

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

MEMOIRE DE FIN D'ETUDE EN VUE DE L'OBTENTION DU DIPLOME MASTER
EN GENIE ELECTRIQUE

OPTION : RESEAUX ELECTRIQUES

THEME

Etude de la rigidité diélectrique aux chocs de foudre des intervalles d'air tige – plan avec une terre hétérogène

Proposé et dirigé par :

Mr. CHOUCOU Abdelmadjid

Présenté par :

MAHDI Mourad

Année Universitaire : 2015/2016

N° d'ordre : REs_233

REMERCIEMENTS

Toute ma gratitude, grâce et remerciement vont à dieu le tout puissant qui m'a donné la force, la patience, le courage et la volonté pour élaborer ce travail.

C'est avec une profonde reconnaissance et considération particulière que je remercie mon encadreur :

Mr A.M. CHOUCOU pour la sollicitude avec laquelle il a suivi et guidé ce travail.

Je remercie également les membres de jury qui ont accepté de présider et d'examiner ce modeste travail.

Toute ma gratitude va à tous les enseignants qui ont contribué à ma formation.

Je remercie aussi tous mes amis pour leurs aides et leurs patiences.

Dédicaces

Je dédie ce modeste travail

A ma très chère mère source de tendresse

A mon très cher père, qui m'encourage dans les instants délicats

A mes chers frères

A mes tantes et oncles

A toute ma famille

A tous mes amis

A ma fiancée

Table des matières

Introduction Générale	1
Chapitre I : Physique de la décharge de foudre	
I.1.Introduction	2
I.2. Historique	2
I.2.1 L'époque des croyances.....	2
I.2.2 les premières recherches	2
I.3 Electricité atmosphérique	3
I.3.1 Le condensateur terrestre.....	3
I.3.2 Différents types de décharges.....	3
I.3.2.1 Décharges intra – nuages.....	4
I.3.2.2 Décharges entre nuages.....	4
I.3.2.3 Décharges nuage – sol.....	4
I.4 Physique des phénomènes orageux	4
I.4.1 Distribution statistique des orages - Niveau kéraunique	4
I.4.2 Définition du foudroisement	5
I.4.3 Densité réelle de coups de foudre	5
I.4.4 Facteurs locaux influant sur le foudroisement	5
a) Facteurs topologiques.....	5
b) Facteurs géologiques.....	5
c) Concentration ionique de l'air (conductivité de l'air).....	6
I.4.5 Nuage orageux	6
I.4.6 Effet couronne au sol et ionisation	7
I.5 Classification et description des coups de foudre.....	8
I.5.1 Classification des coups de foudre	8
I.5.2. Déroulement d'un coup de foudre	9
I.5.2.1. Coup de foudre ascendant.....	9
I.5.2.2. Coup de foudre descendant.....	10
I.6.Processus d'accrochage de la foudre sur un avion	11
I.6.1 Les différents types de couplage.....	11
I.6.2 Le zoning	12
I.6.3 Quand un avion risque-t-il le plus d'être foudroyé ?.....	13
I.7. Les effets de la foudre.....	13
a) Effet thermique	13
b) Effet électrodynamique.....	14
c) Effets conduits ou rayonnés	14
d) Effets chimiques	14
e) Effets acoustiques	14
f) Effets électromagnétiques	15
g) Effets sur un être vivant (humain ou animal)	15
I.8. Types de foudroisement de l'homme.....	15

a) Le coup de foudre "direct"	15
b) Le foudroiement par éclair "latéral"	15
c) Le foudroiement par "tension de pas"	15
d) Le foudroiement par "tension de toucher"	15
e) Le foudroiement par "courant induit"	15
f) Le foudroiement par "différence d'impédance"	15
I.9 Formes et amplitudes des impulsions des coups de foudre	16
I.9.1 Formes des décharges négatives	16
I.9.2 Formes des décharges positives	16
I.10 Conclusion	17
Chapitre II : Physique de la décharge de foudre	
II.1. Introduction	18
II.2. Rigidité diélectrique de l'air	18
II.2.1 Mécanisme de Townsend	18
II.2.1.1 Critère de Townsend	18
II.2.2 Mécanisme des canaux (streamers)	19
II.3. Tenue diélectrique de l'air en champ uniforme	22
II.4. Type de décharges	23
II.4.1. Décharges pointe-pointe	23
II.4.2. Décharges pointe-plan	23
II.4.3. Décharges plan-plan	25
II.5. Influence de la géométrie des électrodes et de la forme de la tension	26
II. 5.1 Tension continue	26
II.5.1. a. Polarité positive	26
II.5.1.b. Polarité négative	27
II.5.2 Tension impulsionnelle	27
II.5.3 Tension alternative	27
II.6. Géométrie de l'intervalle	28
II.7 Contraintes de tension	28
II.8. Rappels des différents régimes de décharge en pointe-Plan	29
II.8.1 En pointe positive	29
I.8.2 En pointe négative	29
II.9. CONCLUSION	30
Chapitre III : Etude de la foudre par simulation	
III.1. Introduction	31
III-2 Etude des générateurs d'impulsion	32
III-2-1 Représentation du générateur d'impulsions par des circuits électriques équivalents	32
III-2-2 Analyse des circuits équivalent simplifiés	33
III-2-2-a Analyse du premier circuit équivalent	33
III-2-2-b Analyse de deuxième circuit équivalent	34
III.3. Génération des ondes de choc	35
III.3.1 Principe de fonctionnement du générateur de choc	35

III-3-2 Schéma pratique d'un générateur de choc	36
III.3.3 Forme de la tension de choc délivrée	37
III.3.4. Générateur de choc réel	38
III.4 Exemple d'un modèle expérimental.....	39
III.5.Simulation Numérique.....	40
III-5-1 Etude de générateur de choc de type Marx en utilisant les circuits équivalents.....	40
III-5.2 Application sur tension réel.....	45
III-5.2.a. Onde de type (250/2500) μ s.....	45
III-5.2.b. Onde de type (1.2/50) μ s.....	45
III-6 Conclusion.....	46
Chapitre IV : Rigidité des intervalles d'air pointe – plan avec terre hétérogène	
IV.1 Introduction.....	47
IV.2 Modèles expérimentaux.....	47
IV.2.1 Cas du sol homogène.....	47
IV.2.2 Cas du sol hétérogène	47
IV.3 Détermination de la tension $U_{50\%}$	48
IV.4 Les corrections atmosphériques.....	48
IV.4.1 Influence de la densité relative de l'air.....	48
IV.4.2 Influence de l'Humidité.....	49
IV.5 Niveau de terre fictive.....	49
IV.6 tension $U_{50\%}$ pour un sol homogène bon conducteur.....	49
IV.6.1 En polarité positive.....	49
IV.6.2 En polarité négative.....	50
IV.7 Rigidité des intervalles d'air d'un sol hétérogène.....	50
IV.7.1 Influence de la distance d.....	50
IV.7.1.1 En polarité positive.....	50
IV.7.1.2 En polarité négative.....	53
IV.7.2 Influence de la conductivité.....	55
IV.7.2.1 En polarité positive.....	55
IV.7.2.2 En polarité négative.....	57
IV.7.3 Influence de la hauteur de l'intervalle d'air.....	60
IV.7.3.1 En polarité positive.....	60
IV.7.3.2 En polarité négative.....	61
IV.8 Conclusion.....	62
Conclusion générale.....	63
Annexe	
Référence bibliographique	

Liste des Figures

Figure I.1 - Différents types de décharges.....	4
Figure I.2 - Distribution des charges électriques et répartition du champ électrique dans un nuage orageux en fonction de la distance horizontale et de l'altitude.....	7
Figure I.3 - Renforcement du champ électrique au sommet d'aspérités diverse.....	8
Figure I.4 - Représentation schématique des différents coups de foudre	9
Figure I.5 - Evolution spatio-temporel d'un coup descendant et courant mesurés à la surface de la terre	11
Figure I.6 - Mécanisme d'interception de la foudre par un avion	12
Figure I.7 - Avion initiant un éclair.....	12
Figure I.8 - Intensification du champ électrique autour de l'avion	13
Figure I.9 - Les types de foudroiements de l'homme.....	16
Figure I.10 - Formes typiques des différents courants de foudre	17
Figure II.1 - Avalanche électronique	19
Figure II.2 - Schéma de développement de la décharge par avalanches photo ionisantes	19
Figure II.3 - Etapes successives de développement d'un streamer dans un gaz en configuration d'électrodes pointe - plan (a) pointe positive ; (b) pointe négative	21
Figure II.4 - Etapes de développement d'un streamer positif en champ uniforme	21
Figure II.5 - 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.....	22
Figure II.6 - Arc transféré	24
Figure II.7 - Arc non transféré (torche à plasma)	24
Figure II.8 - Décharges glissantes.....	25
Figure II.9 - Electrode de décharge à barrière diélectrique (DBD).....	25
Figure II.10 - 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.....	26
Figure III.1- Circuit équivalent d'un générateur d'impulsion en un seul étage.....	32
Figure III.2 - Circuit équivalent simplifiés d'un générateur à impulsions	32
Figure III.3 - Générateur de Marx à 3 étages.....	35
Figure III.4 - Schéma équivalent générateur multi-étages.....	35
Figure III.5 - Circuit de générateur de choc.....	37
Figure III.6 - Forme de l'onde de choc de foudre.....	38
Figure III.7- Schéma simplifié d'un étage d'un générateur de choc.....	39
Figure III.8 - Configuration du système tige-plan avec sol homogène bon conducteur.....	40
Figure III.9 - Schéma équivalent du générateur de Marx à trois étages.....	40
Figure III.10 - Schéma simplifié du générateur choc.....	41
Figure III.11 - Bloc diagramme permettant le calcul des paramètres du schéma équivalent du générateur de Marx.....	44
Figure III.12 - Tension de générateur de choc pour une onde (250/2500) μ s avec une tension crête de 1870kV.....	45
Figure III.13 - Tension de générateur de choc pour une onde (1.2/50) μ s avec une tension crête de 600kV.....	46
Figure IV.1- Configuration du system tige-plan avec sol homogène mauvais conducteur.....	47

Liste des Figures

Figure IV.2 - Configuration du système tige-plan avec sol hétérogène.....	48
Figure IV.3 - Système tige-plan avec sol conducteur équivalent au système avec sol mauvais conducteur.....	49
Figure IV.4 - U_{50} en fonction de la distance dans le cas de la tige positive.....	51
Figure IV.5 - U_{50} en fonction de la distance dans le cas de la tige positive.....	51
Figure IV.6 - U_{50} en fonction de la distance dans le cas de la tige positive.....	52
Figure IV.7 - U_{50} en fonction de la distance dans le cas de la tige positive.....	52
Figure IV.8 - U_{50} en fonction de la distance dans le cas de la tige Négative.....	53
Figure IV.9 - U_{50} en fonction de la distance dans le cas de la tige Négative.....	53
Figure IV.10 - U_{50} en fonction de la distance dans le cas de la tige Négative.....	54
Figure IV.11 - U_{50} en fonction de la distance dans le cas de la tige Négative.....	54
Figure IV.12 - U_{50} en fonction de la conductivité dans le cas de la tige positive.....	55
Figure IV.13 - U_{50} en fonction de la conductivité dans le cas de la tige positive.....	56
Figure IV.14 - U_{50} en fonction de la conductivité dans le cas de la tige positive.....	56
Figure IV.15 - U_{50} en fonction de la conductivité dans le cas de la tige positive.....	57
Figure IV.16 - U_{50} en fonction de la conductivité dans le cas de la tige Négative.....	57
Figure IV.17 - U_{50} en fonction de la conductivité dans le cas de la tige Négative.....	58
Figure IV.18 - U_{50} en fonction de la conductivité dans le cas de la tige Négative.....	58
Figure IV.19 - U_{50} en fonction de la conductivité dans le cas de la tige Négative.....	59
Figure IV.20 - U_{50} en fonction de l'intervalle dans le cas de la tige positive.....	60
Figure IV.21 - U_{50} en fonction de l'intervalle dans le cas de la tige Négative.....	61

Liste des Tableaux

Tableau II.1 - Rigidité diélectrique relative de quelques gaz par rapport à l'air dans un champ uniforme.....	22
Tableau IV.1 - $U_{50\%}$ en fonction de h, intervalle tige positive-plan, sol homogène.....	49
Tableau IV.2 - $U_{50\%}$ en fonction de h, intervalle tige positive-plan, sol homogène	50

Table de nomenclature

C : la capacité d'un condensateur sphérique.

R_t : Rayon de la terre.

R_e : Rayon de l'électrosphère.

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.

L_4 : Représenté l'inductance de l'élément en test et peut affecter sensiblement la forme d'onde.

T.R : Transformateur de réglage.

T.H.T: Transformateur de Haute Tension.

D : Redresseur.

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

δ : densité relative par rapport à l'air

Introduction Générale

Introduction générale

L'homme a été depuis toujours impressionné par le phénomène de décharge de foudre et a donné plusieurs interprétations. 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 [1].

Le coup de foudre est une décharge électrique qui se produisant dans un grand intervalle d'air dont les électrodes sont d'une part un nuage orageux chargé et d'autre part la terre [2]. L'étude de la foudre in-situ est très délicate à mener vu l'aspect aléatoire qui caractérise ce phénomène et l'impossibilité de contrôler l'instant et le lieu où elle peut « frapper » [3]. Malgré le grand nombre de recherches sur la foudre, elle reste scientifiquement assez mal connue car elle est brève et imprévisible, son étude en laboratoire est donc difficile. Bien qu'il soit possible depuis quelques années de déclencher artificiellement la foudre. Dans les grands laboratoires on provoque le coup de foudre artificiellement pour étudier ce phénomène et pour répondre beaucoup de questions restent encore sans réponses.

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 à elles seules déterminer les caractéristiques constructives des isolations autorégénératrices, 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'Ecole Nationale Polytechniques d'Alger ont montré que les propriétés électrogéologiques du sol ont une grande influence sur la valeur de la tension $U_{100\%}$ [3].

Ce mémoire est composé de quatre chapitres de la manière suivante :

- Dans le premier chapitre, on traite la physique de la décharge de foudre, on rappelant les différents types de décharge et les phénomènes précurseurs ainsi que les étapes de déroulement d'un coup de foudre.
- Dans le deuxième chapitre, nous essayons de présenter les concepts de base concernant la rigidité diélectrique et les mécanismes de décharge disruptive dans l'air.
- Dans le troisième chapitre, nous allons présenter l'étude par simulation du choc de foudre, aussi bien expérimentale à l'aide d'un générateur de choc que numérique.
- Dans le dernier chapitre nous allons étudier l'influence de l'hétérogénéité de la terre sur la rigidité des intervalles d'air en système tige-plan.

Chapitre I

I.1.Introduction

L'étude de la physique du phénomène de foudre n'est pas encore maîtrisée et beaucoup de questions restent encore sans réponses. De plus, les essais en grandeur nature sont lourds à mettre en œuvre. C'est pourquoi, disposer d'un modèle de décharge de foudre négative permettant de prédire ses différentes caractéristiques serait très utile pour le dimensionnement des structures et la protection des biens et des personnes contre les effets directs et indirects de la foudre. La grande similitude entre les phénomènes de décharge de foudre et la décharge d'étincelle de laboratoire nous permet d'étendre et d'appliquer le modèle moyennant l'adaptation de certains paramètres au cas des décharges de foudre réelle. Avant de procéder à l'extension de l'étude de la décharge de foudre négative, nous rappelons d'abord l'état de l'art dans le domaine de la décharge de foudre dans les deux polarités, tant du point de vue des connaissances théoriques que des résultats expérimentaux. Une description des différents aspects phénoménologiques caractérisant les décharges atmosphériques est faite afin de comprendre les différentes phases de leur développement et d'en tenir compte dans le modèle de protection.

I.2. Historique

I.2.1 L'époque des croyances

Les traces laissées à travers les siècles par les différentes civilisations comportent pratiquement toutes des représentations plus ou moins évidentes de la foudre. Bien que des peintures rupestres comportent des symboles pouvant être attachés au phénomène de foudre, les historiens situent la première représentation de la foudre durant la première époque de Babylone. Pour les Grecs, la foudre était la manifestation de la colère de Zeus (Roi des dieux dans la mythologie grecque). Il en était de même pour les romains avec leur Dieu Jupiter. D'autres croyances sont beaucoup plus poétiques. Ainsi le peuple Basutos en Afrique pense que la foudre est un oiseau magique, nommé Umpudolo qui plonge des nuages vers le sol [4]. Plus tard, au Moyen Age, l'église et son idéologie vont s'emparer de ce phénomène naturel : être victime de la foudre était alors considéré comme un châtement. De nombreux saints sont invoqués pour se protéger contre cette punition divine.

I.2.2 Les premières recherches

L'histoire de la foudre et celle de l'électricité se rejoignent au XVIII^e siècle. En 1745 [4], l'invention de la bouteille de Leyde va faire progresser les études théoriques sur l'électricité. Cet ancêtre du condensateur permet en effet de provoquer des étincelles beaucoup plus violentes que les machines électrostatiques utilisées jusque-là. Ces décharges électriques, s'accompagnent également de détonations relativement intenses. Le rapprochement avec le phénomène foudre est alors très vite envisagé par un bon nombre de scientifique. En 1748 [4], l'abbé Nallet dresse une liste de similitudes entre la foudre et les décharges électriques.

D'autres études du même type sont publiées à la même époque. Le 07 novembre 1749 [4], une étude comparative et très complète a été publiée par un scientifique américain dont le nom restera lié à la foudre : Benjamin Franklin. Ses travaux vont se poursuivre et il décrira, dans un mémoire datant de

l'été 1750, une expérience permettant de démontrer la nature électrique du nuage orageux. L'idée de l'expérience de cerf-volant était née. C'est en 1752 que Benjamin Franklin réalise sa fameuse expérience. Son objectif était de déterminer si les éclairs étaient un phénomène électrique. Franklin et son fils de 21 ans William, construisent un cerf-volant, formé de deux bandes légères de cèdre, en croix attachées à un mouchoir en soie. Ils attachent un long fil métallique en haut du cerf-volant pour attirer l'électricité. Ils fixent également une ficelle au cerf-volant afin de le tenir, et Franklin père noue un ruban de soie sur la ficelle, près de la région qu'il tient à la main. Une clé, en fin, est rattachée au ruban, ainsi qu'une bouteille de Leyde. Benjamin Franklin réalise son expérience sous le pas d'une porte, de façon à ce que le ruban de soie attaché à la clé et à la bouteille de Leyde ne soit pas mouillé par la pluie.

Une fois le protocole de l'expérience élaboré, les deux hommes attendent l'arrivée d'un orage. Comme Franklin l'avait prédit lorsque des nuages passent au-dessus du cerf-volant, des charges négatives traversent le fil métallique du cerf-volant et parviennent jusqu'à la clé. La charge rentre dans la bouteille de Leyde, ce qui démontre clairement la présence d'électricité.

Franklin tenait le cerf-volant par le tissu de soie isolant : il était ainsi protégé de l'électricité. Mais quand il tend son doigt pour toucher la clé, il reçoit un choc dû aux charges négatives de la clé ; elles sont assez fortes pour qu'une étincelle saute de la clé à sa main. Par miracle, cette charge n'était pas assez forte pour être mortelle. Dans d'autres circonstances, le coup d'éclair aurait pu tuer instantanément les deux individus. L'expérience Franklin a montré avec succès que les éclairs étaient en fait de l'électricité statique.

I.3 Electricité atmosphérique

I.3.1 Le condensateur terrestre

La terre et l'électro-sphère (couche de la haute atmosphère ionisée et située à environ 50 km d'altitude) peuvent être considérées comme les armatures d'un gigantesque condensateur sphérique. Entre les deux, la troposphère et la stratosphère constituent le diélectrique [5]. On peut donc assimiler le système électro sphère – globe terrestre à un condensateur sphérique dont la capacité est donnée par la relation suivante [6] :

$$C = \frac{2\pi\epsilon_0}{\frac{1}{R_t} - \frac{1}{R_e}} \quad (\text{I.1})$$

I.3.2 Différents types de décharges

La foudre est un ensemble de phénomènes physiques et électriques complexes qui se présentent dans la nature sous différentes formes :

Les décharges entre nuage (Figure.I.1.a).

Les décharges à l'intérieur du nuage ou intra-nuages (Figure.I.1.b).

Les décharges entre nuage et terre, sont les coups de foudre (Fig.I.1.c).

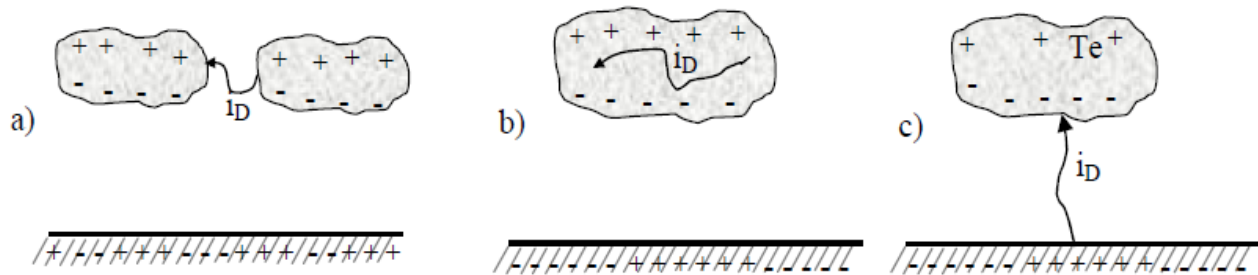


Figure I.1 - Différents types de décharges [7]

I.3.2.1 Décharges intra – nuages

Contrairement aux décharges nuage - sol, la décharge intra - nuages (Figure.I.1.a) est de loin la plus fréquente mais la moins étudiée. Elle se présente sous la forme d'une succession d'arcs électriques qui se tendent entre une ou plusieurs poches de charges opposées contenues dans un même nuage. En règle générale, ces arcs sont fortement ramifiés et se produisent à l'intérieur du nuage. Mais il arrive parfois qu'ils sortent du nuage pour y revenir en passant par l'extérieur, formant ainsi une espèce de pont très lumineux et visible de la terre. La durée de ces décharges est de l'ordre de plusieurs centaines de millisecondes et leurs effets sont plutôt minimes [8].

I.3.2.2 Décharges entre nuages

Ces décharges se développent entre deux ou plusieurs nuages orageux différemment chargés se trouvant à une distance telle que l'ionisation de l'air qui les sépare devient possible (Figure.I.1.b).. Elles se produisent généralement à de très grandes altitudes, et elles sont d'autant plus fréquentes que la densité de l'air est faible. Ces décharges inquiètent surtout les engins aéronautiques et les systèmes de transmission par satellite.

I.3.2.3 Décharges nuage – sol

Parmi toutes les formes de décharges atmosphériques, la décharge nuage - sol (Figure.I.1.c) est la moins fréquente mais certainement la plus contraignante et la mieux étudiée. Elle représente à peu près le tiers de la totalité des décharges atmosphériques que connaît le globe terrestre. Ce pourcentage est fonction des conditions météorologiques et physiques (humidité, température, localisation des charges dans le nuage,...), et enfin de l'altitude. Elle se présente sous la forme d'une succession de décharges "nuage - sol - nuage" appelées coups de foudre [9].

I.4 Physique des phénomènes orageux

I.4.1 Distribution statistique des orages - Niveau kéraunique

Il est d'usage universel de caractériser la sévérité orageuse d'une région par son niveau Kéraunique (keraunos est la foudre en grec). La simplicité même de cette définition a permis l'établissement de statistique, à partir de renseignements fournis par les bonnes volontés locales, qui rendent d'appréciables services, cependant cette donnée est peu précise [8].

I.4.2 Définition du foudroiement

Une mesure utilisable de la sévérité orageuse, car elle ne donne aucune indication sur l'existence des zones localisées particulièrement foudroyées, et encore moins sur l'intensité des coups de foudre. Une définition bien plus rigoureuse de la sévérité orageuse peut être atteinte par la sévérité du foudroiement, par exemple la densité de coups de foudre au sol, exprimée en nombre de coups par kilomètre carré et par an [10].

I.4.3 Densité réelle de coups de foudre

Aujourd'hui, des systèmes de détection d'orages plus précis peuvent donner des informations intéressantes, la densité du coup de foudre au sol est aussi déterminée avec plus de précision et des informations sur l'amplitude de ces coups de foudre sont aussi disponibles, bien que ces systèmes soient une évolution (moyens matériels, nombre de capteurs, durée totale de fonctionnement). Les valeurs fournies par ces systèmes sont nettement plus précises, que n'importe quelle carte de niveau kéraunique [10].

I.4.4 Facteurs locaux influant sur le foudroiement

On peut se demander s'il existe des zones localisées particulièrement foudroyées communément appelées nids d'orages. L'existence de ces zones est souvent rapportée par la population locale, par les on-dit, mais n'a jamais fait l'objet de statistiques sérieuses. A la lumière des connaissances acquises, il pourrait être raisonnable de penser à trois facteurs locaux possibles [9].

a) Facteurs topologiques

Des zones préférentielles peuvent exister du simple fait de conditions privilégiées de formation des nuages orageux, sous l'effet combiné du sol et d'un réchauffement local ; il y'a alors formation puis ascension d'une masse d'air chaude et humide. Comme l'air transmet très mal la chaleur, cette bulle chaude s'élève, pratiquement isolée thermiquement de l'air environnant, et forme un nuage orageux aux altitudes où la condensation commence.

