الأرض، الجهد التخريبية 50٪ .