Par ailleurs, des mouvements d'air, canalisés par des vallées ou des fleuves, et qui entraînent les nuages orageux, favorisent l'existence de couloirs orageux. Ainsi, ce ne sont pas toujours les points les plus élevés qui sont les plus frappés par la foudre. En montagne, les versants des vallées sont souvent plus foudroyés que les sommets

b) Facteurs géologiques

Le point d'impact exact d'un coup de foudre ne semble se déterminer que dans la partie la plus inférieure de sa trajectoire ; la partie supérieure, au-delà d'une centaine de mètres au-dessus du sol, se développe de façon totalement indépendante de la structure géométrique ou géologique de ce dernier. Ce ne sont donc que des facteurs tout à fait locaux qui peuvent avoir une action sur la décision de l'impact. La présence de saillies, arbres, bâtiments, cheminées est bien connue comme étant l'un de ces facteurs. Mais la conductivité des sols pourrait être un autre facteur important [10,8].

c) Concentration ionique de l'air (conductivité de l'air)

La concentration en ions de l'air (ou sa conductivité) a parfois été invoquée pour expliquer un nid d'orages. Mais, même aujourd'hui, il n'existe pratiquement pas de données expérimentales à partir d'observations sur le terrain.

Les études de laboratoire sur les mécanismes de décharges de l'air n'ont pas mis en évidence, jusqu'à présent, un effet de cette conductivité, par exemple en favorisant le trajet de la décharge. Les théories actuellement disponibles montrent d'ailleurs que le taux d'ions dans l'air devrait être considérablement plus élevé que sa mesure dans les conditions naturels.

I.4.5 Nuage orageux

Les nuages orageux sont d'énormes masses en forme d'enclume, les cumulo-nimbus, qui occupent une surface de plusieurs dizaines de kilomètres carrés. Leur épaisseur peut atteindre plusieurs kilomètres, l'extrémité inférieure étant située à une altitude d'environ 2 km [11,12]. Selon la nature des régions (conditions de température, de pression et d'humidité)

où ils se forment, les nuages sont classés en deux catégories :

Les nuages de chaleur qui se développent dans les régions tropicales. La combinaison d'une très forte humidité de l'atmosphère et de réchauffements locaux du sol engendrent la formation d'une masse d'air à la fois chaude et humide pratiquement isolée thermiquement de l'air environnant laquelle, sous l'action de courants atmosphériques, prend un mouvement ascendant. La température diminuant en fonction de l'altitude par rapport au sol, cette masse d'air se condense lorsqu'elle atteint environ 2 km et forme le nuage orageux.

Les nuages orageux qui résultent dans les régions à climat tempéré, de la rencontre entre deux masses d'air importantes ayant des températures et des pressions différentes. Cette rencontre produit également des courants ascendants accompagnés de condensation. Contrairement aux nuages de chaleur dont la durée n'excède pas une heure et demie, les nuages ainsi formés peuvent subsister plusieurs jours et se propager sur des milliers de kilomètres. Parallèlement à ces phénomènes thermodynamiques, il se produit une séparation des charges électriques au sein du nuage. Il n'existe pas encore de théorie satisfaisante pour expliquer les faits observés : la partie supérieure du nuage, constituée de cristaux de glace, est chargée positivement, tandis que la partie inférieure, constituée de gouttelettes d'eau, est chargée négativement. Souvent, un îlot de charges positives est inclus dans cette masse négative. Le nuage constitue ainsi un véritable dipôle dont la charge totale, distribuée dans le volume de 50Km^3 , peut atteindre plusieurs dizaines de milliers de coulombs [11]. Cette séparation de charge crée des contraintes électriques entre les différentes couches intérieures du nuage ainsi qu'entre sa partie inférieure et le sol (Figure I.2). Lorsque la valeur limite de claquage dans l'air est atteinte, il se produit une décharge électrique à l'intérieur du nuage ou entre nuages (les éclairs), ou encore entre le nuage et le sol (la foudre).

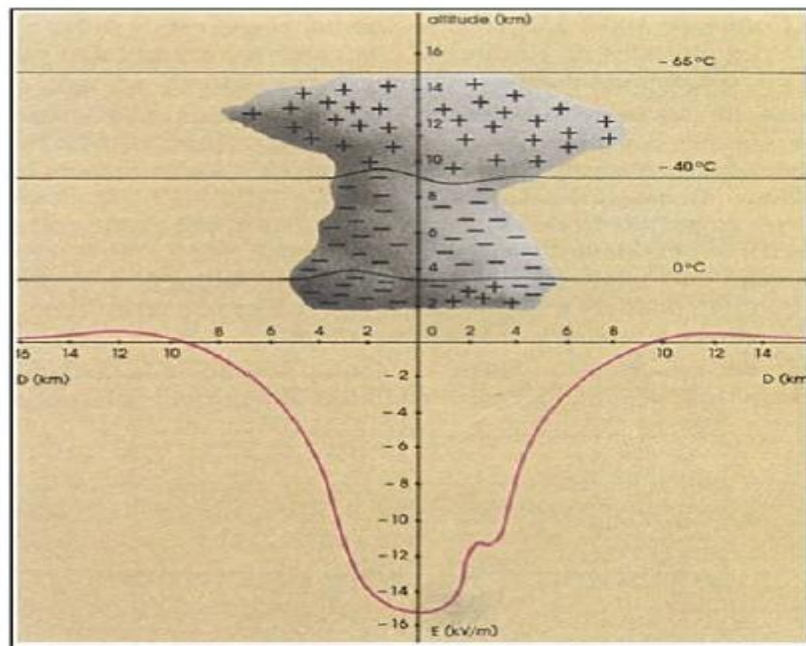


Figure I.2 - Distribution des charges électriques et répartition du champ électrique dans un nuage orageux en fonction de la distance horizontale et de l'altitude [6]

Au moment de la formation du nuage orageux et sous l'influence de la charge négative disposée à sa base, dont l'effet devient prépondérant, le champ électrique au sol commence à s'inverser. Lorsque son amplitude atteint 10 à 15 kV/m, une décharge au sol est imminente. Cette inversion du champ électrique, suivie d'une forte croissance de son module, est donc le signe annonciateur de la foudre [6].

I.4.6 Effet couronne au sol et ionisation

Les valeurs du champ électrique au sol cités ci-dessus, prises dans un sol horizontal plat, les reliefs et proéminences modifient fortement cette situation. On sait que toute aspérité par effet de concentration des lignes de force et de tassement des surfaces équipotentielle peut augmenter considérablement le champ superficiel local.

On peut calculer qu'au sommet d'une ellipsoïde le champ est multiplié par 700 par rapport à un champ moyen (Figure I.3)

Comme l'air atmosphérique s'ionise à partir d'un seuil de 30 kV/cm, alors dans les conditions particulières, il suffit d'un champ ambiant de 4 à 5 kV par mètre pour provoquer un effet couronne au sommet de l'ellipsoïde [8].

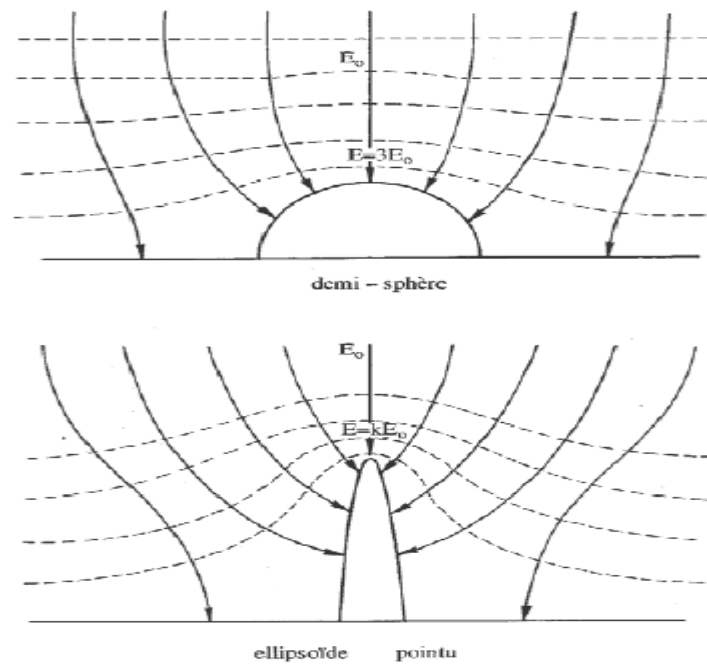


Figure I.3 - Renforcement du champ électrique au sommet d'aspérités diverses [8].

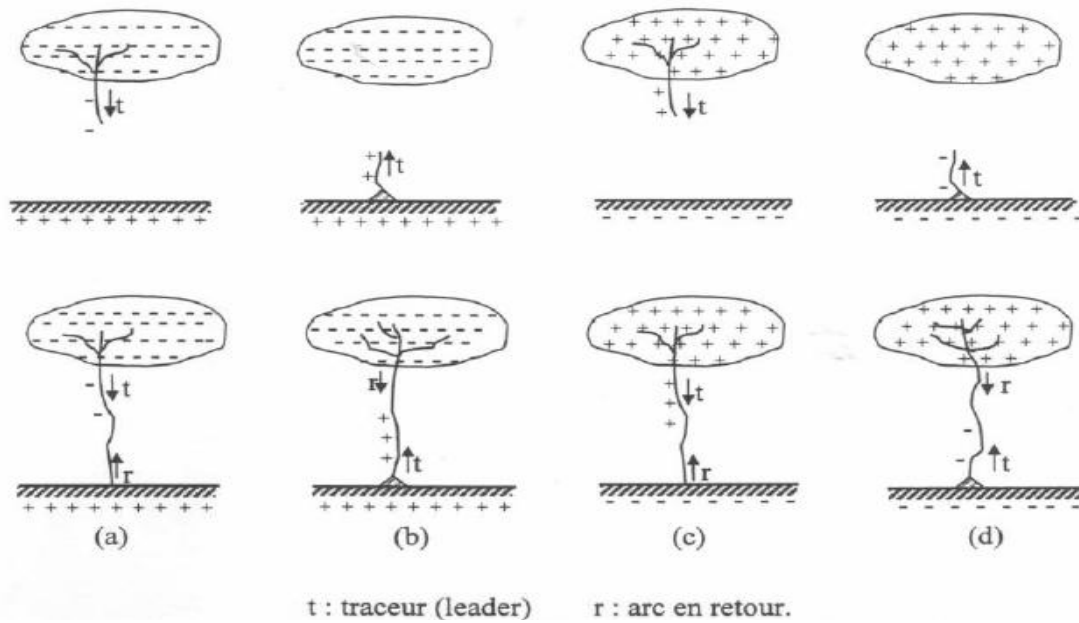
I.5 Classification et description des coups de foudre

I.5.1 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 [5,13].

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 (Figure. I. 4)



- (a) - Coup de foudre du type descendant négatif
 (b) - Coup de foudre du type ascendant positif
 (c) - Coup de foudre du type descendant positif
 (d) - Coup de foudre du type ascendant négatif

Figure I.4 - Représentation schématique des différents coups de foudre [14]

- Les configurations (a) et (b) sont les plus fréquentes, 80 à 90 % dans les régions tempérées
- La configuration (c) présente 10 à 20 % des cas.
- La configuration (d) est extrêmement rare [5,13].

I.5.2. Déroulement d'un coup de foudre

I.5.2.1. 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 $(2.10^4 \text{ à } 6.10^4) \text{ m/s}$ [8].

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 [5].

I.5.2.2. Coup de foudre descendant

L'inverse du traceur positif, le traceur d'un coup de foudre descendant négatif [5,15] 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 pré 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 (dart 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 (I.5) montre l'évolution temporelle d'un coup de foudre descendant négatif.

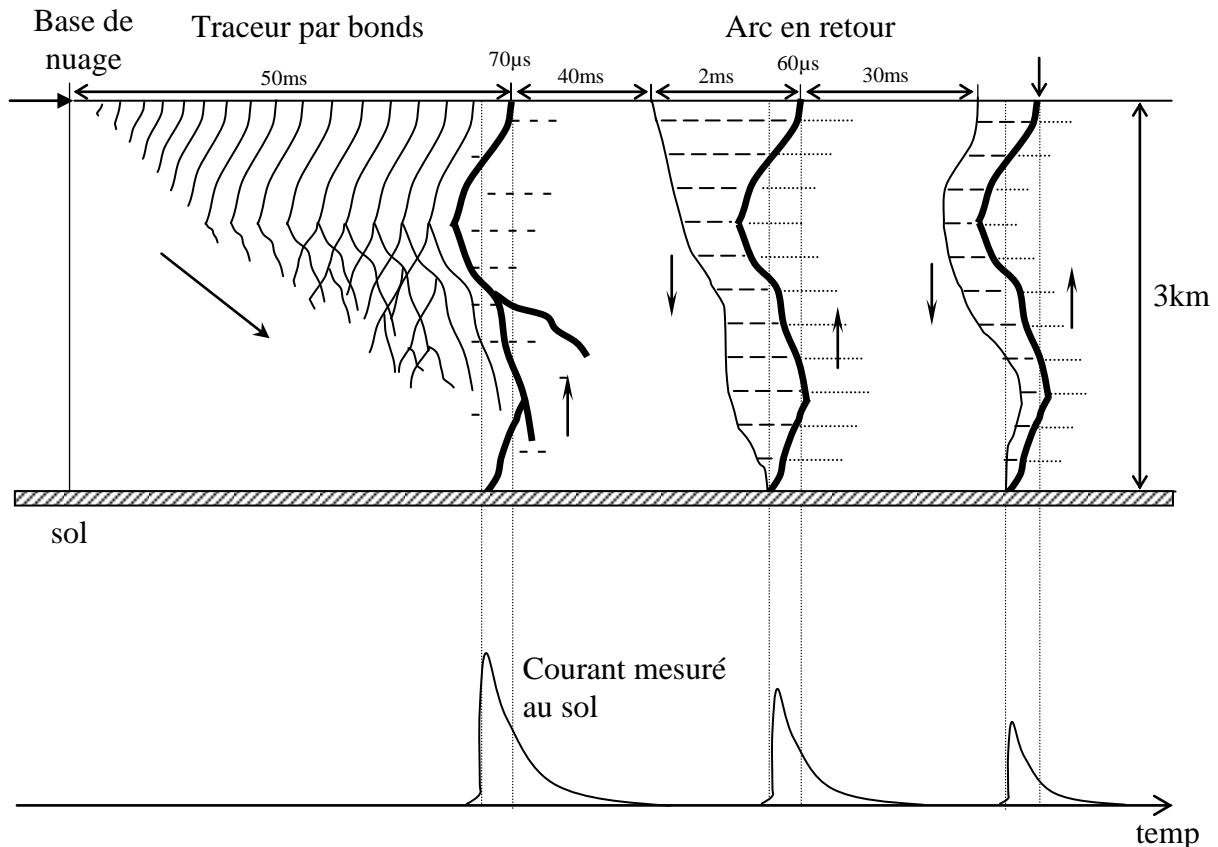


Figure I.5 - Evolution spatio-temporelle d'un coup descendant et courant mesuré à la surface de la terre [15]

I.6. Processus d'accrochage de la foudre sur un aéronef

I.6.1 Les différents types de couplage [16]

La connaissance des phénomènes de couplage de la foudre avec un avion est issue de tests au sol mais aussi d'expérimentations en vol. Comme il a été dit précédemment, le foudroiement d'un avion n'est pas un évènement marginal car, en moyenne, un avion de ligne est foudroyé une fois toutes les 1500 heures de vol. Deux scénarii de couplage de la foudre avec un aéronef se distinguent : soit l'avion intercepte un éclair existant dont la naissance est totalement indépendante de la présence de l'avion, soit l'avion joue un rôle dans la création du traceur et initie les arcs électriques.

Le mécanisme du premier cas de foudroiement est présenté en (Figure I.6).

1. l'avion se charge positivement du fait de la proximité du traceur descendant négatif.
2. le leader se connecte à l'avion, puis poursuit sa progression vers le sol.
3. lorsque l'arc en retour se forme, il traverse l'avion qui fait partie du canal ionisé.

Ce type d'évènement ne représente que 10% des cas de foudroiement des avions. La seconde catégorie repose sur le fait que, localement, la présence de l'avion augmente sensiblement la valeur du champ électrique. Si cette augmentation atteint le niveau de claquage, l'éclair produit est initié par l'avion (Figure I.7).

Un traceur se forme et a la particularité d'être bidirectionnel. Le champ électrique extérieur induit des charges aux extrémités de l'avion. Le traceur positif émane de l'avion, provoquant une perte de charges positives (1) et le traceur négatif (ou streamer) se propage par bonds successifs (2). Les

signes de ces deux traceurs sont liés à l'orientation du champ électrique dans lequel est placé l'avion. Ensuite, les phénomènes produits sont identiques à ceux présentés précédemment,

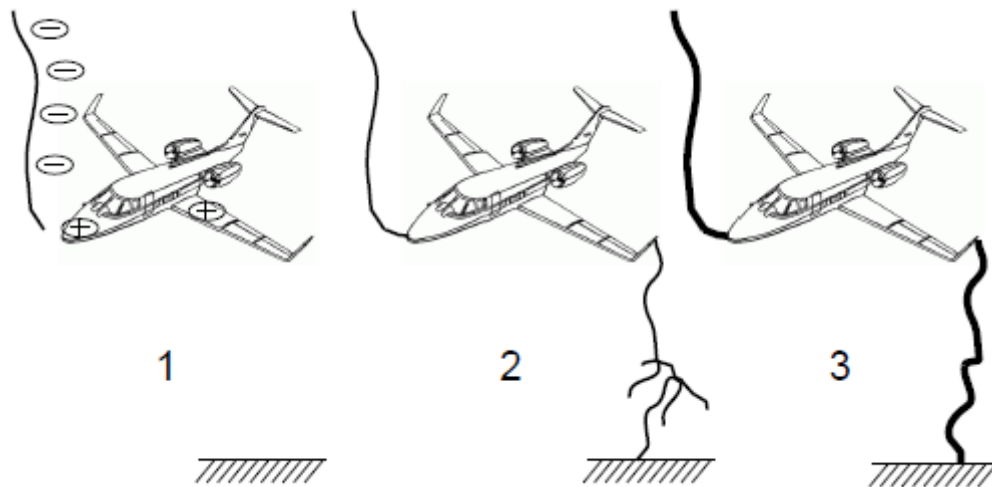


Figure I.6 - Mécanisme d'interception de la foudre par un avion [16]

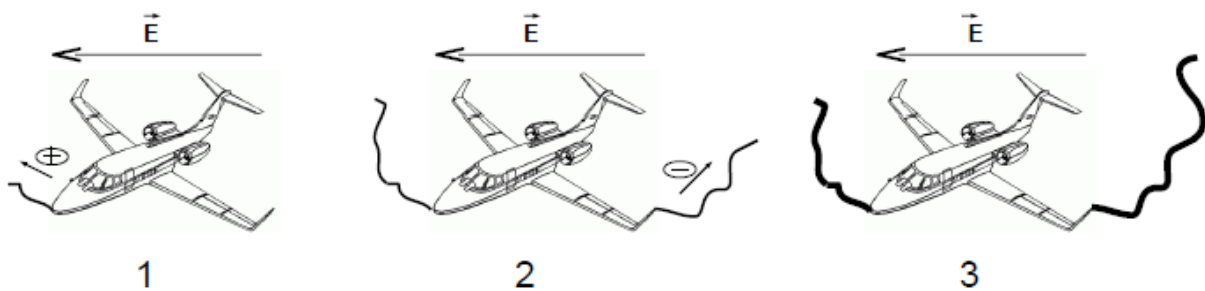


Figure I.7 - Avion initiant un éclair [16]

c'est-à-dire la création d'une décharge électrique provoquant le passage d'un fort courant dans l'avion (3).

I.6.2 Le zoning

Dans les exemples précédents, nous considérons comme point d'entrée de la foudre le nez de l'avion et comme point de sortie une aile. Des études permettent de distinguer quelles zones de l'aéronef sont les plus susceptibles d'être des points d'entrée et de sortie de la foudre : c'est le zoning. Globalement, les régions les plus fréquemment concernées sont les extrémités, à savoir les ailes, le nez, l'empennage, la dérive et les moteurs. En effet, les extrémités sont les zones dans lesquelles le champ électrique est le plus fort, là où les surfaces équipotentielles sont les plus concentrées (Figure I.8). Ainsi, à l'approche du traceur, l'air s'ionise aux zones proches de l'avion où le champ électrique est le plus élevé (les extrémités), et les streamers se forment, indiquant la direction de l'éclair qui le traversera. Néanmoins, la foudre ne s'attache pas forcément à l'avion en seulement un point d'entrée et un point de sortie. En effet, pendant la durée du processus d'attachement (jusqu'à une seconde),

l'avion parcourt une distance non négligeable, modifiant sa position par rapport au canal foudre. Ainsi, de nouveaux points d'attachement apparaissent, multipliant donc les chemins parcourus par le courant dans l'avion : c'est le phénomène de swept channel. D'un point de vue normatif, les courants liés aux décharges des arcs sont associés à des formes d'onde particulières. Il en résulte une approche normative du zoning, spécifiant quelles zones de l'avion sont susceptibles d'être parcourues par telle ou telle forme d'onde [16].

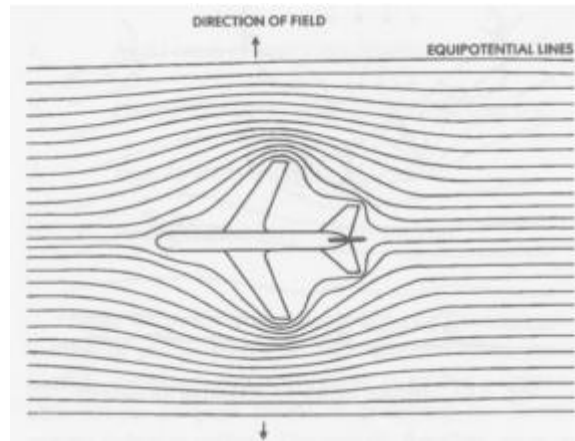


Figure I.8 - Intensification du champ électrique autour de l'avion [16]

I.6.3 Quand un avion risque-t-il le plus d'être foudroyé ?

Les aéronefs sont susceptibles d'intercepter les trois types de décharges évoqués en (I.3.2) : nuage-sol, inter nuage et intra nuage. En effet, pendant les périodes de décollage et d'atterrissage, l'avion peut se situer entre le sol et un cumulonimbus mature ou à l'intérieur même d'un nuage de foudre. 75% des foudroiements référencés se produisent lors de la montée vers l'altitude de croisière, lors de la descente et à l'approche de la piste d'atterrissage. Durant le vol à l'altitude de croisière, les foudroiements sont plus rares pour deux raisons principales : les longs courriers ont un niveau de vol au-dessus des cumulonimbus (environ 12000 mètres) et il est plus facile de contourner les zones d'orages pendant cette phase que lors du décollage ou de l'atterrissage.

De plus, les relevés montrent que les aéronefs sont foudroyés principalement entre 1000 et 6000 mètres d'altitude, soit jusqu'au centre d'un cumulonimbus mature situé au niveau des zones de décollage et d'atterrissage [16].

I.7. Les effets de la foudre

Les effets de la foudre sont liés aux caractéristiques du courant de foudre, et par conséquent on peut s'attendre aux effets suivants:

a) Effet thermique [13]

L'intégrale d'action permet de calculer l'énergie libérée par une charge située au point de chute de la foudre, si l'on connaît sa résistance équivalente. Dans la mesure où cette résistance reste constante, l'énergie dissipée s'écrira :

$$W = R \int_{t_i}^{t_f} i^2 dt \quad (\text{I.2})$$

où t_i et t_f sont respectivement le temps initial et final du phénomène.

Des effets thermiques importants apparaissant donc surtout en des points de fortes résistances, comme dans les mauvais conducteurs, où beaucoup d'énergie est libérée sous forme de chaleur par le passage de courant.

b) Effet électrodynamique

Des effets mécaniques plus au moins importants peuvent se produire, là où des parties du chemin parcouru par la foudre se trouvent dans un champ magnétique d'une autre partie. Dans ce cas, plus l'écart entre ces parties est faible, plus les effets deviennent grands [13].

c) Effets conduits ou rayonnés

La mauvaise cohérence de raisonnement entre paratonnerre, descente et prise de terre fait que sur une infrastructure existante, en plus des perturbations rayonnées, des perturbations conduites sont captées par induction sur les circuits intérieurs.

Lorsque la foudre tombe directement sur le sol ou lorsqu'elle est captée par un dispositif de capture, l'écoulement du courant qui s'ensuit va provoquer des montées de potentiel des terres locales, liées au fait que ces dernières ne sont pas parfaites [15].

d) Effets chimiques

La décharge électrique de l'éclair apporte une énergie suffisante pour que la réaction chimique suivante ait lieu à partir de l'oxygène de l'air O_2 [6].



Où : h : constante de Planck : $6.63 \times 10^{-34} \text{ m}^2 \text{ kg} / \text{s}$

ν : Fréquence de l'onde lumineuse.

e) Effets acoustiques

Le déclenchement extrêmement rapide du premier arc en retour génère une chaleur considérable (30000 K) et une pression très élevée du canal de foudre (2 atmosphères et plus). Il est à l'origine des ondes de choc, elle-même à l'origine de l'onde sonore (tonnerre). Le niveau de pression acoustique peut atteindre 155 dB [8].

f) Effets électromagnétiques

La foudre génère des ondes électromagnétiques à large spectre de fréquence (kHz à MHz) qui atteint les fréquences de transmission radiophoniques provoquant ainsi des perturbations radiophoniques [8]

g) Effets sur un être vivant (humain ou animal)

Le passage d'un courant d'une certaine intensité, pendant une courte durée suffit à provoquer des risques d'électrocution par arrêt cardiaque ou arrêt respiratoire. A cela s'ajoutent les dangers de brûlures.

I.8. Types de foudroisement de l'homme

a) Le coup de foudre "direct"

La Figure (I.9.a) donne le courant de foudre "entre" par la partie supérieure d'une personne et s'écoule au sol en passant par les membres inférieurs ;

b) Le foudroisement par éclair "latéral"

Dans la Figure (I.9.b) le courant de foudre descend par un élément faiblement conducteur avant de choisir un chemin de moindre résistance qui peut être une personne se situant à proximité ;

c) Le foudroisement par "tension de pas"

Lorsque la foudre frappe un point au sol, on a alors une différence de potentiel suffisante pour générer un courant passant par les membres inférieurs d'un individu (Figure I.9.c).

d) Le foudroisement par "tension de toucher"

La tension de toucher intervient comme mécanisme de foudroisement lorsqu'une personne touche un objet conducteur lui-même parcouru par un courant de foudre (Figure I.9.d)

e) Le foudroisement par "courant induit"

La Figure (I.9.e) illustre un foudroisement par captage capacitif d'une des ramifications d'un coup de foudre descendant

f) Le foudroisement par "différence d'impédance"

Avec le milieu ambiant. Par exemple une personne dans une piscine présente une impédance de plus faible valeur que le milieu ambiant et sera ainsi parcourue par un courant plus fort.

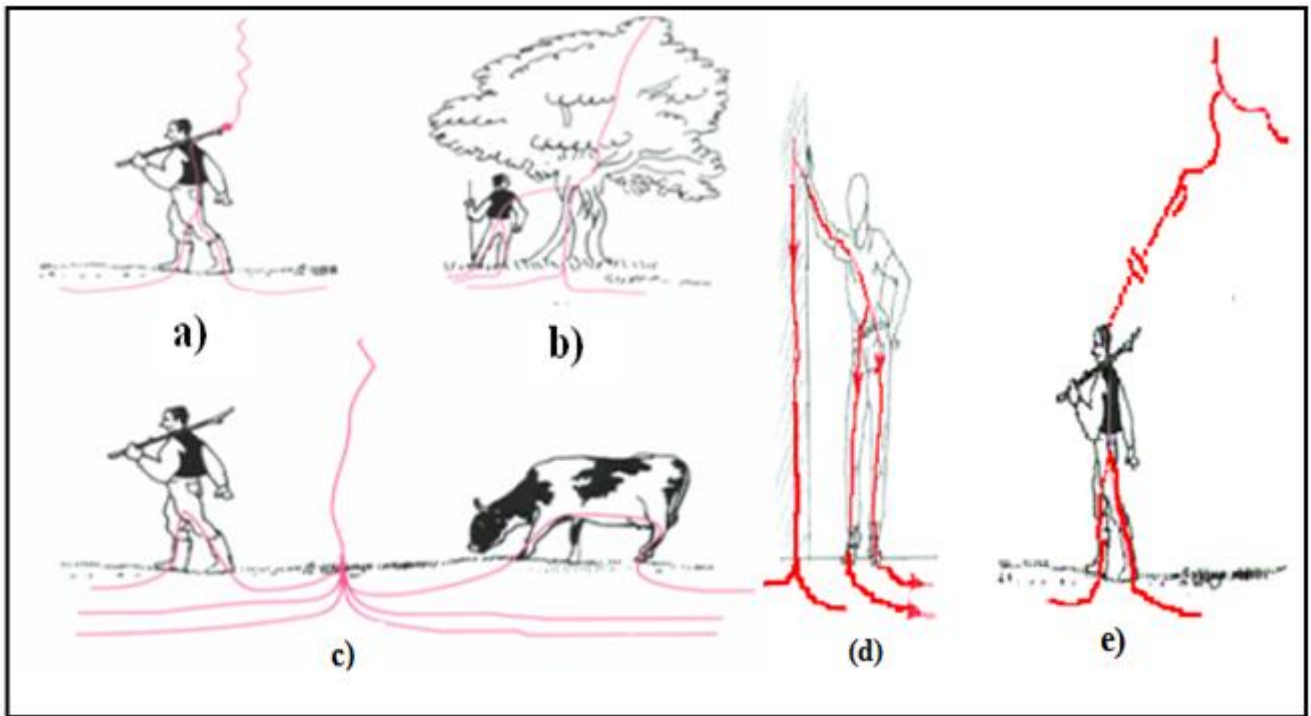


Figure I.9 - Les types de foudroiements de l'homme [8]

I.9 Formes et amplitudes des impulsions des coups de foudre

I.9.1 Formes des décharges négatives

Les courants des coups de foudre négatifs offrent une grande variété de combinaisons de courants impulsionnels et de courants persistants. Le courant d'un coup de foudre complet présente plusieurs impulsions, et on distingue le premier coup et les coups subséquents (Figure I.5).

Le premier coup se caractérise par un temps de montée de zéro jusqu'à la valeur de crête de l'ordre de 10 à 20 ms, une durée de queue de l'ordre d'une centaine de microsecondes et une amplitude variant entre 3 et 200 kA [8].

Pour les coups subséquents la durée de front est très courte, inférieure à 1 ms, mais la queue de l'onde est bien plus régulière que dans la première décharge, leur amplitude est inférieure à celle de la première décharge, dépassant rarement 20kA (Figure I.5) [5,8].

I.9.2 Formes des décharges positives

Le coup de foudre positif (Figure I.10) est constitué d'une seule impulsion qui dure de 0.1 à 0.2s (très supérieure à celle du coup de foudre négatif), à durée du front qui varie entre 20 et 50 μ s, cependant ils sont plus violents ; l'amplitude du courant peut atteindre des très fortes valeurs supérieures à 100kA [5,13].

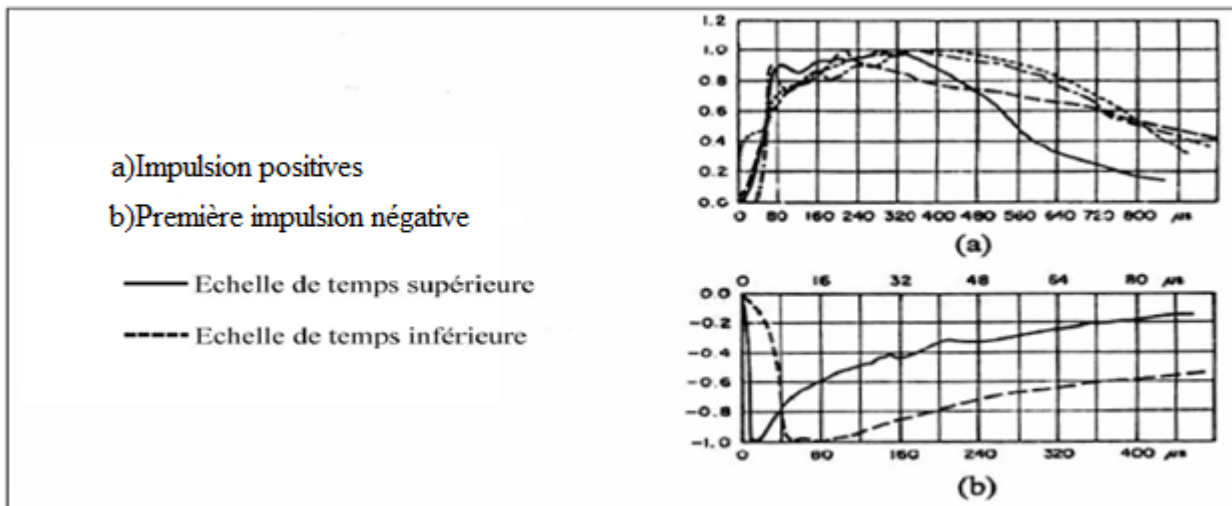


Figure I.10 - Formes typiques des différents courants de foudre [5]

I.10 Conclusion

La foudre est un phénomène naturel aléatoire dont le champ joue un rôle important lors de sa propagation. Les dangers et dégâts que peut causer la décharge de foudre, nécessitent l'emplacement de dispositifs de protection tel que le paratonnerre. La connaissance de la physique de la décharge de foudre est très importante pour la compréhension de ce phénomène naturel et par la suite pour mieux se protéger. L'étude de la rigidité des intervalles d'air pointe-plan présente une grande importance pour la conception de la coordination de l'isolement.

Chapitre II

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 sauraient à elles seules déterminer les caractéristiques constructives des isolations autorégénératrices, 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 électrologiques du sol ont une grande influence sur la valeur de la tension $U_{100\%}$

II.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 et -le mécanisme des canaux (streamers).[17]

II.2.1 Mécanisme de Townsend [17]

Ce mécanisme concerne les intervalles d'air à champ uniforme dans le cas des faibles produits "p.a" où "p" est la pression du gaz et "a" la distance entre électrodes. Dans ce cas la disruption est établie lorsque le critère dit de décharge autonome de Townsend (ou critère de Townsend) est rempli.

II.2.1.1 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:

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

Lorsque le produit $p \cdot a$ est inférieur à la valeur limite de 1000 torrs.cm, la variation de la tension disruptive U_d en fonction du produit $p \cdot a$ est définie par la loi de Paschen. D'après cette loi la tension disruptive passe par une valeur minimale, qui est d'environ 350V pour l'air, 275V pour l'azote, 450V pour l'oxygène, dans le cas d'une cathode en fer, et 295V pour l'Hydrogène avec une cathode en platine.

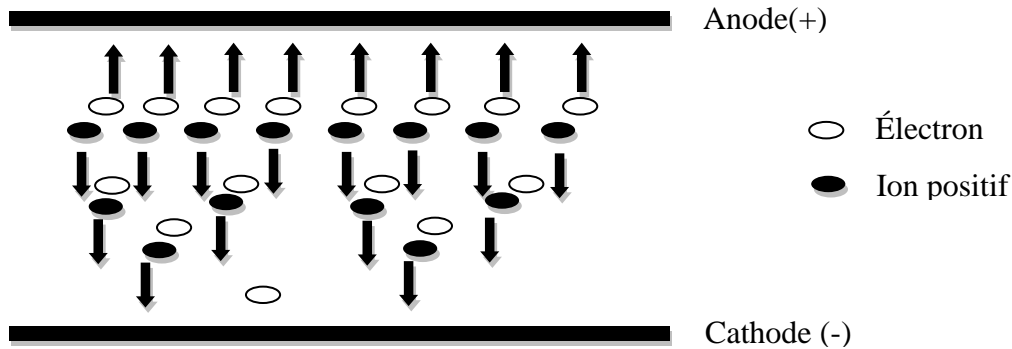


Figure II.1 - Avalanche électronique [18]

II.2.2 Mécanisme des canaux (streamers)

Dans la théorie de Townsend, les processus d'émission cathodique jouent un rôle fondamental dans l'amorçage de la décharge autonome. Cette théorie ne peut expliquer cependant les temps de développement de la décharge mesurés (10^{-9} à 10^{-7} s) dans le cas d'intervalles inter électrode importants ($a > 1$ cm) et des pressions proches de l'atmosphère [14]. Ces temps sont beaucoup plus faibles que ceux nécessaires à l'apparition d'effets secondaires à la cathode conditionnant le passage des décharges non autonomes en autonomes (10^{-5} à 10^{-4} s). Aussi, la tension d'apparition de l'étincelle dans les grands intervalles ne dépend pas du matériau de la cathode contrairement à ce qui est prévu par la théorie de Townsend [14].

Pour expliquer le mécanisme de développement des décharges dans les grands intervalles, L. B. Loeb et J. M. Meek [19] ont proposé un modèle dans lequel la photo ionisation résultant des phénomènes d'excitation et de recombinaison dans l'intervalle inter électrode et la charge d'espace sont à la base du développement de la décharge (Figure II.2). Selon ce modèle, la décharge se développe sous forme d'un canal très conducteur appelé streamer (canal de plasma).

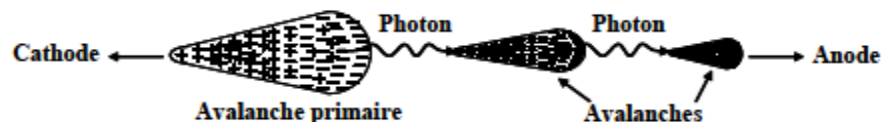


Figure II.2 - Schéma de développement de la décharge par avalanches photo ionisantes [14]

Le premier stade d'évolution de la décharge en canal correspond à la création d'une avalanche dite primaire. Celle-ci prend naissance, par exemple, suite à des collisions ionisantes pour une valeur critique du champ électrique en un point quelconque de l'intervalle inter électrode. Cette avalanche est accompagnée de la création d'une charge d'espace. En effet, dans une avalanche, les électrons forment

un nuage négatif qui progresse rapidement vers l'anode alors que de l'autre côté, les ions positifs restent pratiquement immobiles en raison de leur mobilité. Le champ devient alors hétérogène et plus intense près des pôles de l'avalanche et surtout au voisinage du pôle positif (constitué par les ions positifs) qui joue le rôle d'une pointe conductrice. Le champ sur les flancs de l'avalanche diminue. Dès que la charge d'espace de l'avalanche primaire atteint une taille critique (soit environ 10^8 électrons), elle va contribuer à intensifier les collisions ionisantes sur le front et la queue de l'avalanche.

Dans l'avalanche, les électrons et les ions se recombinent en partie. L'énergie rayonnée peut provoquer la photo ionisation des particules de gaz, se trouvant à l'intérieur et à l'extérieur de l'avalanche. Les électrons nouvellement créés peuvent, si le champ local est suffisamment intense, conduire par chocs ionisants, à la naissance de nouvelles avalanches, dites secondaires qui à leurs tours créeront une charge d'espace positive en avant de la première. Ces avalanches secondaires jouent le rôle de facteur d'entretien de la décharge (qui devient autonome) et d'amplification du nombre de porteurs de charges libres. Cette amplification va s'effectuer surtout dans l'axe du champ et de l'avalanche précédente. Chaque avalanche continue à se développer pour son propre compte et de façon très rapide. La première n'a pas fini de croître que déjà toute une chaîne se crée. Alors que les électrons se déplacent vers l'anode, la chaîne semble progresser vers la cathode. La progression de cette chaîne est très rapide du fait que les avalanches se transplantent par rayonnement lumineux et non par migration d'électrons et d'ions. L'ionisation se fait donc sans intervention de la cathode. La décharge prend alors la forme d'un canal dans la direction de l'axe des électrodes, son développement dépend de la répartition du champ.

D'autre part, lors de collisions élastiques avec les particules de gaz, les charges leur transmettent une partie de leurs énergies cinétiques. Il en résulte une augmentation de la température du gaz. Tant que celle-ci est inférieure à celle nécessaire à l'ionisation thermique, elle n'aura aucune influence sur le développement de la décharge. Ce stade de la décharge est appelé streamer. Le champ extérieur nécessaire à son entretien est inférieur à celui conditionnant l'ionisation par collisions. Pour l'air par exemple, le champ moyen du streamer se développant à partir de l'anode est d'environ 5 kV/cm et de 15 kV/cm lorsque celui-ci se développe à partir de la cathode alors que le champ critique est d'environ 30 kV/cm (dans les conditions normales de pression et de température). Dans le cas d'intervalles inter électrode importants ($> 1 \text{ m}$ pour l'air à pression atmosphérique), la décharge en forme de streamer se transforme lors de son passage vers l'autre électrode en une autre forme de décharge appelée leader. Les Figures II.3 à II.5 représentent les différents stades de développement de la décharge en canal.

Le modèle de développement de la décharge en canal dans les gaz, est très important du point de vue qualitatif; il permet d'une manière convaincante, de connaître la probabilité conditionnant le mécanisme de décharges pour les grandes valeurs du produit ($p.a$). [20]

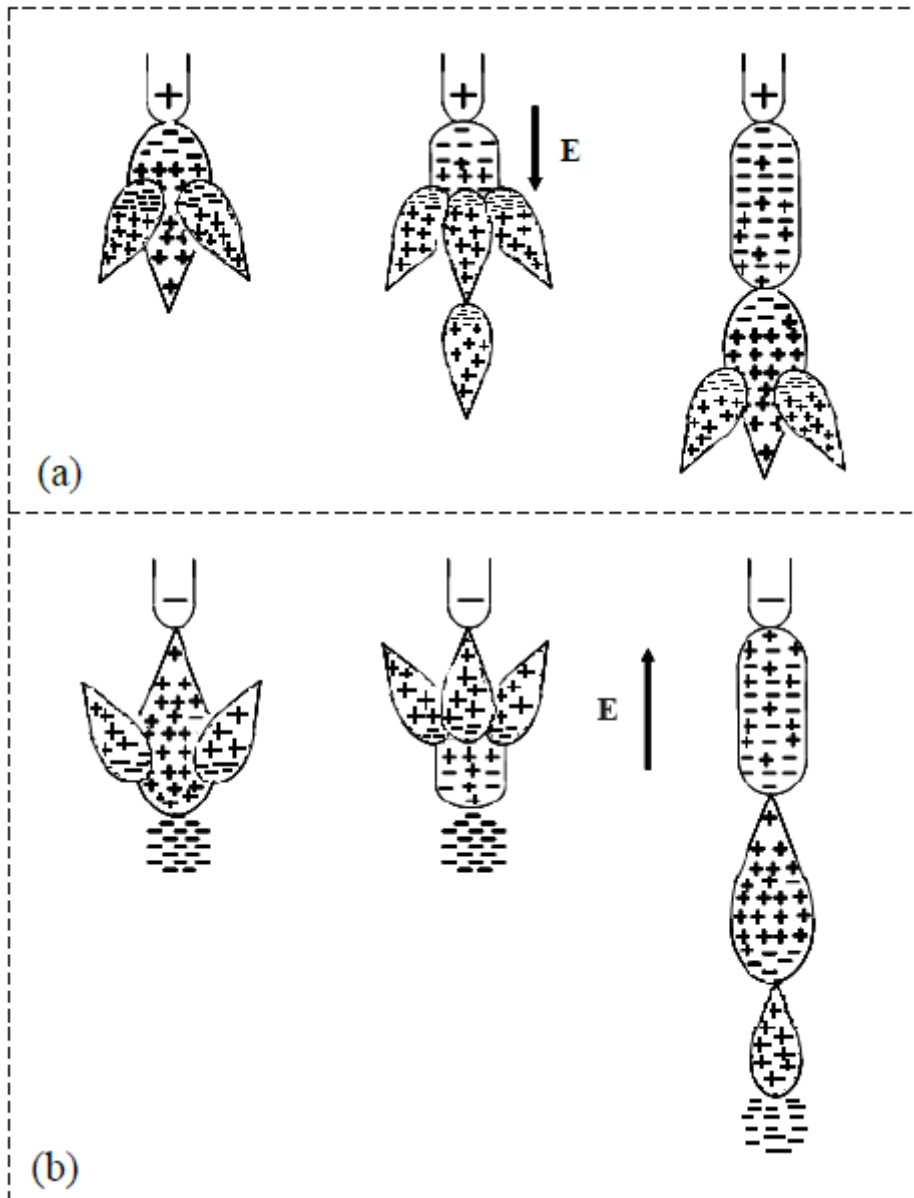


Figure II.3 - Etapes successives de développement d'un streamer dans un gaz en configuration d'électrodes pointe - plan : (a) pointe positive ; (b) pointe négative [14]

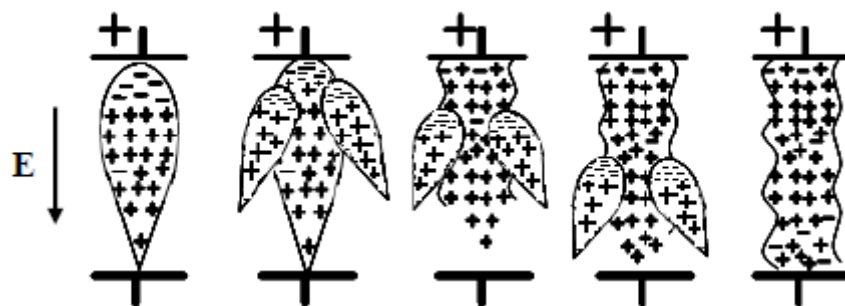


Figure II.4 - Etapes de développement d'un streamer positif en champ uniforme [14]

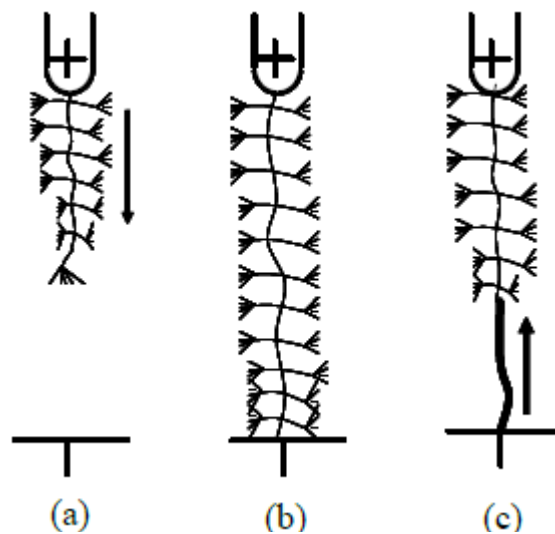


Figure II.5 - Schéma du développement de décharges dans un système d'électrodes pointe – plan avec une pointe positive : (a) streamer ; (b) leader ; (c) décharge principale.

La flèche représente le sens de développement des différents stades de la décharge [14]

II.3. 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 [21] 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 [21]

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 *et al* [22]. En plus de tous ces paramètres, la tenue de l'air dépend également de la géométrie des électrodes et de la caractéristique $U(t)$.

II.4.Type de décharges

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 [23].

II.4.1.Décharges pointe-pointe [23]

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 points soit une ligne droite). Ce sont souvent des décharges entre deux électrodes métalliques, on n'utilise que rarement cette configuration avec des décharges à barrière diélectrique.

II.4.2. Décharges 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 [24] : 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.

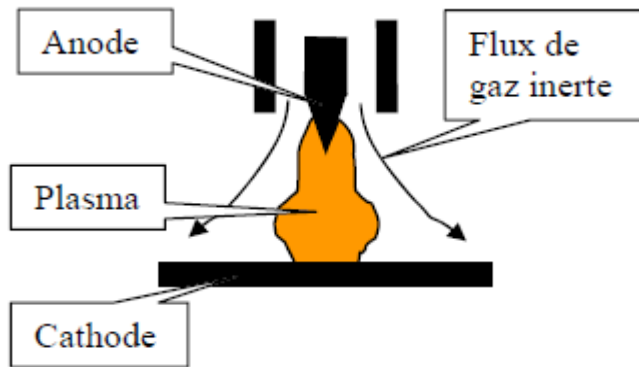


Figure II.6 - Arc transféré [23]

- Arc non transféré [24]: 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.

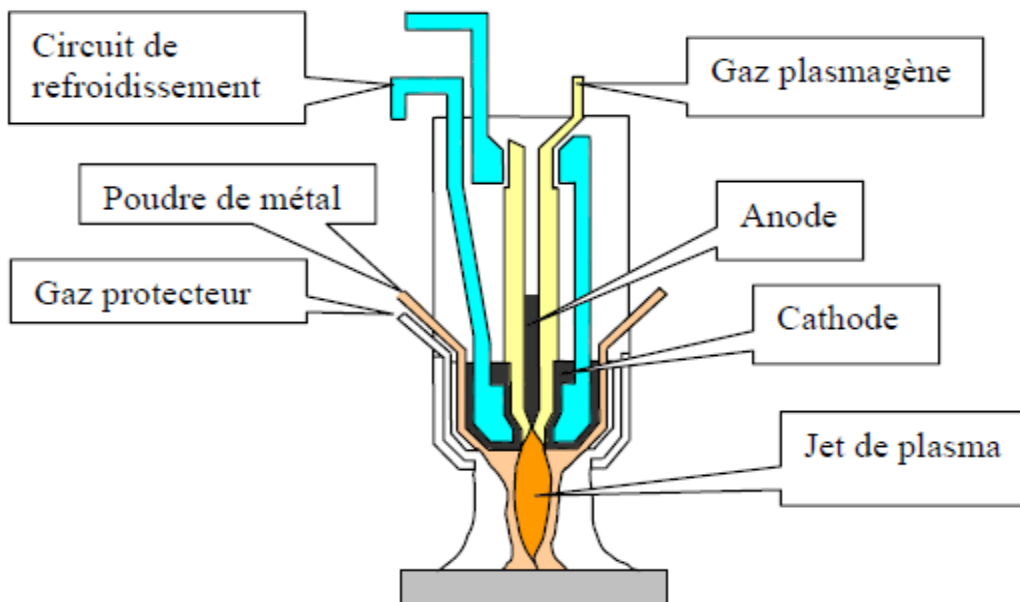


Figure II.7 - Arc non transféré (torche à plasma) [23]

- 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. [25]

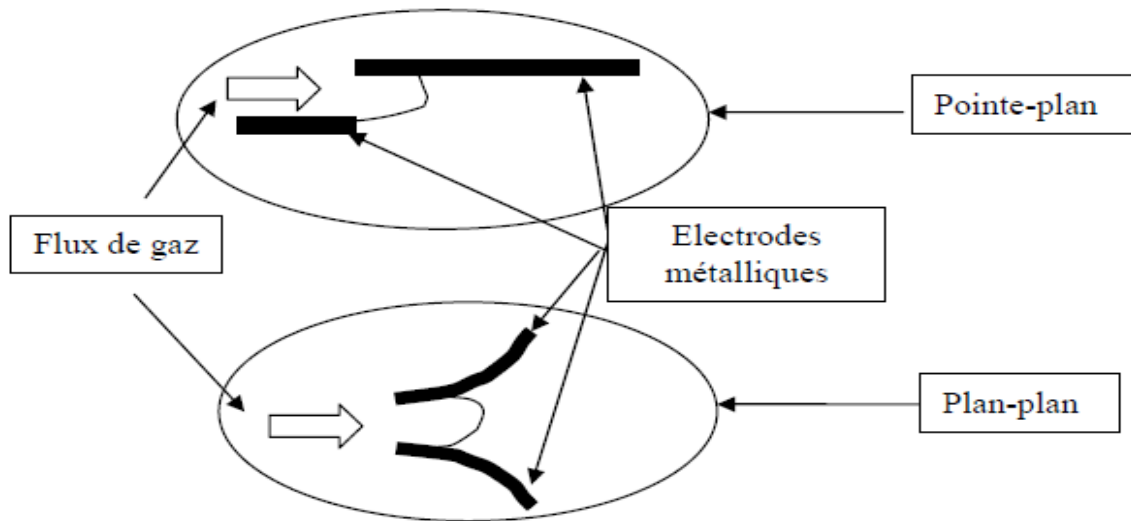


Figure II.8 - Décharges glissantes [23]

II.4.3. Décharges 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 [26] .

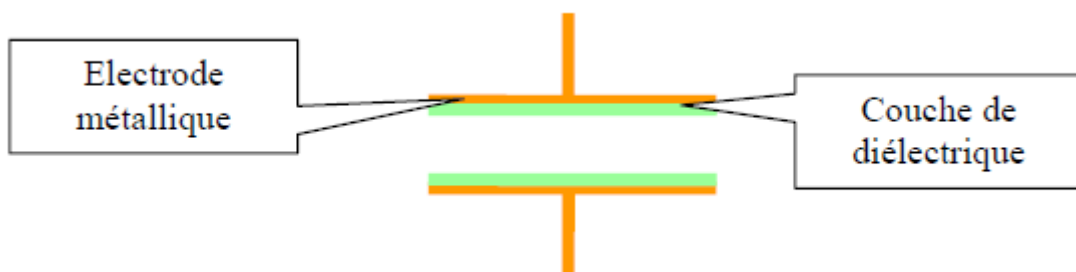


Figure II.9 - Electrode de décharge à barrière diélectrique (DBD) [23]

II.5. Influence de la géométrie des électrodes et la forme de la tension

II. 5.1 Tension continue

II.5.1. a. Polarité positive [20]

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.10)

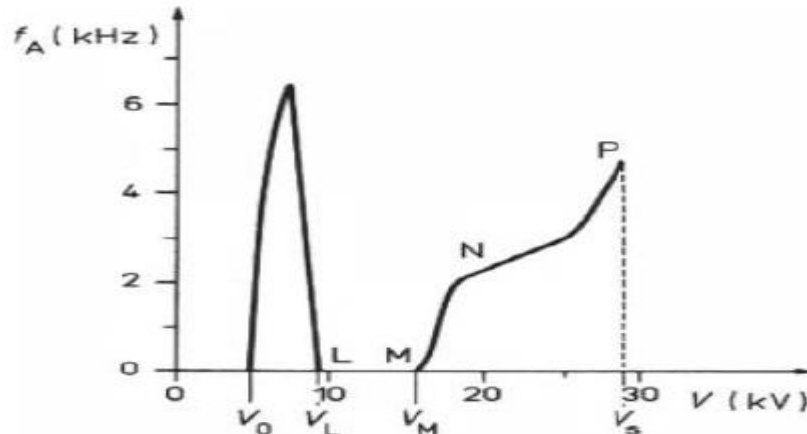


Figure II.10 - Fréquence d'apparition des streamers dans l'air en fonction de la tension appliquée V dans un système d'électrodes pointe - plan, en polarité positive; $d = 31$ mm - Rayon de la pointe = 0,17 mm [20]

On distingue trois régimes entre le seuil V_0 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 , 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 prédécharge 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 prédécharge. Si le claquage se produit après les dards prédisruptifs, 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 [20]

II.5.1.b. Polarité négative [20]

Dans l'air, en géométrie pointe - plan, le courant de décharge est constituée 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. D'après Y. Miyoski *et al*, la tension de claquage dépend fortement de la distance inter électrodes. 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 luminescente 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.

II.5.2 Tension impulsionnelle [20]

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 SF_6 -air avec seulement 1% de SF_6 est supérieure à la tension disruptive du SF_6 pur. Cela est d'autant plus surprenant que la tension disruptive du mélange est inférieure à celle du SF_6 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.

II.5.3 Tension alternative [20]

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.6. Géométrie de l'intervalle [27]

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.

II.7 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 grandes 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 [27]

II.8. Rappels des différents régimes de décharge en pointe-Plan [28]

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.

II.8.1 En pointe positive

Lorsqu'on fait croître la tension, on observe successivement les zones suivantes :

une zone de faible courant continu (quelques pA) qui correspond à la collection des charges se trouvant dans l'intervalle,

une première zone d'impulsions de courant superposées au courant continu plus intense que précédemment. Ces impulsions ont une fréquence instable et comportent à la fois des impulsions d'auto stabilisation ("burst pulses") et des dards dits "du premier ordre" ("preonset streamers") qui sont dus au développement d'avalanches électroniques à partir de la pointe, et de proche en proche par photo ionisation,

une zone à courant continu seul, dite zone d'Hermstein, Fieux et Boutteau [28] ont montré que le courant d'apparence continue de cette zone comporte en réalité des impulsions de relaxation de fréquence élevée (plusieurs Mhz) et de faible amplitude (une dizaine de μA),

une deuxième zone de dards dits "du second domaine" ("primary streamers") à fréquence stable (quelques khz). Le domaine de la décharge couronne proprement dite s'arrête à cette zone,

si on fait croître encore la tension, les dards atteignent le plan et donnent naissance à une tache cathodique et à un canal ("secondary streamers") partant de la pointe et assurant l'écoulement des charges. Ce canal s'allonge dans l'intervalle sans atteindre le plan,

on passe ensuite à "l'arc avorté" qui est un canal très activé et très développé,

enfin, "l'arc silencieux" qui est un régime à courant continu. Entre les régimes d'arc avorté et d'arc silencieux, s'insèrent le régime d'arc transitoire, qui correspond à une impulsion de très grande amplitude (pouvant dépasser 10 A), de brève durée (30 ns à mi-hauteur) et retardée de quelques centaines de nanosecondes sur l'impulsion d'arc avorté.

Il faut remarquer que tous ces régimes comportent une composante de courant continu

II.8.2 En pointe négative

Dans ce cas, quand on augmente la tension, on observe les zones suivantes:

- une zone de faible courant continu (quelques pA) qui correspond à la collection des charges se trouvant dans l'intervalle, comme en pointe positive,
- une zone de pré impulsions instables,
- une superposition d'un courant continu croissant et d'impulsions à haute fréquence (plusieurs centaines de khz) et faible amplitude ($< 300 \mu\text{A}$) dites "impulsions de Trichel",
- un régime à courant continu,
- le passage à l'arc (silencieux ou transitoire selon la capacité inter-électrodes).

II.9. CONCLUSION

Ce chapitre a été consacré en premier lieu à l'étude des mécanismes de rupture dans l'air puis à l'étude de la rigidité diélectrique des intervalles d'air suivant les différentes configurations existantes en basant sur le système pointe-plan qui fait le sujet d'étude par la suite. Les différents paramètres comme la géométrie de l'intervalle ainsi que les contraintes de la tension ont été étudiés.

Chapitre III

III-1 Introduction

Les systèmes de transmission de puissance, les isolations et les dispositifs de protection sont souvent soumis à deux principaux types de contraintes diélectriques: celles causées par les surtensions de foudre (ondes de foudre) et les surtensions de manœuvre dues aux opérations sur le réseau lui même (ondes de manœuvre). Ces dernières ont un impact économique considérable, car elles permettent de dimensionner les systèmes à haute tension.

Plusieurs études ont été menées sur les décharges dans les grands intervalles d'air. Les principaux objectifs consistaient d'une part, à contribuer à l'acquisition et à l'amélioration des connaissances de base dans le domaine afin de mieux comprendre les mécanismes impliqués et d'autre part, à estimer les paramètres caractérisant les différents phénomènes de décharges nécessaires pour résoudre une multitude de problèmes d'ingénierie tels que le dimensionnement des structures et son protection contre la foudre. L'air constitue un des paramètres importants pour la conception et le dimensionnement des systèmes diélectriques. Il représente le meilleur compromis pour plusieurs applications telles que le transport d'énergie et leurs composants (condensateurs et transformateurs de puissance, câbles, convertisseurs, dispositifs de protection...). Cependant, ces systèmes d'ingénierie sont souvent exposés aux décharges atmosphériques ou aux surtensions de manœuvre. Il peut en résulter la destruction des équipements suite aux claquages des intervalles d'isolement entre phases ou entre une phase et la terre. Ainsi, le comportement diélectrique des intervalles d'air soumis à des distributions homogènes et non homogènes de champ en polarités négative et positive, est d'un grand intérêt du point de vue de l'ingénierie.

Dans ce chapitre, nous allons étudier la simulation de la foudre sous les deux formes, la première forme est la simulation expérimentale de la foudre au laboratoire à l'aide d'un dispositif utilisé les simulations de la décharge réelle qui est le générateur de choc (type Marx), qui délivre des ondes de choc de type choc de foudre (positive et négative) [27]. Alors que la deuxième forme concerne la simulation numérique de la décharge de foudre ; cette modélisation est basée sur le principe de la reproduction de l'onde de choc de foudre numériquement ce qui permet d'étudier cette décharge.

III-2 Etude des générateurs d'impulsions

III-2-1 Représentation du générateur d'impulsions par des circuits électriques équivalents

La Figure (III.1) représente un circuit équivalent d'un générateur d'impulsion en un seul étage.

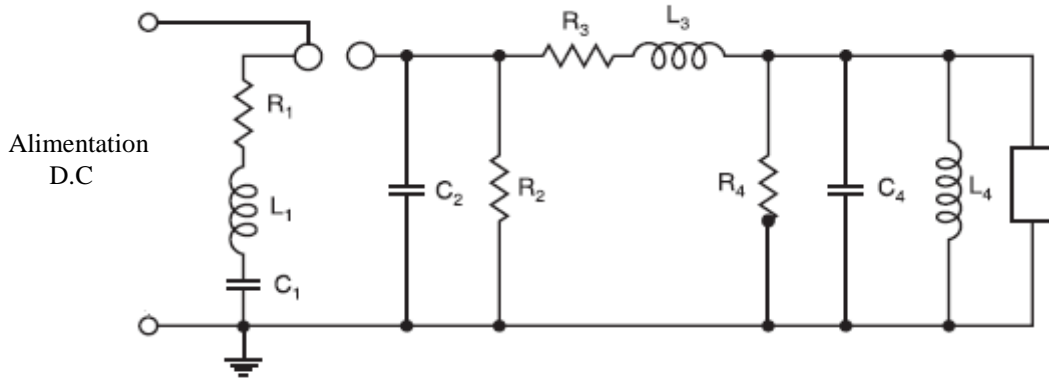


Figure III.1- Circuit équivalent d'un générateur d'impulsion en un seul étage [29].

- C₁** : Condensateur du générateur chargé par une source de tension continue avec la tension désirée.
- L₁** : Inductance du générateur et les conducteurs connectés au circuit de décharge, en général, prends de faibles valeurs.
- R₁** : Résistance insérée pour contrôler la forme d'onde.
- L₃, R₃** : Eléments externes qui peuvent être reliés au générateur pour contrôler la forme d'onde.
- C₄ et C₂** : Condensateurs pour compenser la tension.
- R₄ et R₂** : Résistance pour contrôler la durée d'onde.
- L₄** : Représenté l'inductance de l'élément en test et peut affecter sensiblement la forme d'onde.

Pour des raisons pratiques, le générateur doit être mis à la terre ; la polarité de la tension de sortie peut être changée par l'inversion de la polarité de la tension continue de charge.

Pour l'évaluation des éléments de circuit électrique précédent, l'analyse du circuit de la Figure (III.1) est compliquée. Pour cela, on peut représenter le générateur d'impulsions par deux schémas simplifiés et qui présentent des formes plus pratiques Figure (III.2).

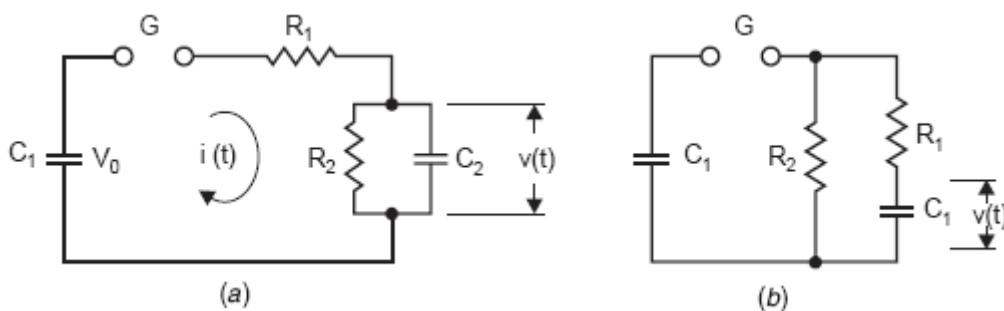


Figure III.2 - Circuit équivalent simplifiés d'un générateur à impulsions [29].

III-2-2 Analyse des circuits équivalent simplifiés

III-2-2-a Analyse du premier circuit équivalent

On se réfère à la Figure (III.2.a) et après l'éclatement des éclateurs à sphères qui permet la circulation du courant dans le circuit, et en utilisant la transformé de Laplace ; l'impédance du circuit :

$$Z(s) = R_1 + \frac{1}{C_1 s} + \frac{R_2}{R_2 C_2 s + 1} \quad (\text{III.1})$$

$$I(s) = \frac{V_0}{sZ(s)} \quad (\text{III.2})$$

Avec :

$$v(s) = I(s) \frac{R_2}{R_2 C_2 s + 1} \quad (\text{III.3})$$

Si on impose la forme de la tension désirée sous la forme :

$$V(t) = V_n [e^{-(\alpha-\beta)t} - e^{-(\alpha+\beta)t}] \quad (\text{III.4})$$

Avec

$$V_n = \frac{V_0}{2\beta R_1 C_2} \quad (\text{III.5})$$

$$\gamma = \frac{C_1}{C_2} \quad (\text{III.6})$$

Après calcul, on obtient :

$$v(t) = V_0 R_2 C_1 \frac{\alpha^2 - \beta^2}{2\beta} [e^{-(\alpha-\beta)t} - e^{-(\alpha+\beta)t}] \quad (\text{III.7})$$

Avec :

$$\alpha = \frac{1}{2} \left[\frac{1}{R_1 C_1} + \frac{1}{R_2 C_2} + \frac{1}{R_1 C_2} \right] \quad (\text{III.8})$$

$$\alpha^2 - \beta^2 = \frac{1}{R_1 R_2 C_1 C_2} \quad (\text{III.9})$$

On obtient :

$$\begin{aligned} & \frac{1}{2} \left[(\alpha^2 - \beta^2) C_2 R_2 + \frac{1}{C_2 R_2} + C_1 R_2 (\alpha^2 - \beta^2) \right] \\ &= \frac{1}{2} \left[(\alpha^2 - \beta^2) \frac{C_1 R_2}{\gamma} + \frac{\gamma}{C_1 R_2} + C_1 R_2 (\alpha^2 - \beta^2) \right] \end{aligned}$$

$$= \frac{1}{2} \left[\left(\frac{\gamma+1}{\gamma} \right) (\alpha^2 - \beta^2) R_2 C_1 + \frac{\gamma}{R_2 C_1} \right] \quad (\text{III.10})$$

D'où on peut calculer les valeurs des résistances R_1 et R_2 :

$$R_2 = \frac{1}{C_1} \left[\frac{\alpha \mp \sqrt{\alpha^2 - (\gamma+1)(\alpha^2 - \beta^2)}}{\frac{\gamma+1}{\gamma} (\alpha^2 - \beta^2)} \right] \quad (\text{III.11})$$

$$R_1 = \frac{1}{C_1} \left[\frac{\gamma+1}{\alpha \mp \sqrt{\alpha^2 - (\gamma+1)(\alpha^2 - \beta^2)}} \right] \quad (\text{III.12})$$

III-2-2-b Analyse de deuxième circuit équivalent

En utilisant le même raisonnement pour le circuit de la Figure (III.2.b), et après fermeture des éclateurs à sphères, on aura :

$$Z(s) = \frac{1}{c_1 s} + \frac{R_2 \left(\frac{1}{C_2 s} + R_1 \right)}{R_1 + R_2 + \frac{1}{C_2 s}} \quad (\text{III.13})$$

$$R_2 = \frac{1}{C_1(\alpha + \beta)} + \frac{\gamma}{C_1(\alpha + \beta)} \quad (\text{III.14})$$

$$R_1 = 2\sqrt{L/C} \quad (\text{III.15})$$

La forme de β et α est :

$$\alpha = \frac{1}{2} \left[\frac{1}{R_2 C_1} + \frac{1}{R_1 C_2} + \frac{1}{R_1 C_1} \right] \quad (\text{III.16})$$

$$\beta = \frac{1}{2} \left[\left(\frac{1}{R_2 C_1} + \frac{1}{R_1 C_1} + \frac{1}{R_1 C_1} \right)^2 - \frac{4}{R_1 R_2 C_1 C_2} \right]^{1/2} \quad (\text{III.17})$$

III.3. Génération des ondes de choc

III.3.1 Principe de fonctionnement du générateur de choc [30]

Tout d'abord, le principe d'un générateur de Marx est plutôt simple, il consiste à charger une certaine quantité de condensateurs en parallèle à l'aide d'une certaine tension d'alimentation et de les décharger par la suite en série en utilisant des commutateurs (éclateurs à air ou thyristors). Il est ainsi possible de multiplier la tension d'alimentation par le nombre d'étages ajoutés ce qui permet alors d'atteindre des valeurs de tension de sortie très élevées. Au niveau de la qualité du générateur, elle est déterminée par le synchronisme de fermeture des commutateurs qui doivent se déclencher le plus rapidement possible et en même temps. Voici le schéma représentatif d'un générateur à trois étages avec éclateurs à air :

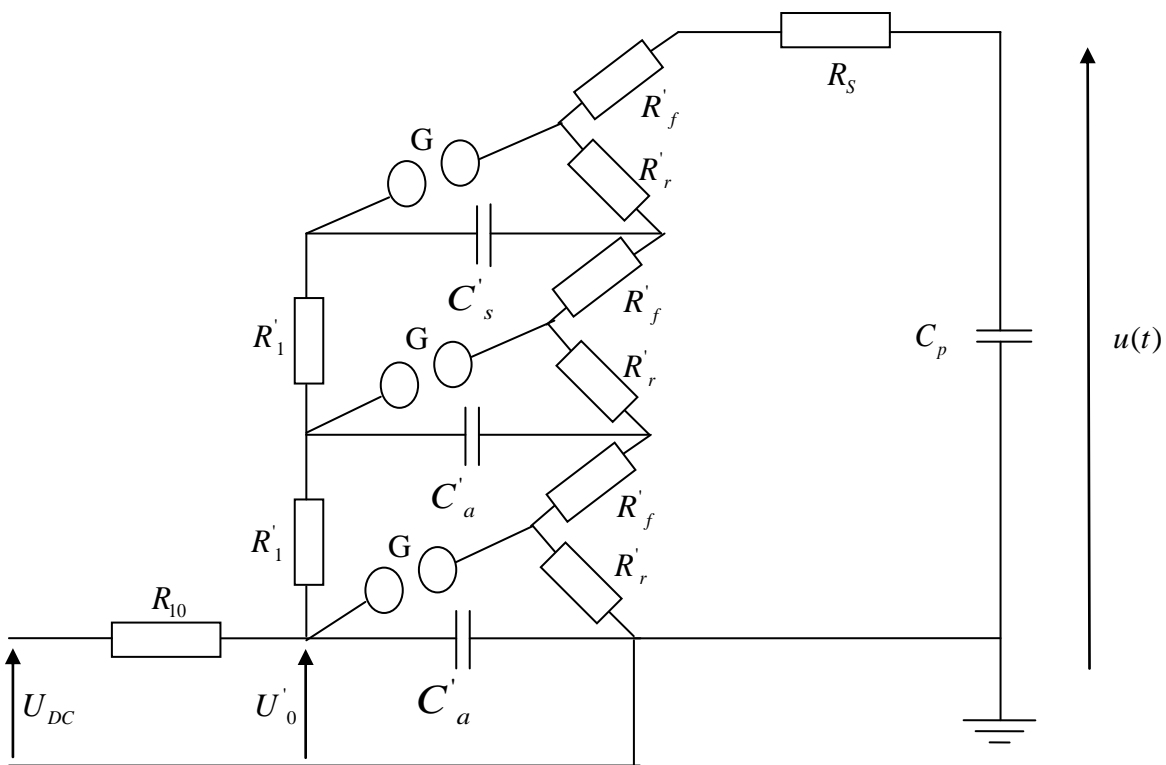


Figure III.3 - Générateur de Marx à 3 étages [30]

On peut aussi représenter le schéma précédent par un schéma équivalent pour un générateur multi étage :

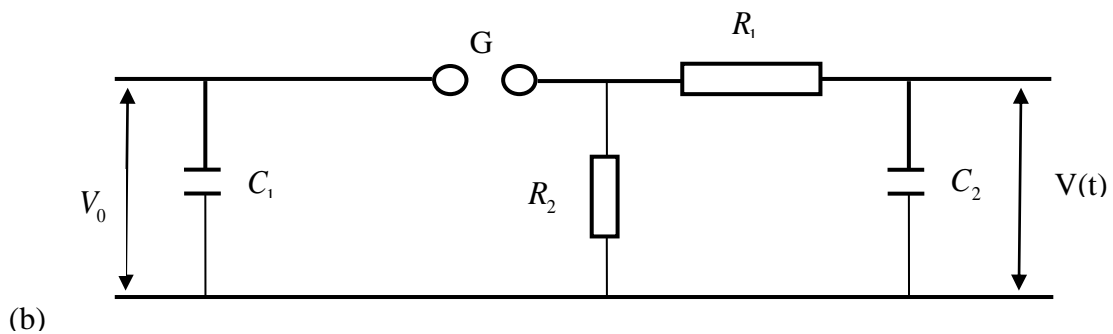


Figure III.4 - Schéma équivalent générateur multi-étages [30]

Où $R_1 = nR'_f + R'_s$; $R_2 = nR'_r$, avec n est le nombre d'étages

Pour ce qui est du fonctionnement, le tout commence par la charge à tension continue des condensateurs (C'_a et C'_s) en parallèle par l'intermédiaire des résistances de charge (R_{10} et R'_1). Malgré que le courant de charge traverse aussi les résistances R'_r et R'_f , elles sont dimensionnées de manière à être plus petites que celles de charge, donc elles n'influencent pas le temps de charge des condensateurs. Lorsque les condensateurs sont bien chargés, on les décharge ensuite en série par l'intermédiaire des éclateurs (G) à la suite du claquage du diélectrique du premier éclateur qui entraîne par la suite les autres. Afin que le déclenchement se fasse dans le bon ordre et de la meilleure façon possible, l'écartement du premier éclateur est légèrement plus faible que les autres ce qui fait que l'amorçage se produit tout d'abord sur celui-ci. Ce type de montage peut fournir des tensions de choc, manœuvre ou de foudre de l'ordre de 6 MV. Dans notre cas, le nombre d'étages sera de dix avec une tension d'alimentation de 1 kV, ce qui donnera une tension de sortie de 10 kV.

On peut remarquer que le type de commutateurs utilisés est des éclateurs à air qui comportent deux parties distinctes séparées par un diélectrique qui est dans ce cas l'air. Les principales caractéristiques de ce type de commutateur se situent au niveau de sa grande endurance pour de forts courants et de fortes tensions. Lorsqu'on envoie une impulsion sur une des deux électrodes, le gaz inter-électrode s'ionise ce qui entraîne la conduction de l'éclateur. Cependant, ce type de composante comporte certains inconvénients, soit qu'une utilisation répétitive à fréquence élevée ne laisse pas suffisamment de temps à l'air de recouvrer sa valeur diélectrique de claquage. De plus, le réglage de l'écartement des éclateurs peut s'avérer critique et difficile. C'est pourquoi, dans notre cas, on utilisera des commutateurs à semi-conducteur, soit des thyristors qui sont plus fragiles, mais qui permettront d'avoir un meilleur synchronisme au niveau du déclenchement. Cependant, il ne faut pas oublier qu'un système de déclenchement impulsif est nécessaire à l'amorçage de ces derniers. [30]

III-3-2 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 constituée 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.5), montre un schéma pratique détaillé d'un générateur de choc.

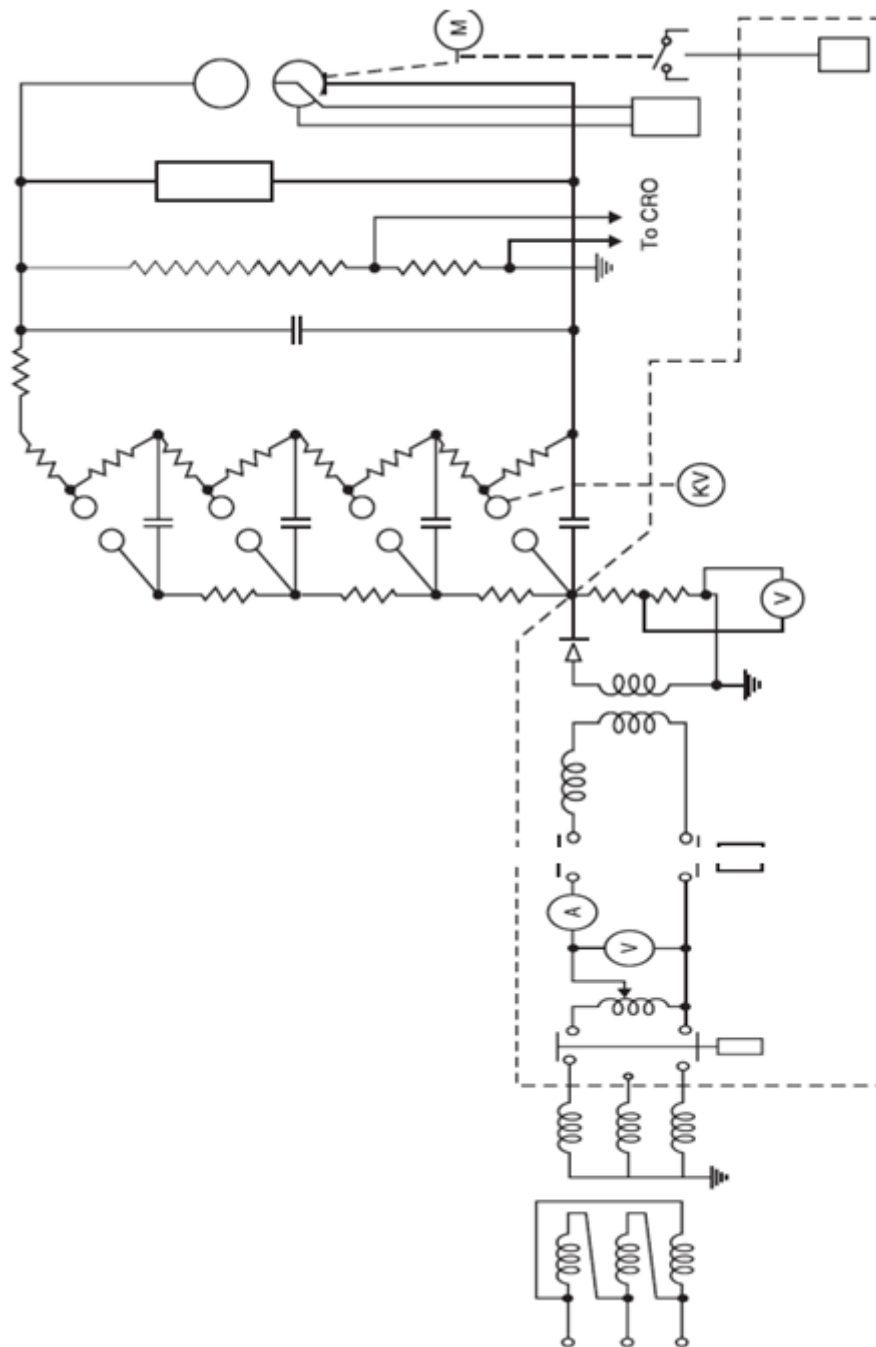


Figure III.5 - Circuit de générateur de choc [29]

III.3.3 Forme de la tension de choc délivrée

La tension délivrée par le générateur de choc, simulant les surtensions d'origine atmosphérique, est une impulsion unipolaire bi-exponentielle dont la forme est normalisée conformément aux recommandations de la CEI [31]. Ces ondes se définissent par les paramètres suivants:

- La constante de temps de front T_f
- constante de temps de mi-amplitude T_q
- L'amplitude maximum U_m

La forme de tension générée par le générateur de choc répond à l'équation suivante :

$$U(t) = U_m [\exp(-t/T_q) - \exp(-t/T_f)] \tag{III.18}$$

La CEI donne l'onde de forme normalisée dite « choc 1,2/50 μs » comme l'onde la plus adoptée pour les essais en chocs de foudre. Le temps de front t_f de cette onde est de 1,2 μs et le temps demi-amplitude T_q est de 50 μs . En effet, le choc 1,2/50 μs simule assez bien la forme d'un courant de foudre sévère [8,32].

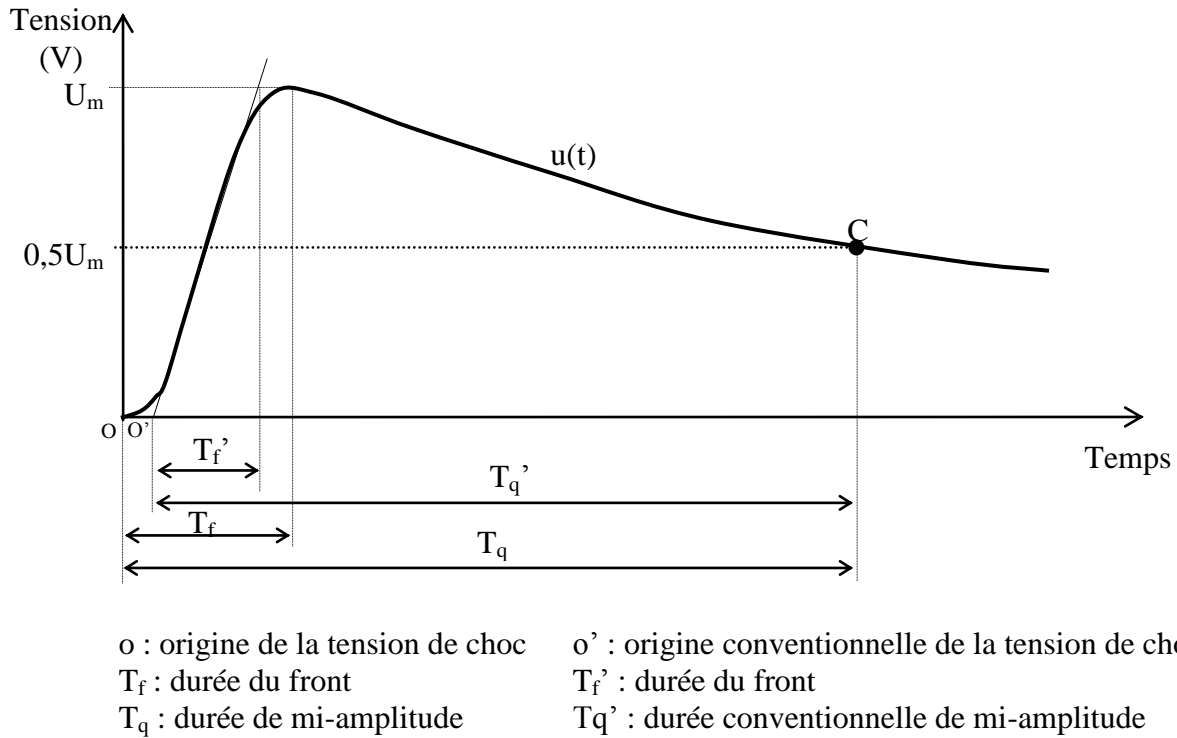


Figure III.6 - Forme de l'onde de choc de foudre [8]

III.3.4. Générateur de choc réel

La Figure (III.7) donne un schéma simplifié d'un générateur de choc est de type Marx, ayant les caractéristiques suivantes :

- Nombre d'étages = 1
- Tension nominale = 600 kV
- Energie = 4 kJ

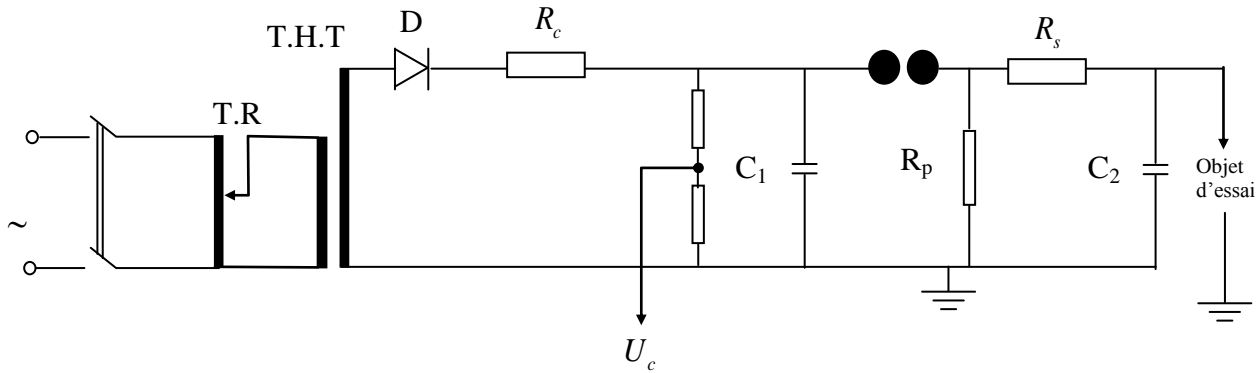


Figure III.7- Schéma simplifié d'un étage d'un générateur de choc [6]

Avec :

T.R : Transformateur de réglage

T.H.T: Transformateur de haute tension

D : Redresseur

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

La tension continue destinée à la charge du générateur de choc est fournie par un redresseur D de tension monophasée. Une résistance destinée à limiter le courant de charge à une valeur admissible est placée en série avec le redresseur. Ce dernier est alimenté par un transformateur de haute tension (T.H.T).

La charge des condensateurs de choc s'effectue à travers des résistances R_c . Les éclateurs à sphère de tous les étages sont étalonnés à un écartement égal. Ce dernier est fixé en fonction du niveau de tension de charge appliquée.

Au cours de la charge des condensateurs, la tension aux bornes des éclateurs à sphères augmente. Lorsque les éclateurs sont amorcés, chaque condensateur se décharge à travers les résistances R_s , R_p [3,24]. La tension générée appliquée à l'objet d'essais est égale à la tension au borne d'un étage multipliée par le nombre d'étages qui est égale à 8 dans notre cas. Le rendement du générateur, donné par le constructeur, est de 0,98.

III.4 Exemple d'un modèle expérimental

Le modèle de simulation d'un coup de foudre négatif qui est le plus fréquent sur un sol homogène bon conducteur comporte une tige métallique en acier soumise à une onde de choc de polarité négative $-1,2/50\mu s$ et le plan mis à la terre ; c'est un système pointe-plan.

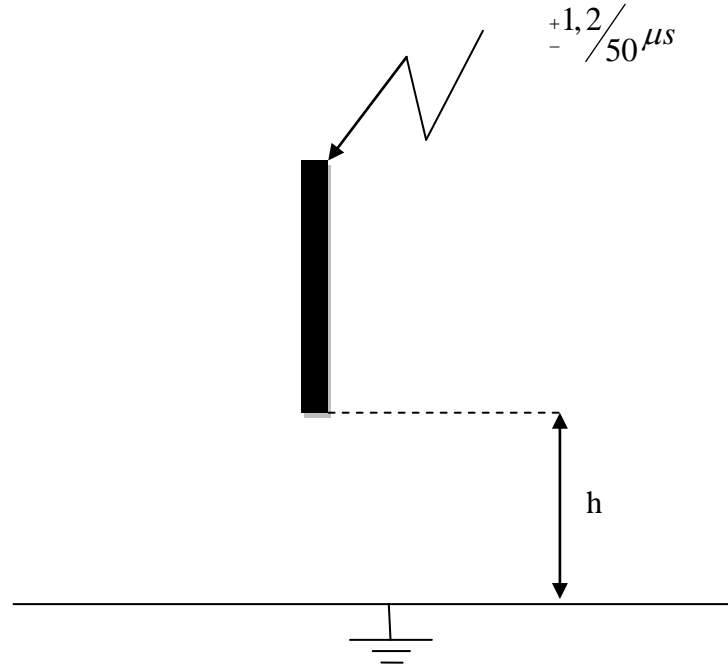


Figure III.8 - Configuration du système tige-plan avec sol homogène bon conducteur [34]

III.5.Simulation Numérique

III-5-1 Etude de générateur de choc de type Marx en utilisant les circuits équivalents

La Figure (III.9), montre un générateur de choc qui contient trois étages à base de circuits type Figure (III.2.b) citée précédemment.

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 tension V_0 est déchargé à travers les éclateurs G avec une valeur suffisante à travers les condensateurs C_1' vers le condensateur C_2 .

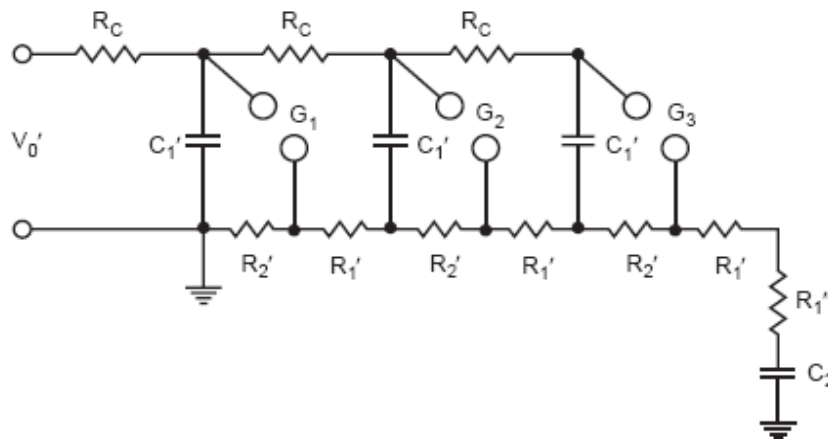


Figure III.9 - Schéma équivalent du générateur de Marx à trois étages [29].

Ce circuit peut être réduit vers un générateur de choc à un seul étage suivant la Figure (III.2.b).

$$R_1 = \sum^n R_1' + R_1'' \tag{III.19}$$

$$R_2 = \sum^n R_2' \tag{III.20}$$

$$\frac{1}{C_1} = \sum^n \frac{1}{C}, \tag{III.21}$$

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.10). 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].

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

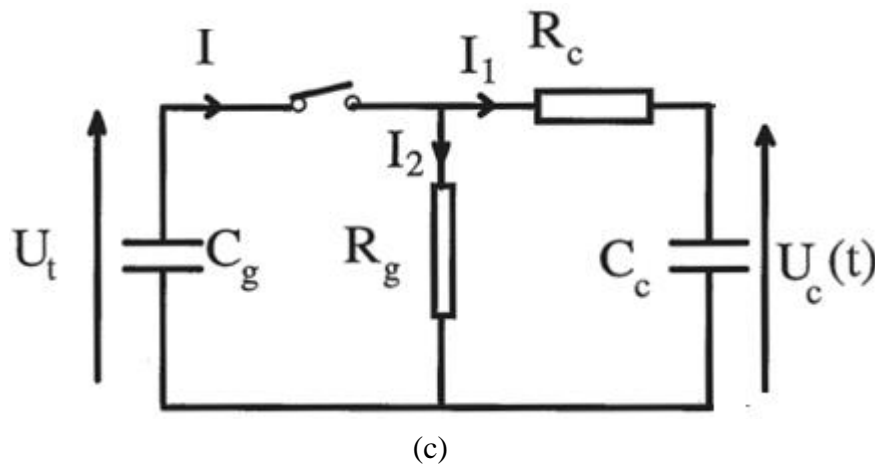


Figure III.10 - Schéma simplifié du générateur choc [27,29].

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 :

$$\frac{U_t}{p} = I_1 R_g + (I_1 + I_2) \frac{1}{p C_g} \tag{III.22}$$

$$I_1 R_g = I_2 \left(R_c + \frac{1}{p C_c} \right) \tag{III.23}$$

$$U_c(p) = \frac{I_2}{p C_c} \tag{III.24}$$

En remplaçant les équations (III.22) et (III.23) dans (III.24), nous obtenons :

$$U_c(p) = \frac{Ut}{R_c C_c} \frac{1}{p^2 + bp + c} \quad (\text{III.25})$$

Ou :

$$U_c(p) = \frac{Ut}{R_c C_c} \frac{1}{\left(p + \frac{1}{T_a}\right) \left(p + \frac{1}{T_b}\right)} \quad (\text{III.26})$$

Avec:

$$b = \frac{1}{R_c C_c} + \frac{1}{R_g C_g} + \frac{1}{R_c C_g} \quad (\text{III.27})$$

$$c = \frac{1}{R_g R_c C_g C_c} \quad (\text{III.28})$$

$$T_{a,b} = \frac{2}{b \pm \sqrt{b^2 - 4c}} \quad (\text{III.29})$$

Où : $\left(\frac{1}{T_a}\right)$ et $\left(\frac{1}{T_b}\right)$ sont les racines de l'équation : $p^2 + bp + c = 0$.

Finalement, en inversant la transformée de Laplace dans l'équation (III.22), nous obtenons :

$$U_c(t) = \frac{U_t}{R_c C_c} \frac{T_a T_b}{T_a - T_b} \left[\exp\left(-\frac{t}{T_a}\right) - \exp\left(-\frac{t}{T_b}\right) \right] \quad (\text{III.30})$$

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 :

$$T_a = \frac{T_2 - T_{cr}}{0,7} \quad (\text{III.31})$$

Et:

$$T_b = \frac{T_a}{\exp\left(1,35 + 1,2 \ln \frac{T_2}{T_{cr}}\right)} \quad (\text{III.32})$$

La valeur maximale de $U_c(t)$ sera

$$T_{cr} = \frac{T_a T_b}{T_a - T_b} \ln \frac{T_a}{T_b} \quad (\text{III.33})$$

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:

$$\frac{T_a T_b}{(T_a - T_b) R_c C_c} = 1 \quad (\text{III.34})$$

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

$$U_c(t) = U_t \left(\exp\left(-\frac{t}{T_a}\right) - \exp\left(-\frac{t}{T_b}\right) \right) \quad (\text{III.35})$$

C_c sera alors :

$$C_c = \frac{T_a T_b}{T_a - T_b} \frac{1}{R_c} \quad (\text{III.36})$$

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.23), nous donne alors :

$$T_a \approx R_g (C_g + C_c) \quad (\text{III.37})$$

$$T_b \approx R_c \frac{C_g C_c}{C_g + C_c} \quad (\text{III.38})$$

Ces équations nous permettent de déduire C_g et R_g . D'autre part, en posant :

$$\delta = \frac{T_a}{T_b} \quad \text{on peut déduire } U_t .$$

$$U_t = \frac{U_{cr}}{\delta^{1/(1-\delta)} - \delta^{\delta/(1-\delta)}} \quad (\text{III.39})$$

Finalement, $U_c(t)$ sera obtenue à partir du bloc diagramme de la Figure (III.11).

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].

Le schéma proposé pour cette étude est la totalité de la Figure (III.11). La fréquence des oscillations de l'onde de tension est :

$$f = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{1}{LC} - \left(\frac{R}{2L}\right)^2} \tag{III.40}$$

Où R et C sont définis comme suit:

$$R = \sqrt{2} \frac{L}{(R_g + R_c) \frac{C_c}{C_m} (C_m + C_c)} \tag{III.41}$$

Et

$$C = \frac{C_m C_c}{C_m + C_c} \tag{III.42}$$

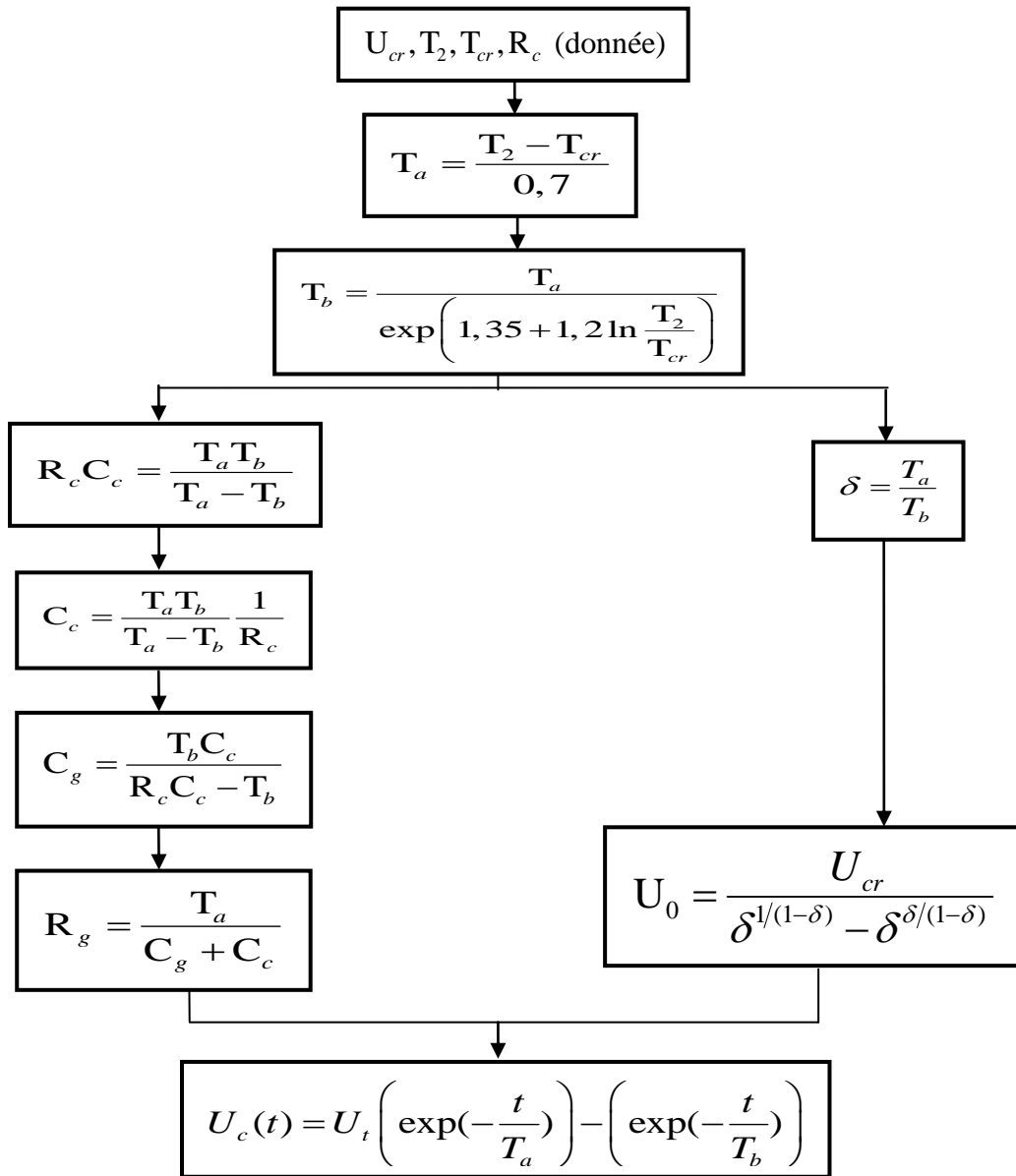


Figure III.11 - Bloc diagramme permettant le calcul des paramètres du schéma équivalent du générateur de Marx [27].

III-5.2 APPLICATIONS SUR DES TENSIONS REELLES

III-5.2.a. Onde de type (250/2500) μs

Nous avons appliqué également l'onde de choc qui simule la surtension de manœuvre, à savoir l'onde de type (250/2500) μs

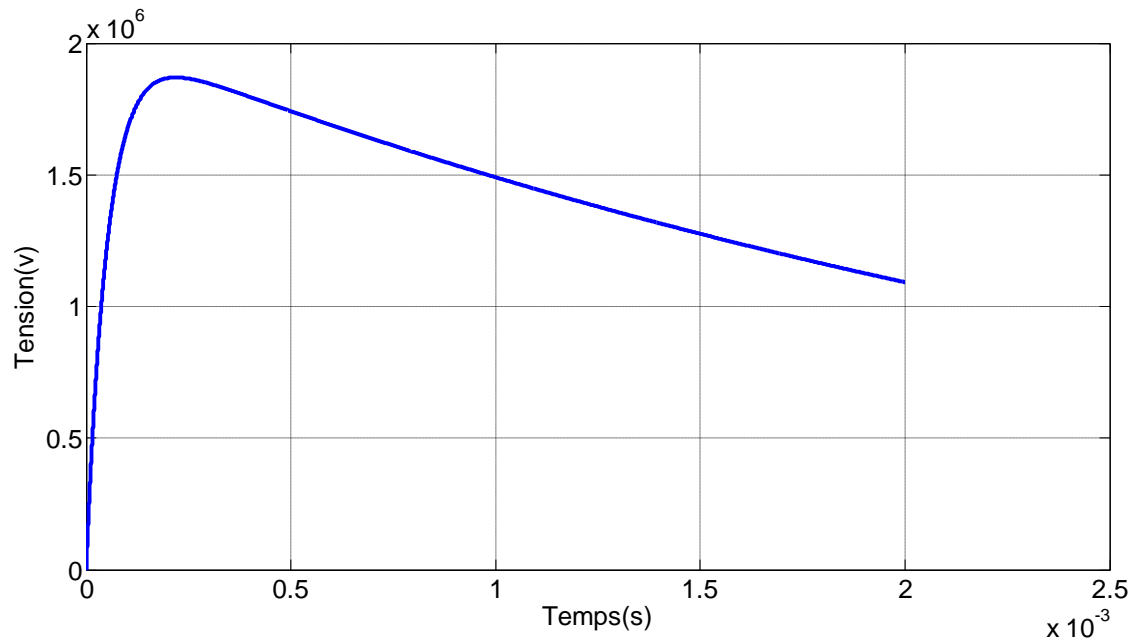


Figure III.12 - Tension de générateur de choc pour une onde (250/2500) μs avec une tension crête de 1870kV

Les résultats des paramètres de circuit équivalent pour une cette onde (250/2500) μs :

$$R_g = 157,382 \Omega$$

$$C_g = 20,089 \mu\text{F}$$

$$C_c = 0,334 \mu\text{F}$$

III-5.2.b. Onde de choc de foudre (1.2/50) μs

Nous avons appliqué également l'onde de choc qui simule la foudre réelle, à savoir l'onde de type (1.2/50) μs

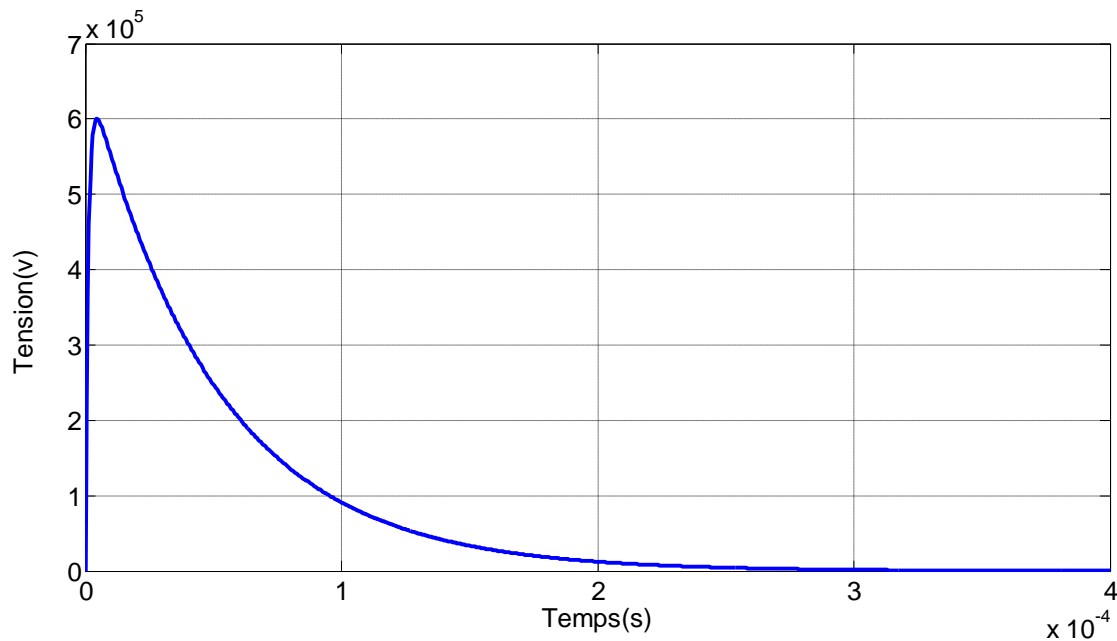


Figure III.13 - Tension de générateur de choc pour une onde (1.2/50) μ s avec une tension crête de 600kV

Les résultats des paramètres de circuit équivalent pour une cette onde (1.2/50) μ s :

$$R_g = 159.527 \Omega$$

$$C_g = 0.435 \mu\text{F}$$

$$C_c = 1,28. \text{nF}$$

III-6 CONCLUSION

Dance ce chapitre, nous avons étudié dans une première partie la simulation de la foudre au laboratoire par la reproduction de la foudre pendant le saut final par une onde de choc standard générée à partir d'un générateur de choc de type Marx. Dans une deuxième partie, nous avons étudié la génération par simulation numérique des ondes d'impulsions et plus particulièrement l'onde de choc de foudre, en utilisant les circuits équivalents. Cette étape permet par la suite de passer à la modélisation de la décharge de foudre en utilisant toujours la théorie de circuit équivalent. Le circuit électrique proposé contient des condensateurs de charge et des condensateurs de décharge ce qui permet de générer le front et la queue de l'onde bi-exponentielle. Le calcul des éléments du circuit dépend des paramètres physiques relatifs aux différentes étapes de propagation de la décharge. La tension ainsi générée sera appliquée à l'intervalle d'air pointe-plan en remplaçant ainsi la simulation pratique en laboratoire.

Chapitre IV

IV.1 Introduction :

La décharge de foudre est un phénomène physique aléatoire lors de son développement avant le saut final, ce qui rend ce phénomène loin d'être maîtriser et par la suite difficile à modéliser et à l'étudier numériquement malgré le grand progrès dans les recherches menées de ce contexte.

La reproduction de la foudre au laboratoire par le générateur de choc a permet d'effectuer une multitude d'études sur la rigidité des intervalles d'air et l'influence de la nature de la terre sur la tension disruptive des intervalles d'air pointe-plan. Dans le présent chapitre, nous allons étudier l'influence du niveau d'hétérogénéité et la conductivité de la terre sur la rigidité diélectrique.

IV.2 Modèles expérimentaux

IV.2.1 Cas du sol homogène

Le modèle expérimental utilisé pour étudier la configuration tige-plan dans le cas du sol homogène mauvais conducteur est représenté à la Figure IV.1 l'électrode de haute tension du système est une tige métallique présentant une extrémité hémisphérique de même diamètre. La terre du système est constituée d'une couche d'eau distillée. Elle a une conductivité γ variable.

Cette couche d'eau repose sur un plan conducteur mis à la terre. Pour chaque conductivité du sol mauvais conducteur, la longueur de l'intervalles h est variée. Les valeurs de 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

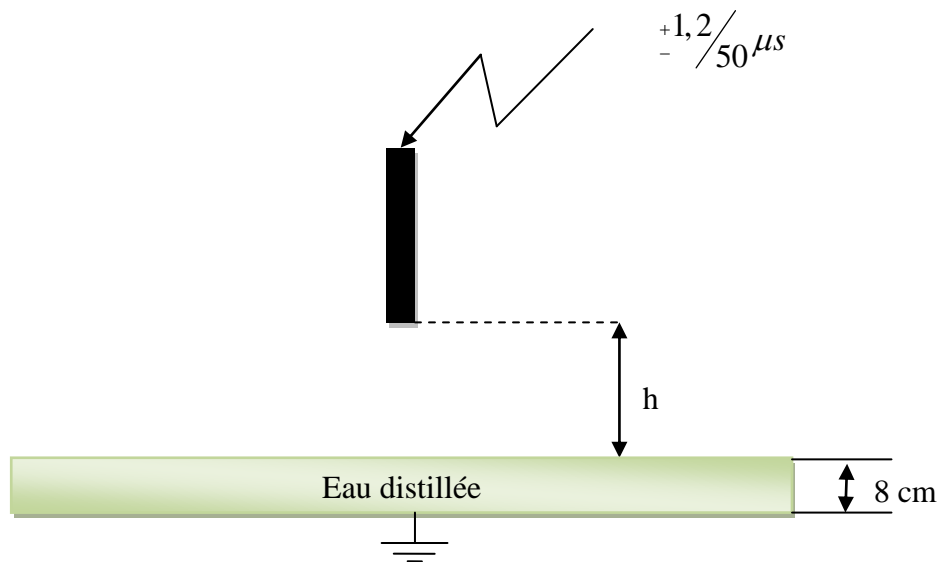


Figure IV.1- Configuration du system tige-plan avec sol homogène mauvais conducteur [34]

IV.2.2 Cas du sol hétérogène

Le modèle expérimental utilisé pour étudier la configuration tige-plan avec une terre hétérogène est représenté à la Figure (IV.2) la tige métallique verticale est la même que celle utilisée dans la configuration tige-plan avec sol homogène. Le plan est constitué de deux matériaux ayant une interface

bien déterminée. Le premier matériau est constitué d'une plaque d'aluminium. Il représente la partie bonne conductrice du sol. La couche d'eau distillée utilisée dans le modèle de la terre homogène. Représentant la partie mauvaise conductrice, constitue le deuxième matériau. Cette couche repose sur un plan conducteur mis à la terre. L'hétérogénéité du sol est caractérisée par le rapport des conductivités des deux milieux. C'est ce rapport qui définit le degré d'hétérogénéité de la terre. la position de la tige est déterminée par sa hauteur h par rapport au sol et par la distance d entre son axe et l'interface séparant les deux milieux qui constituent la terre.

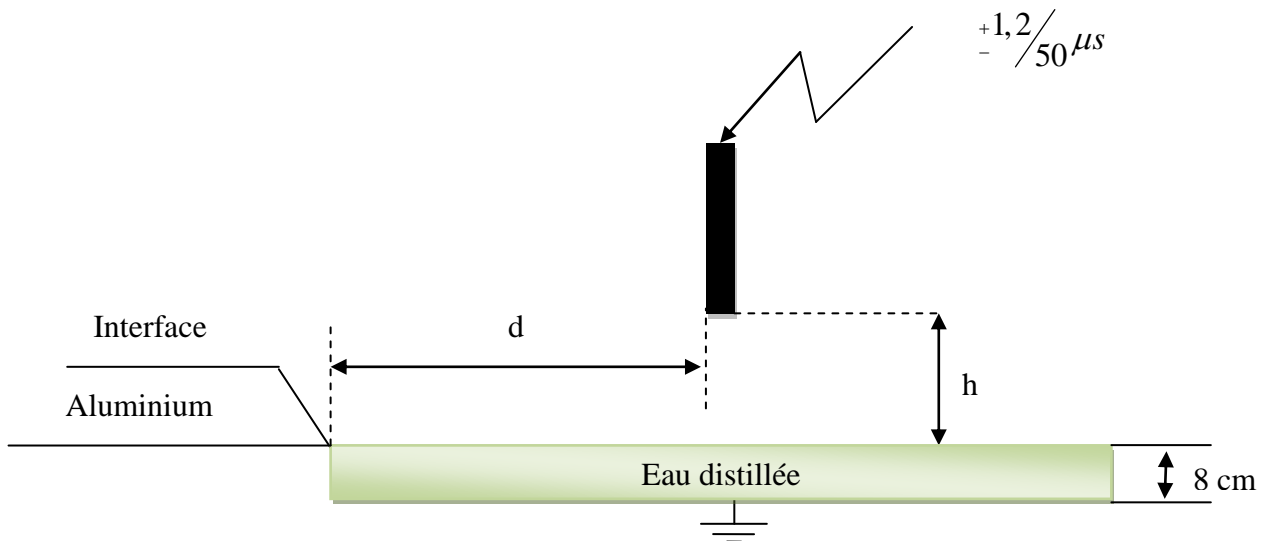


Figure IV.2 - Configuration du système tige-plan avec sol hétérogène [34]

IV.3 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. Le temps entre deux chocs successifs est de l'ordre de 30 secondes. La droite tracée en minimisant la somme des carrés de distances des points et elle peut donc être utilisé pour obtenir la meilleure estimation possible de la moyenne $U_{50\%}$ et de l'écart type σ [35]. Les corrections atmosphériques sont appliquées conformément aux recommandations de la C.E.I. [31]

IV.4 Les corrections atmosphériques

La tension de décharge disruptive des intervalles d'air dépend des conditions atmosphériques du voisinage. La tension de claquage d'un parcours donné dans l'air est accrue par l'accroissement de la densité de l'air ou de l'humidité [31].

IV.4.1 Influence de la densité relative de l'air

On sait que la température et la pression, en modifiant la densité du gaz, influent sur la rigidité diélectrique de l'air. Dans la CEI 60 [31], on trouve la notion de densité relative qui est définie comme étant le rapport de la densité de l'air dans les conditions de pressions P et de température T , à la densité de l'air dans les conditions atmosphériques de référence dites normales, c'est à dire:

Température ambiante $T_0 = 20 \text{ }^\circ\text{C}$

Pression atmosphérique $P_0 = 1013 \text{ mbar (= 760 mmHg)}$

$$\partial = 0.289 \frac{P}{273+T} \tag{IV.1}$$

La pression P est en mbar et la température T en $^\circ\text{C}$.

Cette équation (IV.1) est utilisée pour convertir la tension de décharge U mesurée dans les conditions atmosphériques d'essais (température T et pression P) à la valeur U_0 qui aurait été obtenue dans les conditions normales (T_0 et P_0) citées ci-dessus.

$$U_0 = \frac{U}{(\partial)^n} \quad n \leq 1 \tag{IV.2}$$

L'exposant n dépend de la forme d'onde, de la longueur d'intervalle et de la position des électrodes. Dans le cas d'un intervalle pointe-plan soumis à une onde de choc de foudre, n est égale à l'unité.

IV.4.2 Influence de l'Humidité

La tension d'amorçage est particulièrement moins sensible à la variation de l'humidité dans le cas des ondes rapides ou très rapides. C'est le cas pour les chocs de foudre négatifs ($K_h=1$ selon CEI-60). Ainsi, nous ne tiendrons pas compte de ce facteur. l'humidité relative variait entre 75% et 80% .

IV.5 Niveau de terre fictive

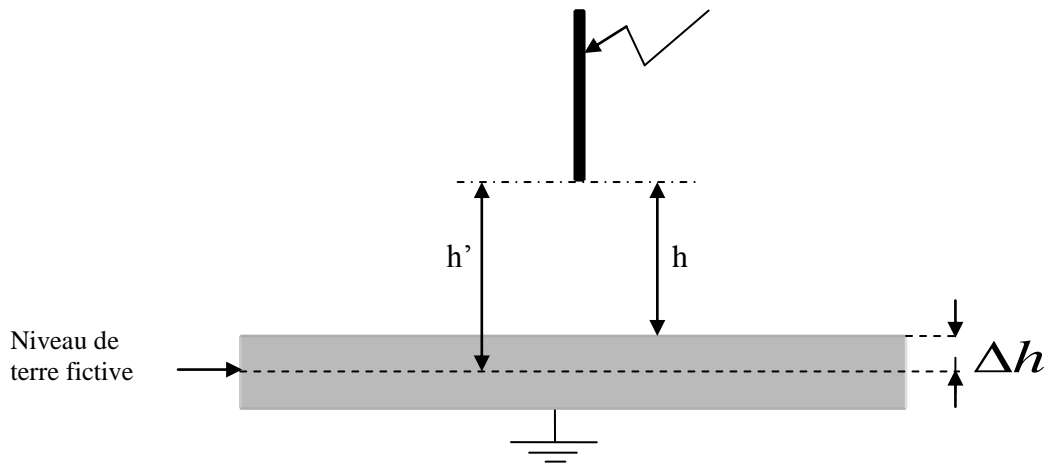


Figure IV.3 - Système tige-plan avec sol conducteur équivalent au système avec sol mauvais conducteur [34].

IV.6 Tension $U_{50\%}$ pour un sol homogène bon conducteur

IV.6.1 En polarité positive [34]

h(cm)	4	8	12	14
$U_{50\%}$ (kV)	59.6	90	121.2	130.9

Tableau IV.1 - $U_{50\%}$ en fonction de h, intervalle tige positive-plan, sol homogène [34]

IV.6.2 En polarité négative [34]

h(cm)	4	8	12	14
$U_{50\%}$ (kV)	89.5	167.5	248.4	292.2

Tableau IV.2 – $U_{50\%}$ en fonction de h, intervalle tige négative - plan, sol homogène [34]**IV.7 Rigidité des intervalles d'air d'un sol hétérogène**

Comme mentionné plus haut la terre discontinue est composée d'un côté d'un sol conducteur et de l'autre côté d'un sol mauvais conducteur dont la conductivité de la terre est variable selon 4 valeurs ($\gamma = 8\mu S/cm$; $\gamma = 35\mu S/cm$, $\gamma = 65\mu S/cm$, $\gamma = 130\mu S/cm$) nous allons étudier l'influence de la hauteur h de l'intervalle d'air et de la distance d entre la tige et l'interface séparant les deux milieux qui constituent la terre.

IV.7.1 Influence de la distance d**IV.7.1.1 En polarité positive**

Les Figures IV.4 à IV.7 donnent la tension disruptive $U_{50\%}$ en fonction de la distance d pour les différentes valeurs de la conductivité.

D'après les courbes obtenues, nous remarquons que pour la même distance d positive de la tige, la tension disruptive augmente au fur et à mesure que la conductivité diminue. La présence de la couche mauvaise conductrice modifie considérablement les phénomènes entrant dans le développement de la décharge ce qui augmente le niveau de tension U_{50} , cet influence de la couche mauvaise conductrice et plus remarquable lorsque on s'éloigne de l'interface ($d=50$ cm) ; les points relevés pour les différentes conductivités sont distinctes.

Pour des distances négatives de la tige haute tension de l'interface, les tensions U_{50} pour les différentes conductivités sont très proches l'une de l'autre, elles sont confondues pour ($d=-50$ cm) et elles coïncident avec la tension obtenue pour une terre homogène bonne conductrice.

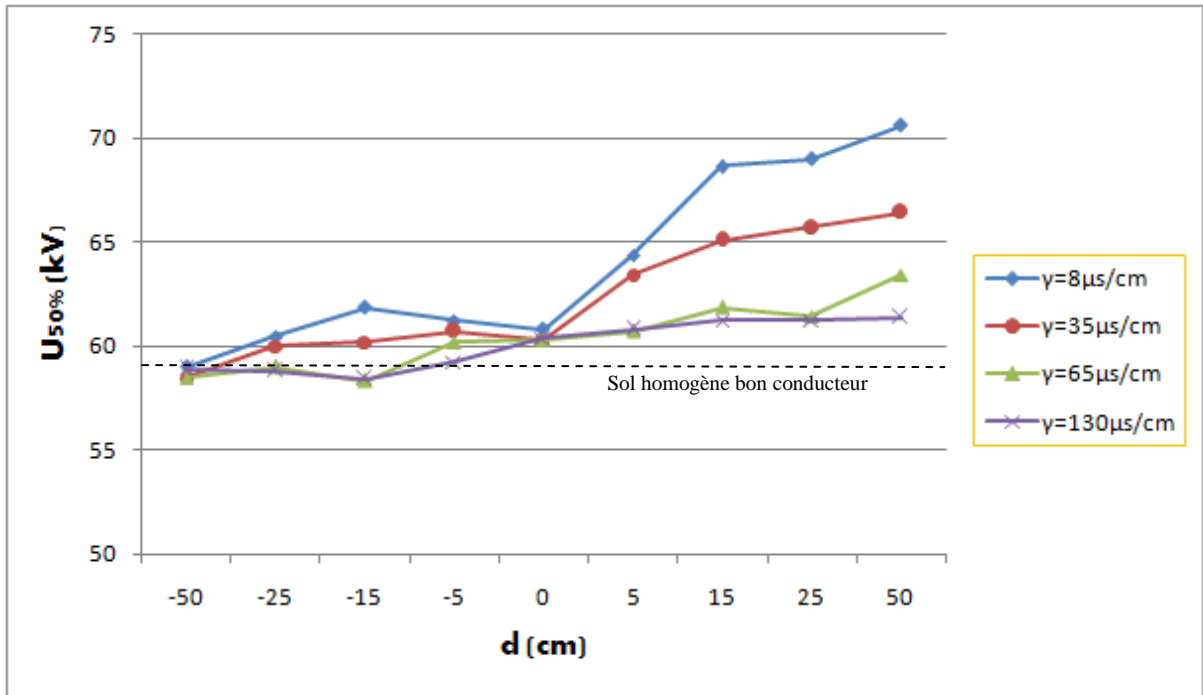


Figure IV.4 - $U_{50\%}$ en fonction de la distance dans le cas de la tige positive ($h=4\text{cm}$) [34].

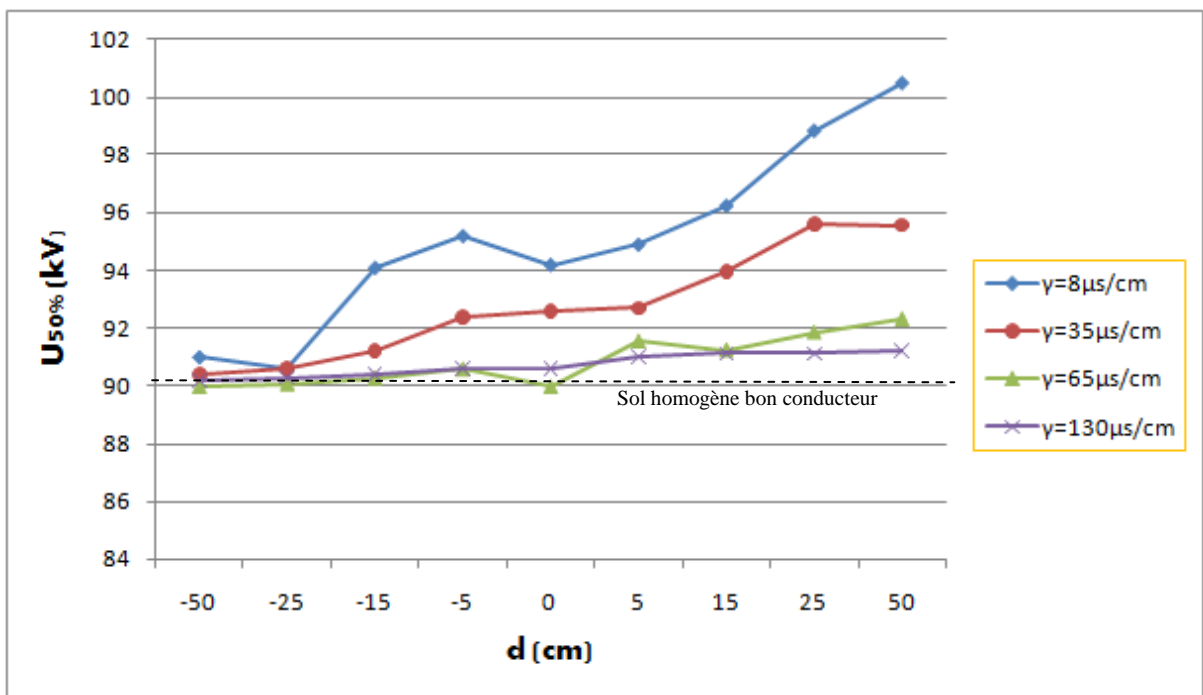


Figure IV.5 - $U_{50\%}$ en fonction de la distance dans le cas de la tige positive ($h=8\text{cm}$) [34].

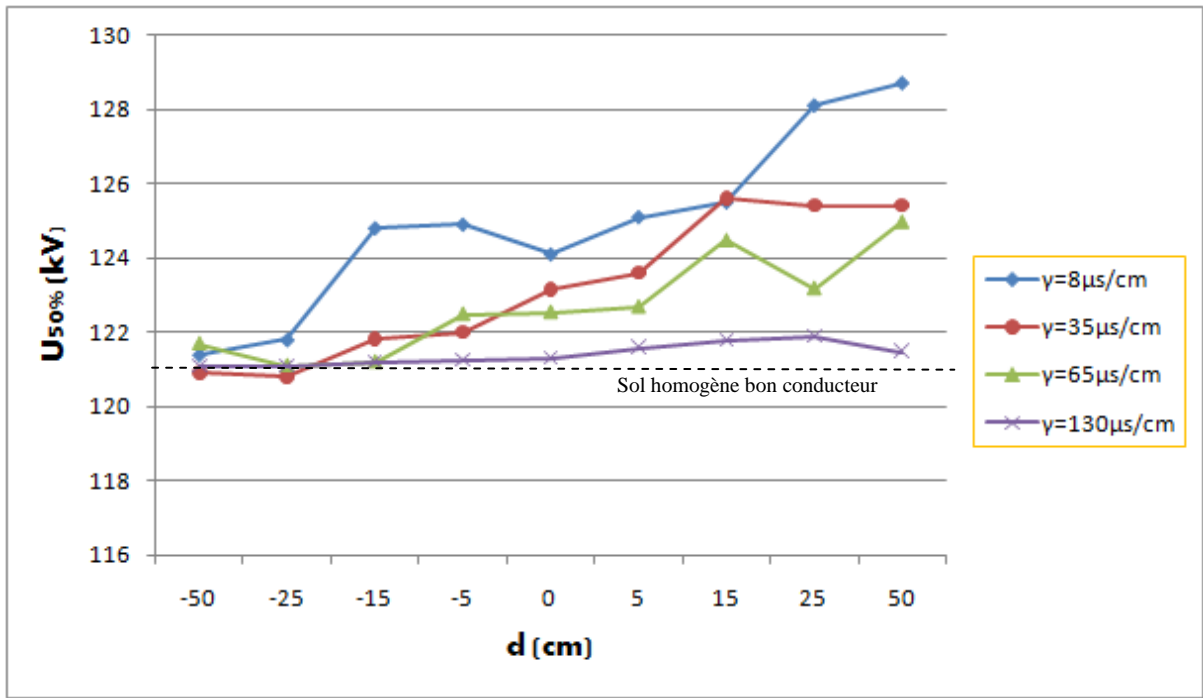


Figure IV.6 - $U_{50\%}$ en fonction de la distance dans le cas de la tige positive ($h=12\text{cm}$) [34].

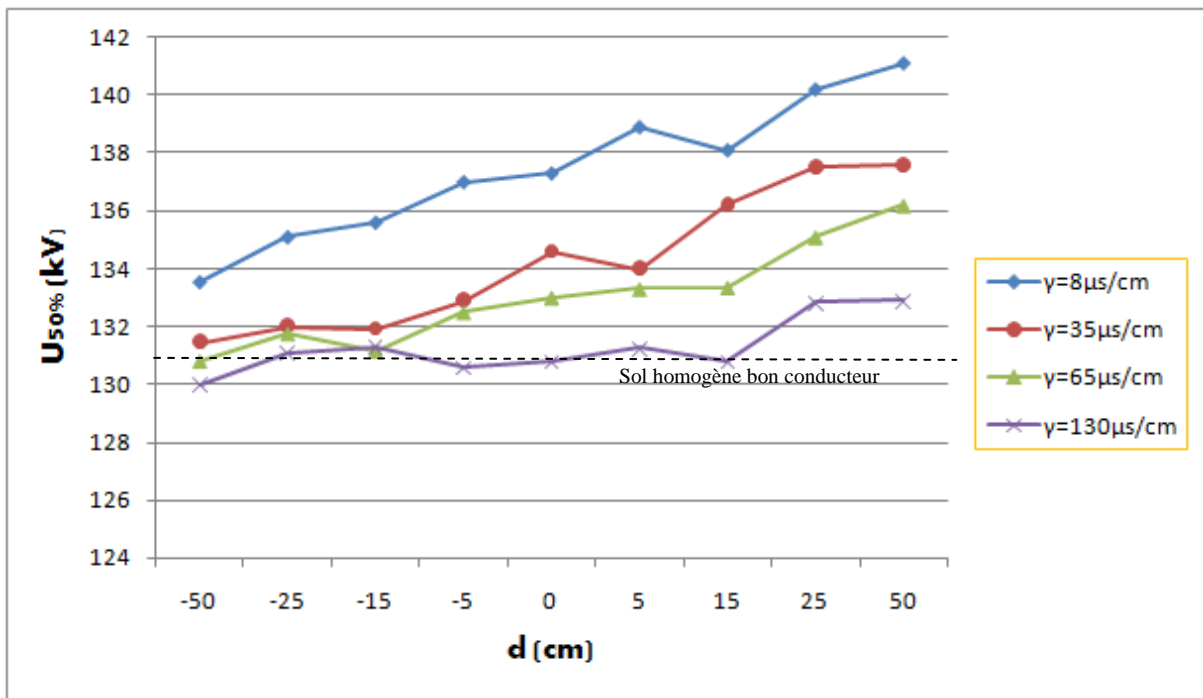


Figure IV.7 - $U_{50\%}$ en fonction de la distance dans le cas de la tige positive ($h=14\text{cm}$) [34].

IV.7.1.2 En polarité négative

Le comportement de la terre mauvaise conductrice sous une tension de choc négative est similaire à son comportement sous tension positive. On note la diminution de la tenue de l'intervalle au niveau de l'interface observé pour une la plus faible conductivité utilisée $\gamma = 8\mu S/cm$ (Figures IV.8 à IV.11).

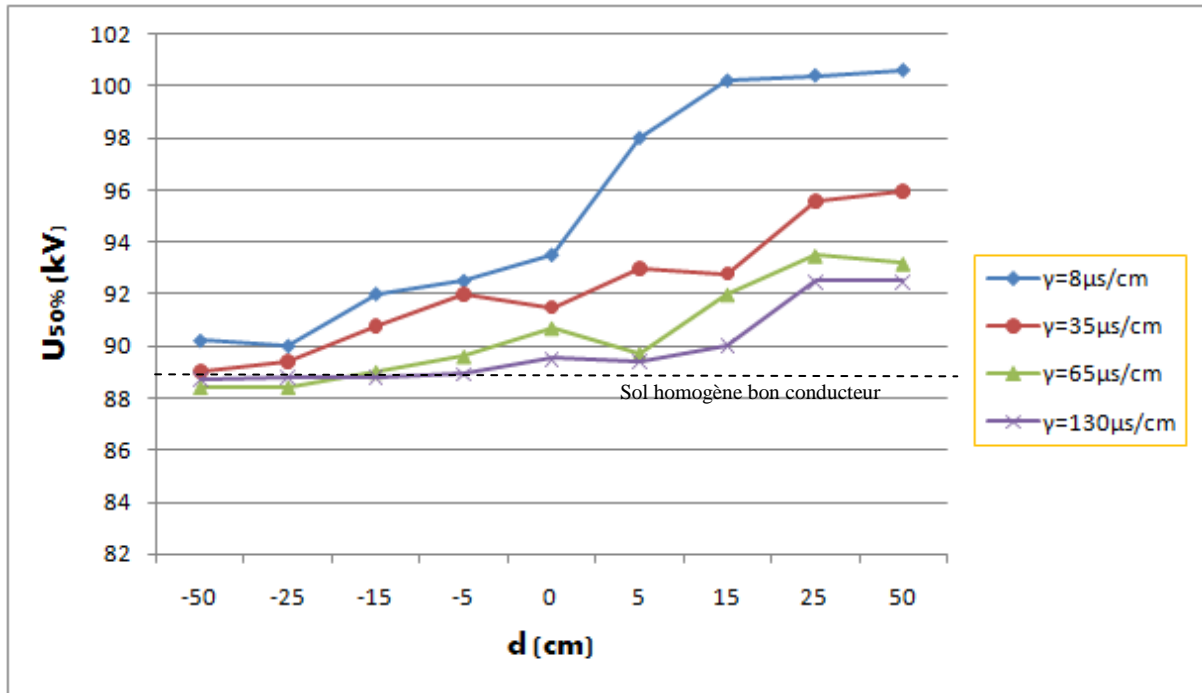


Figure IV.8 - U_{50} en fonction de la distance dans le cas de la tige Négative ($h=4cm$) [34].

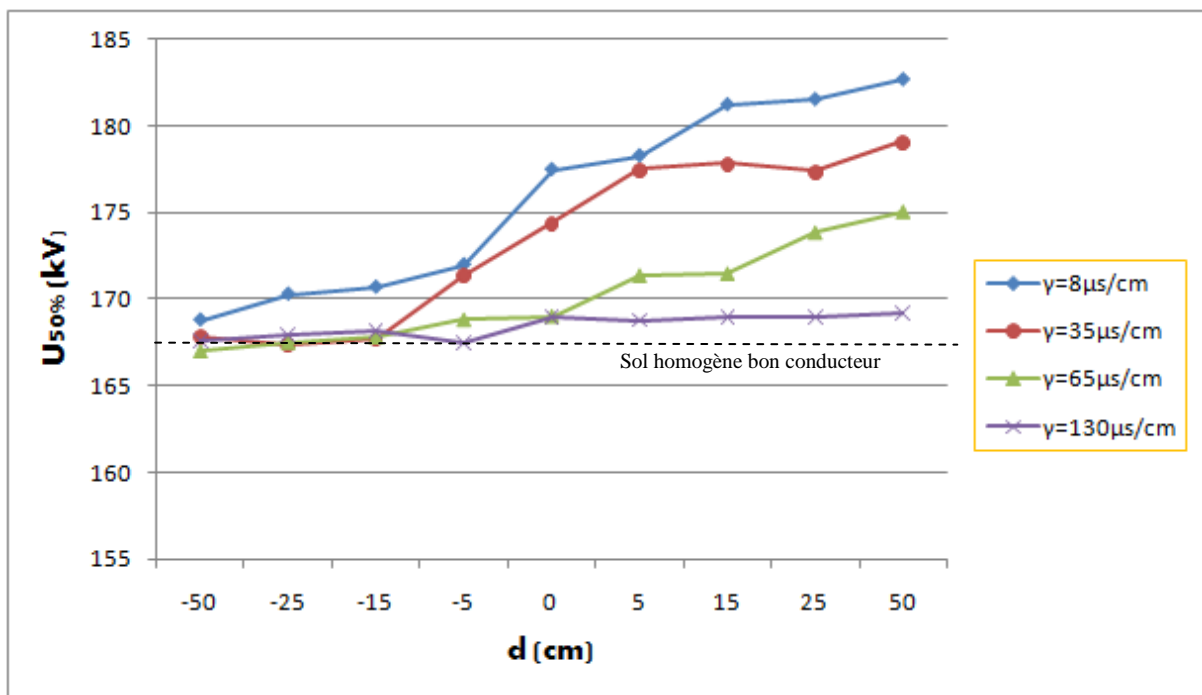


Figure IV.9 - U_{50} en fonction de la distance dans le cas de la tige Négative ($h=8cm$) [34].

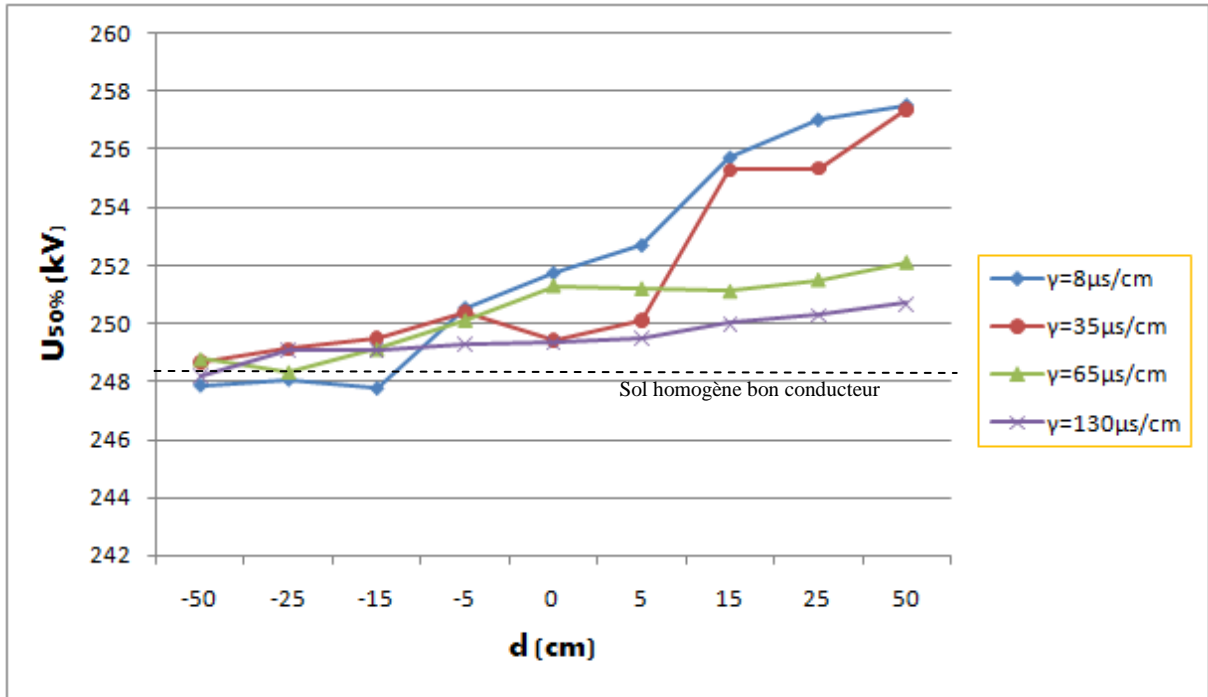


Figure IV.10 - $U_{50\%}$ en fonction de la distance dans le cas de la tige Négative ($h=12\text{cm}$) [34].

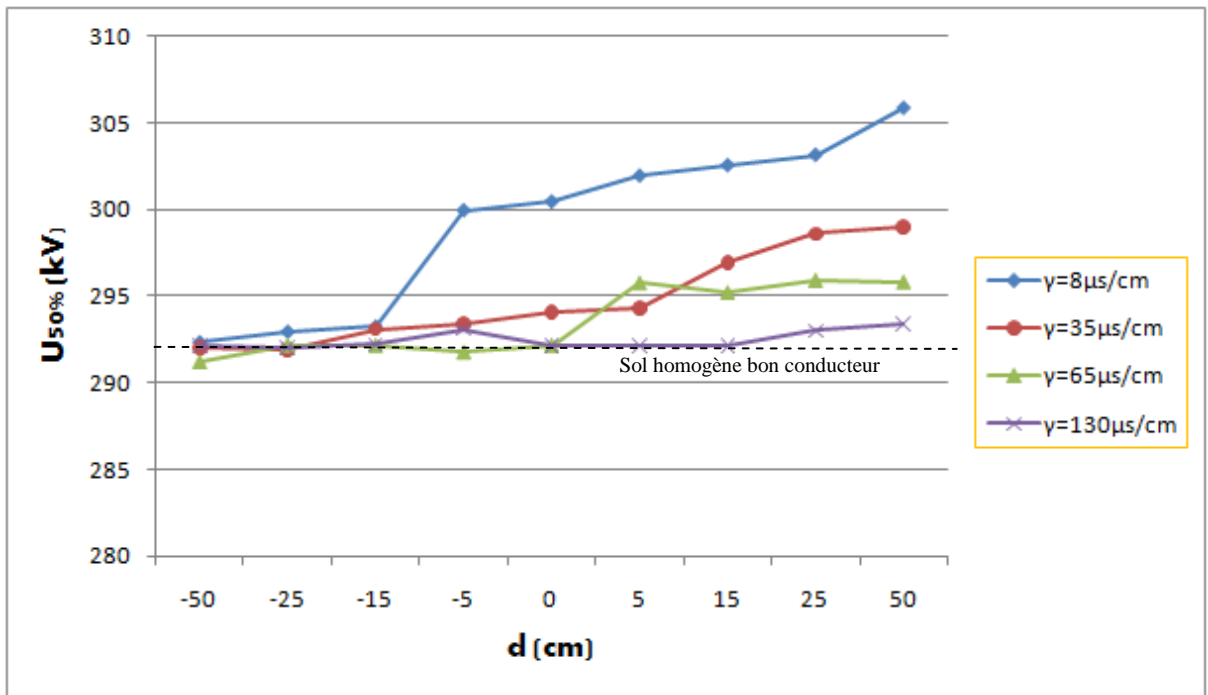


Figure IV.11 - $U_{50\%}$ en fonction de la distance dans le cas de la tige Négative ($h=14\text{cm}$) [34].

IV.7.2 Influence de la conductivité

IV.7.2.1 En polarité positive

Les Figures IV.12 à IV.15 donnent la tension disruptive U_{50} en fonction de la conductivité pour les différentes distances d . Ces figures montrent clairement que les variations de la tension de tenue en fonction de la distance de la tige haute tension par rapport à l'interface est plus importantes au fur et à mesure que la conductivité s'affaiblit, ce qui augmente le degré d'hétérogénéité de la terre. La variation est plus significative lorsque la tige est du côté terre mauvaise conductrice donc pour des distances d positives. Donc la partie mauvaise conductrice du sol est équivalente à un sol plan conducteur situé à une profondeur dépendant de la conductivité, nous pouvons assimiler le système tige-sol hétérogène à un sol tige-sol discontinu de profondeur correspondant à la conductivité de la couche mauvaise conductrice.

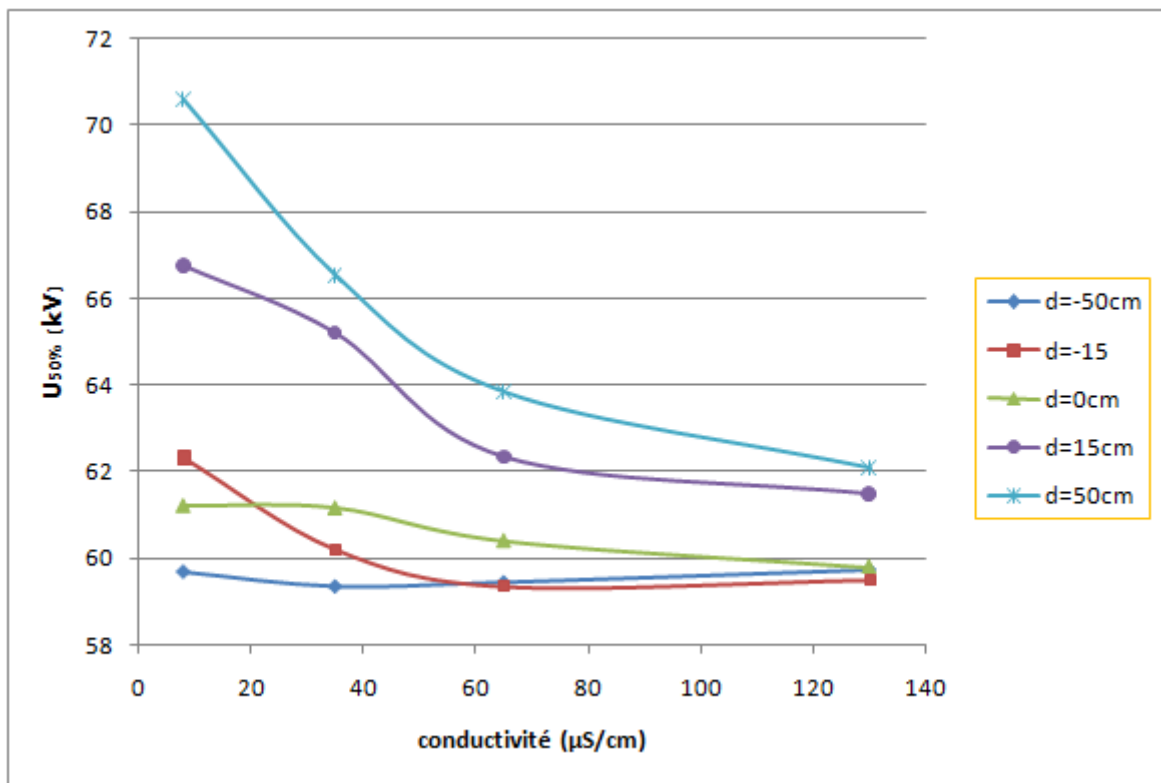


Figure IV.12 - U_{50} en fonction de la conductivité dans le cas de la tige positive ($h=4\text{cm}$) [34].

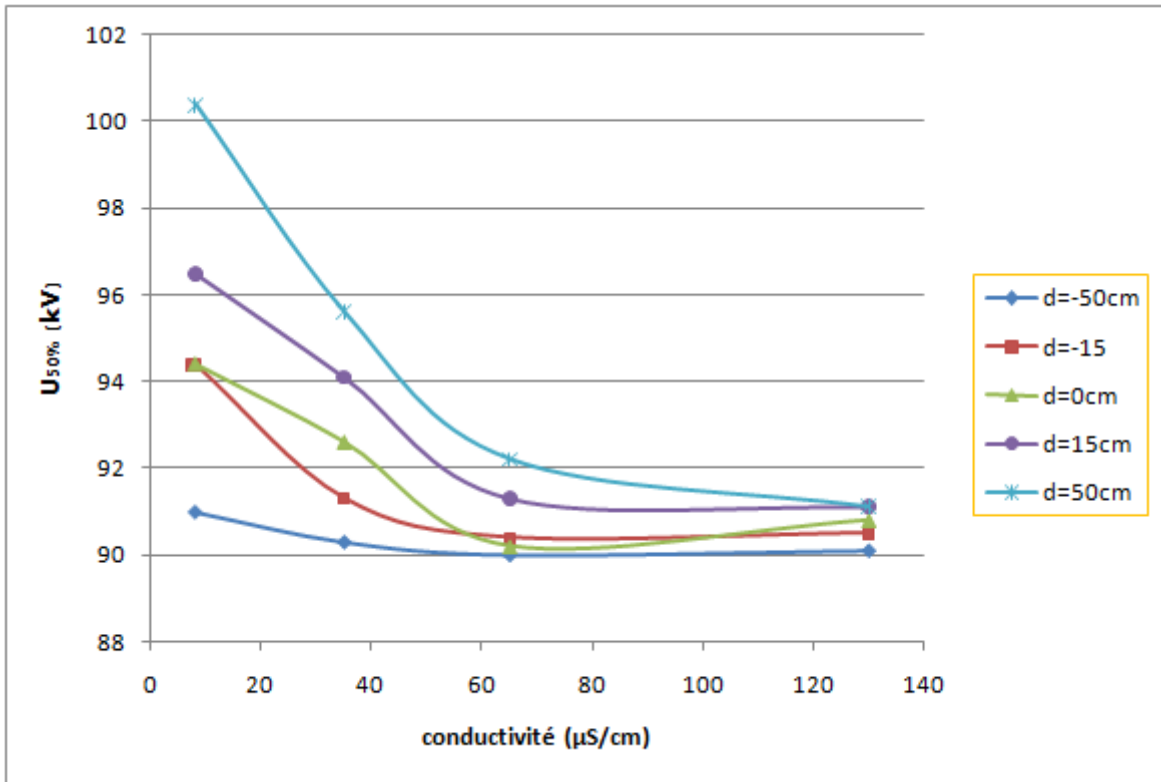


Figure IV.13 - U_{50} en fonction de la conductivité dans le cas de la tige positive ($h=8\text{cm}$) [34].

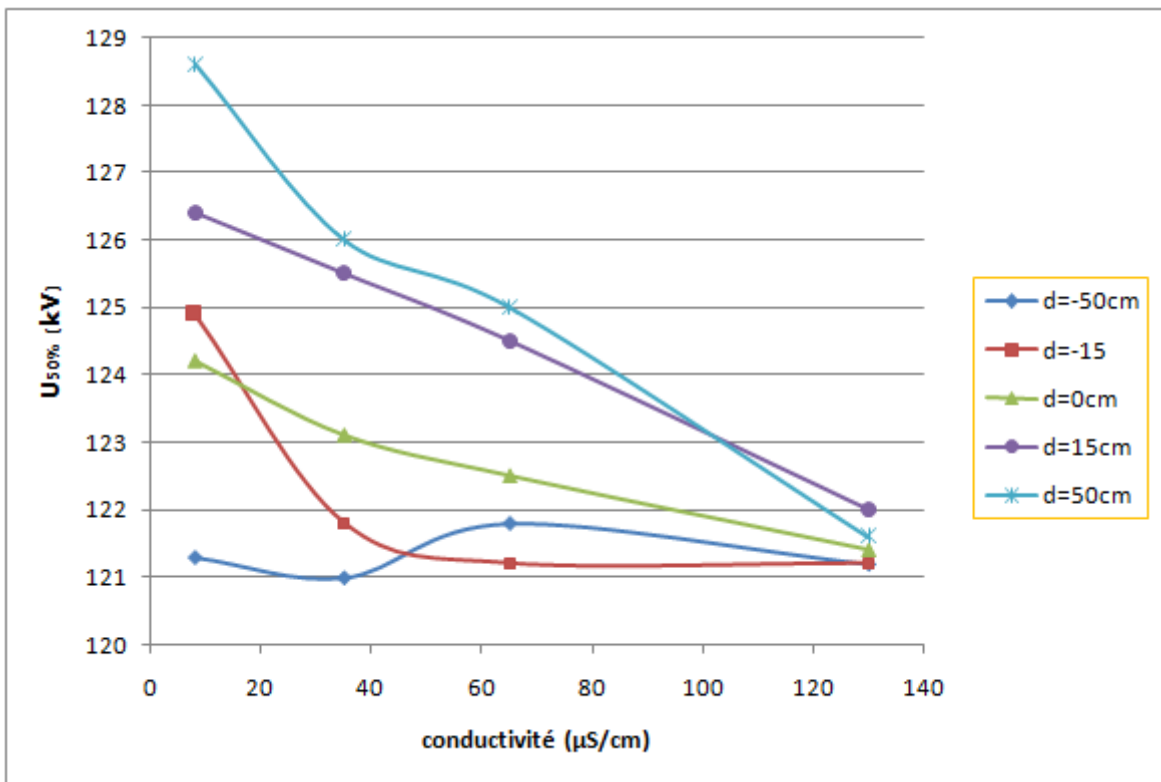


Figure IV.14 - U_{50} en fonction de la conductivité dans le cas de la tige positive ($h=12\text{cm}$) [34].

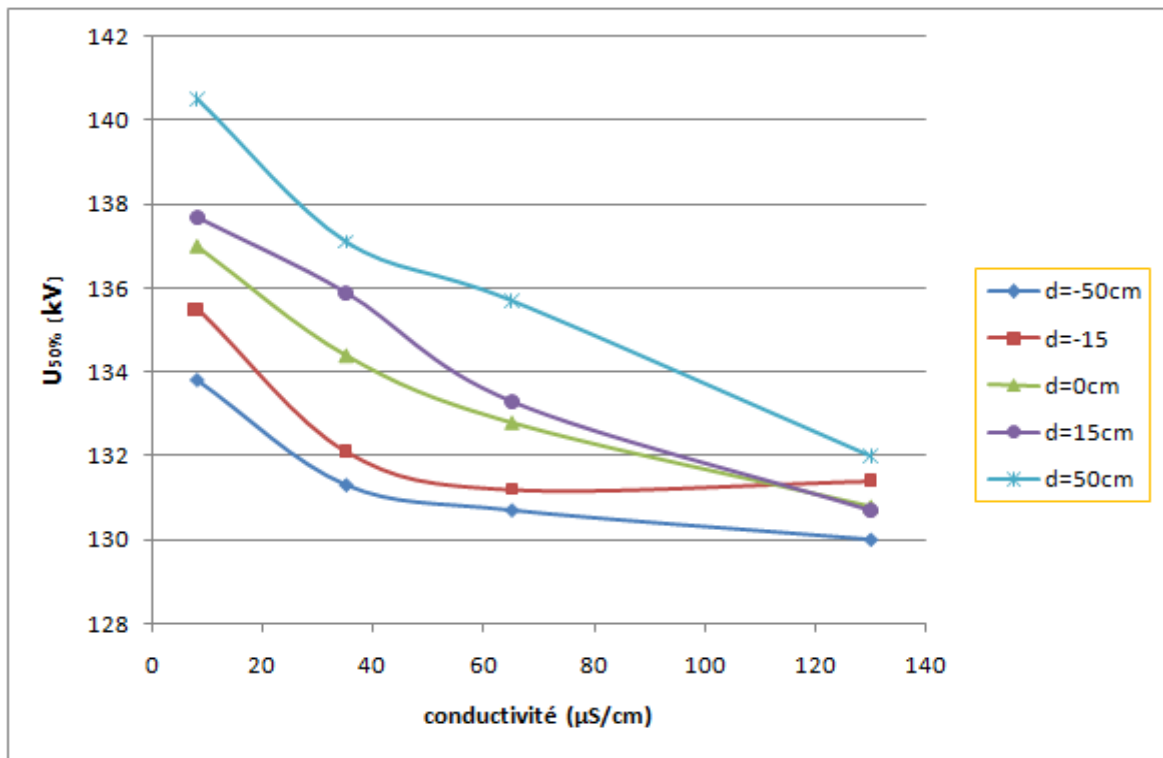


Figure IV.15 - U_{50} en fonction de la conductivité dans le cas de la tige positive ($h=14\text{cm}$) [34].

IV.7.2.2 En polarité négative

Les Figures IV.16 à IV.19 montrent que le comportement du système tige-terre hétérogène sous tension de choc de foudre négative est similaire à son comportement sous tension positive.

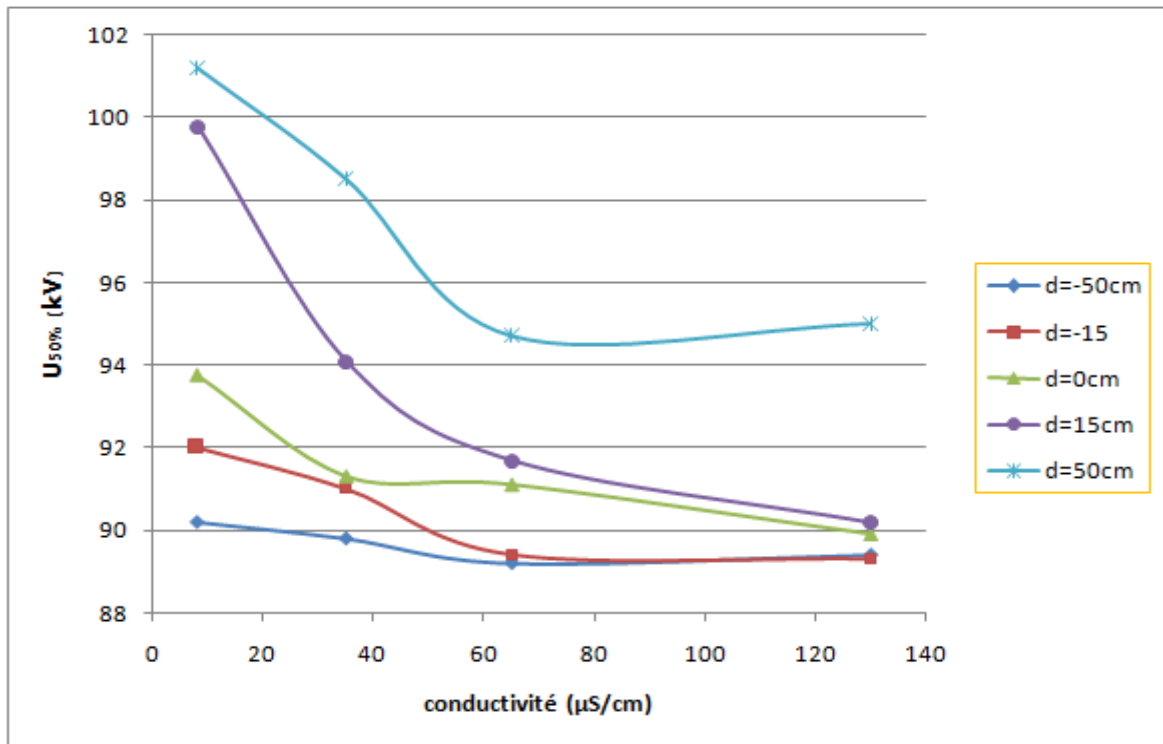


Figure IV.16 - U_{50} en fonction de la conductivité dans le cas de la tige Négative ($h=4\text{cm}$) [34].

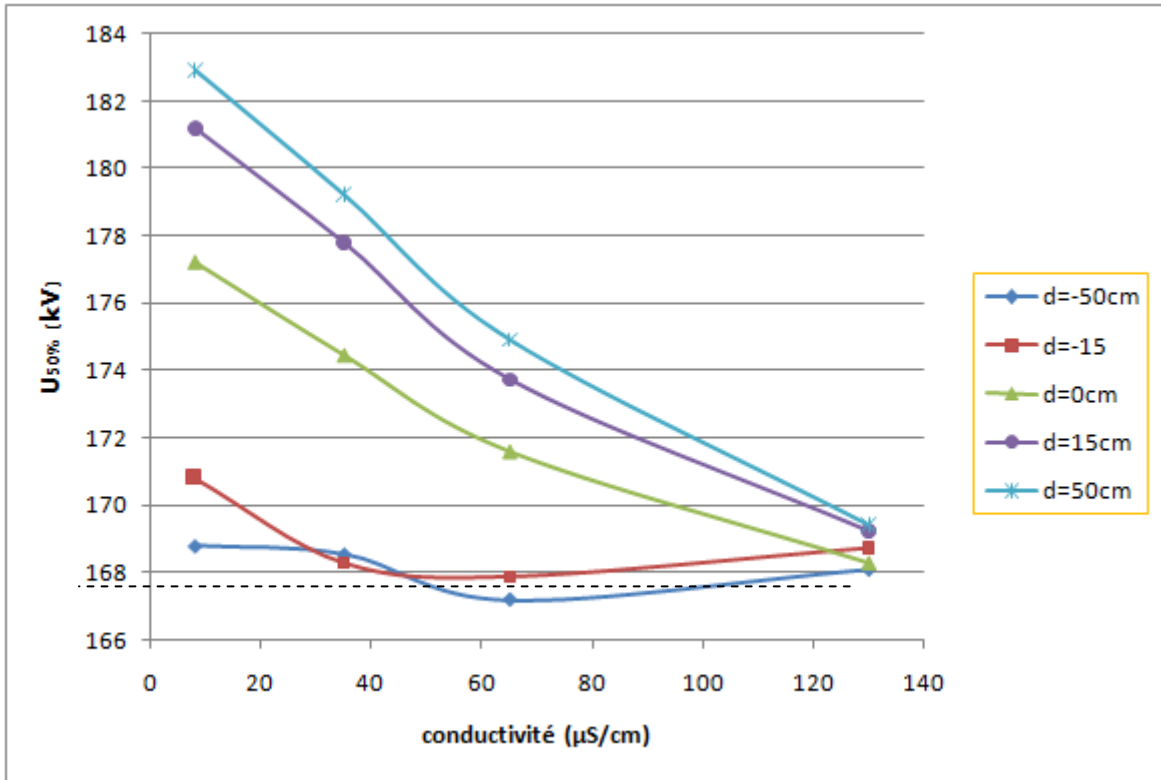


Figure IV.17 - U_{50} en fonction de la conductivité dans le cas de la tige Négative ($h=8\text{cm}$) [34].

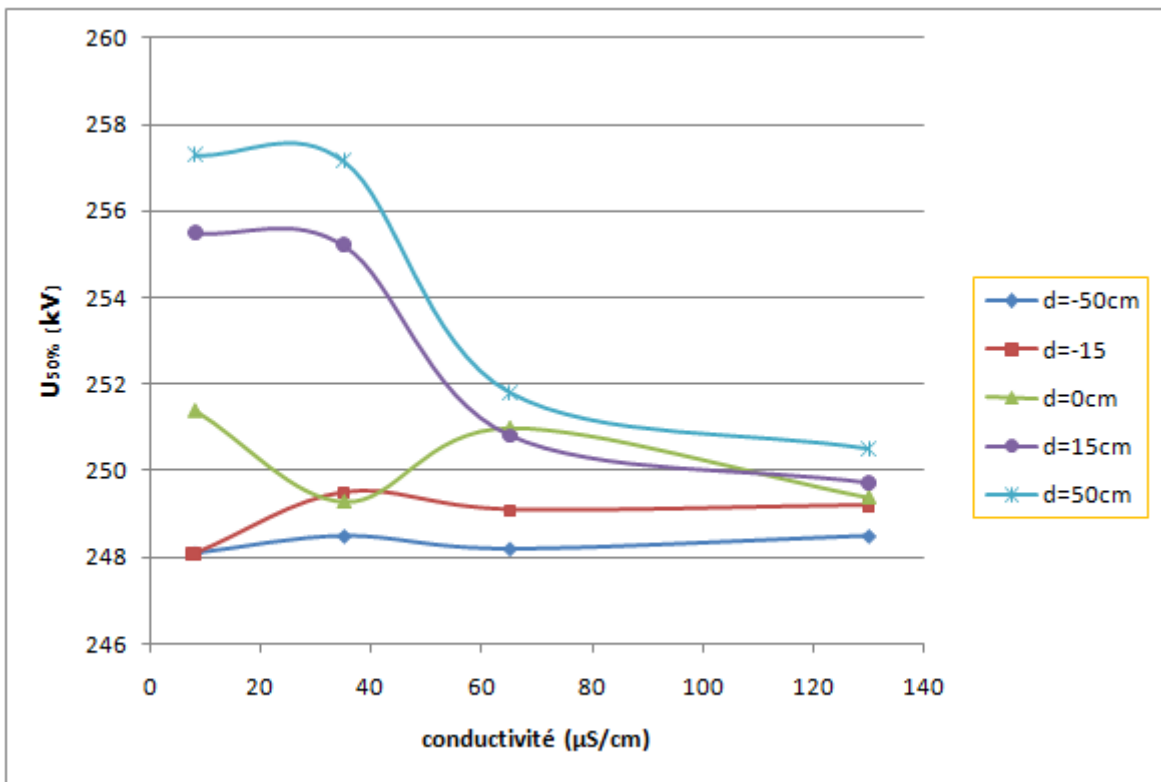


Figure IV.18 - U_{50} en fonction de la conductivité dans le cas de la tige Négative ($h=12\text{cm}$) [34].

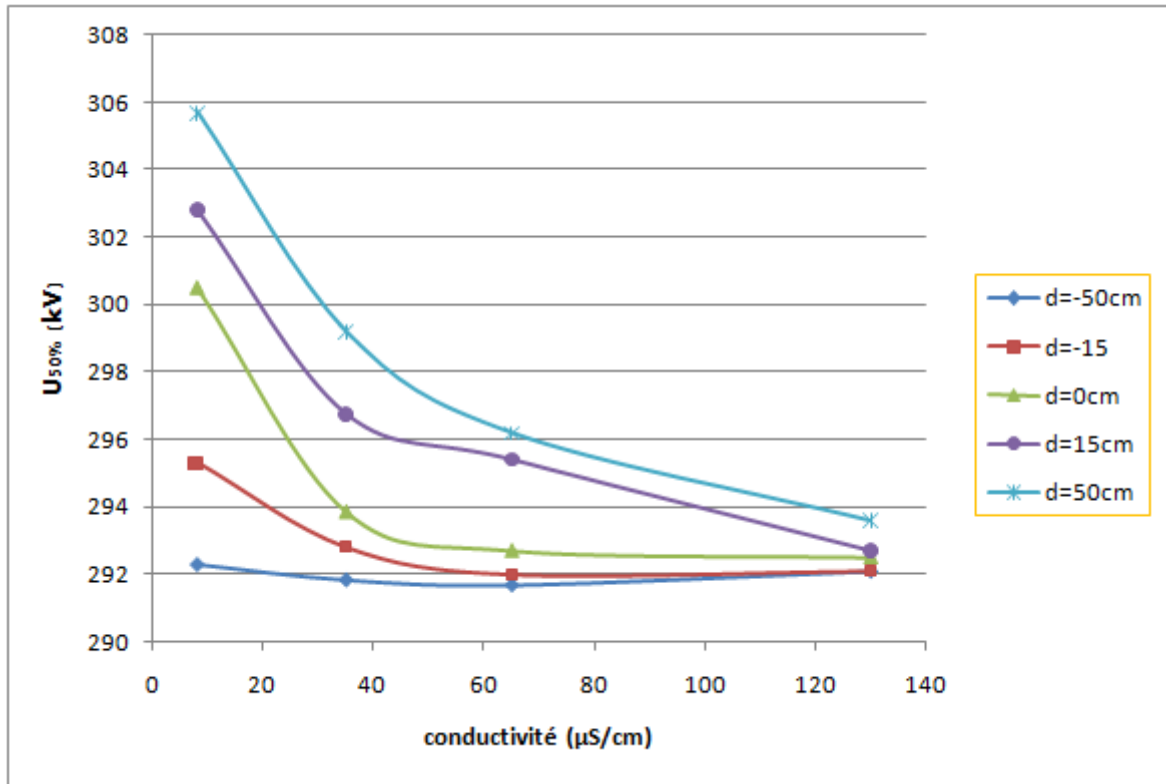
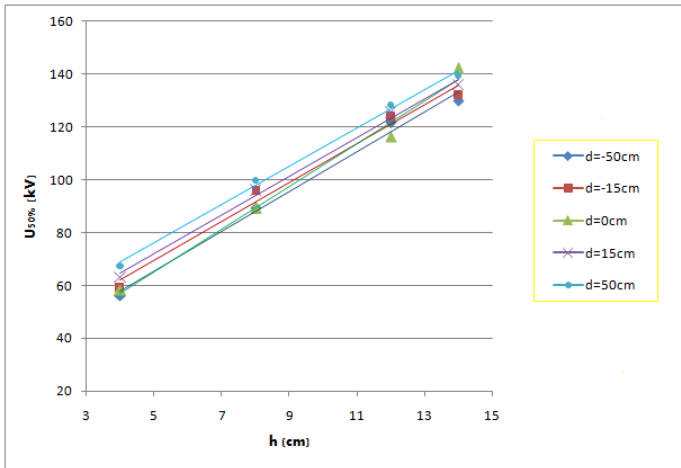


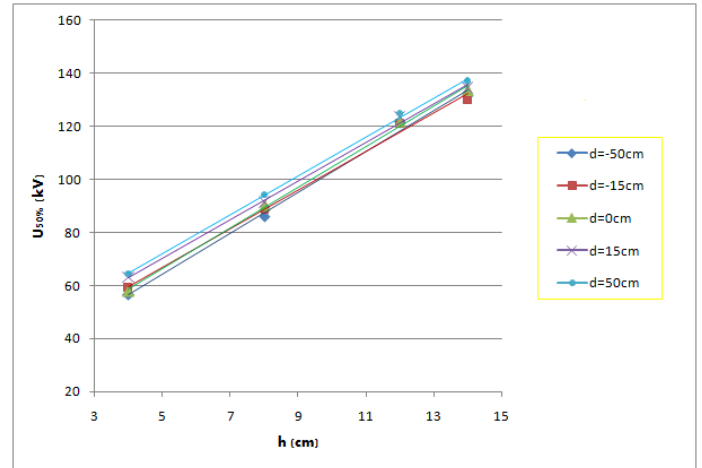
Figure IV.19 - U_{50} en fonction de la conductivité dans le cas de la tige Négative ($h=14\text{cm}$) [34].

IV.7.3 Influence de la hauteur de l'intervalle d'air

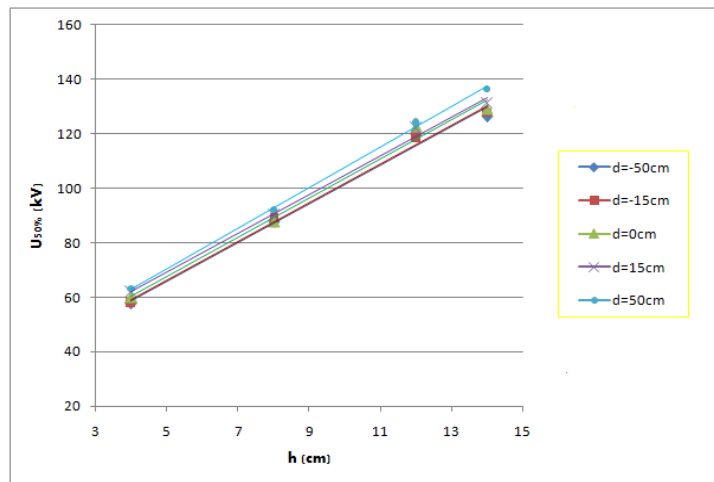
IV.7.3.1 En polarité positive



(a)



(b)



(c)

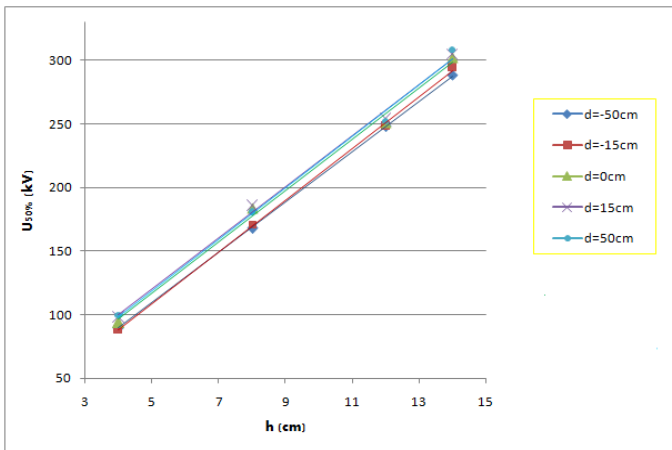
(a) $\gamma = 8\mu S / cm$

(b) $\gamma = 35\mu S / cm$

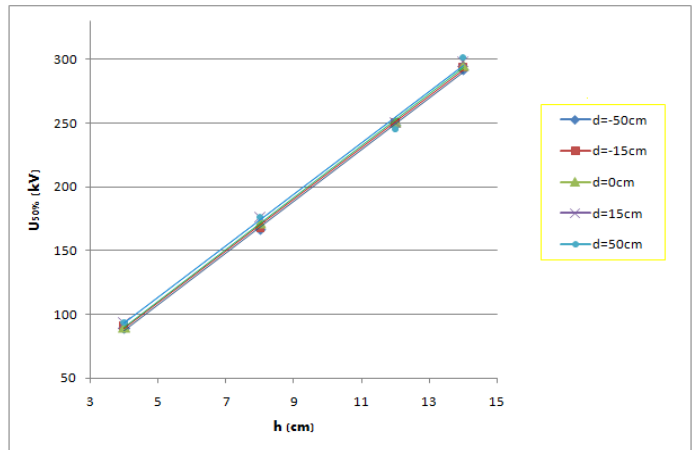
(c) $\gamma = 65\mu S / cm$

Figure IV.20 - U_{50} en fonction de l'intervalle dans le cas de la tige positive [34].

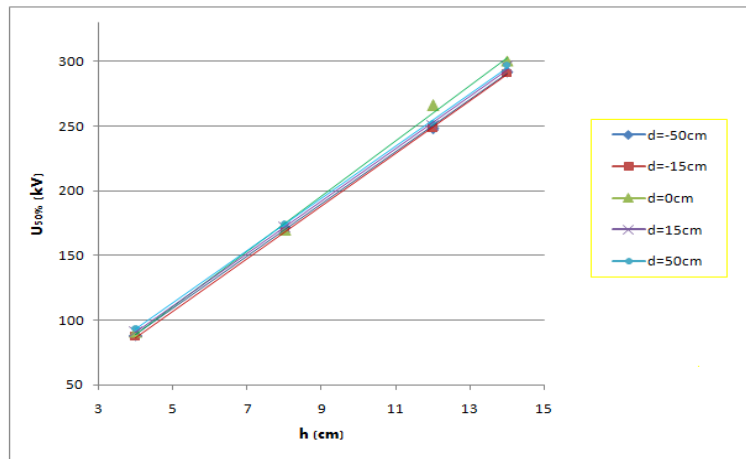
IV.7.3.2 En polarité négative



(a)



(b)



(c)

(a) $\gamma = 8\mu S / cm$

(b) $\gamma = 35\mu S / cm$

(c) $\gamma = 65\mu S / cm$

Figure IV.21 - U_{50} en fonction de l'intervalle dans le cas de la tige Négative[34].

Les Figures IV.20 et IV.21 donnent les variations de la tension U_{50} en fonction de la longueur de l'intervalle d'air tige-sol « h » pour les différentes distances « d ». pour toutes les distances, les droites $U_{50} = f(h)$ montrent la relation linéaire entre la tension disruptive et la longueur d'intervalle aussi bien pour la polarité positive que pour la polarité négative.

IV.8 Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons étudié l'influence de l'hétérogénéité de la terre sur la rigidité diélectrique des intervalles d'air tige-sol sous chocs de foudre selon les deux polarités positive et négative.

D'après les résultats obtenus, nous avons constaté que lorsque la tige est au dessus de la partie mauvaise conductrice, le niveau de la tension disruptive augmente au fur et à mesure que la conductivité de la partie mauvaise conductrice diminue qui veut dire que le degré d'hétérogénéité de la terre augmente, ce résultat est obtenu pour les deux types de polarités. Donc la partie mauvaise conductrice du sol est équivalente à un sol plan conducteur situé à une profondeur dépendant de la conductivité,

Lorsque la tige se trouve sur la partie bonne conductrice, les niveaux de tensions U_{50} obtenues sont proches de celle obtenue pour une terre homogène bonne conductrice, ce résultat est plus significatif lorsqu'on s'éloigne d'avantage de l'interface.

Le comportement de la terre hétérogène sous une tension de choc négative est similaire à son comportement sous tension positive. On note la diminution de la tenue de l'intervalle au niveau de l'interface observé pour une la plus faible conductivité utilisée $\gamma = 8\mu S / cm$.

Conclusion générale

Conclusion générale

L'objectif de ce travail est d'étudier l'influence de l'hétérogénéité du sol sur les tensions à 50% de décharges disruptives des petits intervalles d'air tige-plan sous les ondes de choc de foudre positive et négative. Deux configurations du sol ont été envisagées, la première concerne un sol homogène de conductivité variable et la seconde un sol hétérogène où la conductivité de la partie mauvaise conductrice est variable.

- 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 hétérogène la tenue de l'intervalle d'air pointe-plan dépend étroitement de la position de la tige haute tension par rapport à l'interface. Cette influence de la position est plus marquée lorsque la conductivité de la partie mauvaise conductrice est plus faible. Elle dépend donc du degré d'hétérogénéité du sol défini par le rapport des conductivités des deux composantes constituant la terre. La variation de la tension de tenue est plus significative lorsque la tige est du côté terre mauvaise conductrice, donc la partie mauvaise conductrice est équivalente à un sol plan bon conducteur situé à une profondeur dépendant de la conductivité. Le comportement de l'intervalle sous tension positive est similaire à son comportement sous tension négative. Il serait très intéressant de faire une étude plus approfondie de ce cas en envisageant plusieurs profondeurs et des intervalles plus longs.

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 trois structures étudiées.
- Le système pointe négative-plan reste toujours plus rigide que le système pointe positive-plan pour les différentes configurations.

Annexe

A.1 Influence de la distance d [34]

A.1.1- En polarité positive

Les tableaux A.1 à A.4 donnent la tension disruptive $U_{50\%}$ en fonction de la distance d pour les différentes valeurs de la conductivité.

d(cm) \ $\gamma(\mu s / cm)$	-50	-25	-15	-5	0	5	15	25	50
8	59	60.5	61.85	61.25	60.8	64.4	68.65	69	70.6
35	58.5	60	60.2	60.7	60.3	63.45	65.1	65.7	66.45
65	58.5	59	58.35	60.2	60.3	60.7	61.85	61.45	63.45
130	58.9	58.8	58.45	59.25	60.4	60.8	61.25	61.25	62.1

Tableaux.A.1 - U_{50} en fonction de la distance dans le cas de la tige positive (h=4cm)

d(cm) \ $\gamma(\mu s / cm)$	-50	-25	-15	-5	0	5	15	25	50
8	91	90.6	94.1	95.2	94.2	94.9	96.25	98.85	100.5
35	90.4	90.6	91.25	92.4	92.6	92.7	93.95	95.6	95.55
65	90	90.1	90.3	90.6	90	91.55	91.25	91.85	92.3
130	90.2	90.3	90.4	90.6	90.6	91	91.1	91.1	91.2

Tableaux.A.2 - U_{50} en fonction de la distance dans le cas de la tige positive (h=8cm)

d(cm) \ $\gamma(\mu s / cm)$	-50	-25	-15	-5	0	5	15	25	50
8	121.4	121.8	124.8	124.9	124.1	125.1	126.5	128.1	128.7
35	120.9	120.8	121.8	122	123.15	123.6	125.6	125.4	125.4
65	121.7	121.1	121.2	122.5	122.55	122.7	124.5	123.2	125
130	121.1	121.1	121.2	121.25	121.3	121.6	121.8	121.9	121.5

Tableaux.A.3 - U_{50} en fonction de la distance dans le cas de la tige positive (h=12cm)

d(cm) \ $\gamma(\mu s / cm)$	-50	-25	-15	-5	0	5	15	25	50
8	133.55	135.1	135.6	137	137.3	138.9	138.1	140.2	141.1
35	131.45	132	131.9	132.9	134.6	134	136.2	137.5	137.6
65	130.8	131.75	131.15	132.5	133	133.3	133.35	135.1	136.2
130	130	131.1	131.3	130.6	130.8	131.25	130.8	132.8	132.9

Tableaux.A.4 - U_{50} en fonction de la distance dans le cas de la tige positive (h=14cm)

A.1.2 En polarité négative

Les tableaux A.5 à A.8 donnent la tension disruptive $U_{50\%}$ en fonction de la distance d pour les différentes valeurs de la conductivité.

$d(\text{cm}) \backslash \gamma(\mu\text{s/cm})$	-50	-25	-15	-5	0	5	15	25	50
8	90.2	90	92	92.5	93.5	98	100.2	100.4	100.6
35	89	89.4	90.8	92	91.5	93	92.8	95.6	96
65	88.4	88.4	89	89.6	90.7	89.7	92	93.5	93.2
130	88.7	88.8	88.8	88.9	89.5	89.4	90	92.5	92.5

Tableaux.A.5 - U_{50} en fonction de la distance dans le cas de la tige Négative ($h=4\text{cm}$)

$d(\text{cm}) \backslash \gamma(\mu\text{s/cm})$	-50	-25	-15	-5	0	5	15	25	50
8	168.8	170.3	170.7	172	177.5	178.3	181.25	181.55	182.7
35	167.9	167.4	167.7	171.40	174.4	177.5	177.8	177.4	179.1
65	167	167.5	167.8	168.8	169	171.35	171.45	173.8	175
130	167.6	168	168.2	167.5	169	168.8	169	169	169.2

Tableaux.A.6 - U_{50} en fonction de la distance dans le cas de la tige Négative ($h=8\text{cm}$)

$d(\text{cm}) \backslash \gamma(\mu\text{s/cm})$	-50	-25	-15	-5	0	5	15	25	50
8	247.9	248.1	247.8	250.55	251.75	252.7	255.7	257	257.5
35	248.65	249.1	249.5	250.4	249.4	250.1	255.3	255.35	257.4
65	248.75	248.3	249.1	250.1	251.3	251.2	251.1	251.5	252.1
130	248.2	249.1	249.1	249.3	249.35	249.5	250	250.3	250.7

Tableaux.A.7 - U_{50} en fonction de la distance dans le cas de la tige Négative ($h=12\text{cm}$)

$d(\text{cm}) \backslash \gamma(\mu\text{s/cm})$	-50	-25	-15	-5	0	5	15	25	50
8	292.4	293	293.3	300	300.5	302	302.6	303.2	305.9
35	292	291.9	293.1	293.4	294.1	294.3	296.9	298.6	299
65	291.25	292.2	292.2	291.8	292.2	295.75	295.2	295.9	295.8
130	292.1	292	292.2	293.1	292.1	292.1	292.15	293	293.4

Tableaux.A.8 - U_{50} en fonction de la distance dans le cas de la tige Négative ($h=14\text{cm}$)

A.2 Influence de la conductivité [34]

A.2.1 En polarité positive

Les tableaux A.9 à A.12 donnent la tension disruptive U_{50} en fonction de la conductivité pour les différentes distances d .

$\gamma(\mu s / cm)$ \ / $d(cm)$	8	35	65	130
-50	59	59.35	59.45	59.75
-15	62.3	60.2	59.35	59.5
0	61.2	61.15	60.4	59.8
15	66.75	65.2	62.35	61.5
50	70.6	66.55	63.85	62.1

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

$\gamma(\mu s / cm)$ \ / $d(cm)$	8	35	65	130
-50	91	90.3	90	90.1
-15	94.4	91.3	90.4	90.5
0	94.4	92.6	90.2	90.8
15	96.5	94.1	91.3	91.1
50	100.4	95.6	92.2	91.1

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

$\gamma(\mu s / cm)$ \ / $d(cm)$	8	35	65	130
-50	121.3	121	121.8	121.2
-15	124.9	121.8	121.2	121.2
0	124.2	123.1	122.5	121.4
15	126.4	125.5	124.5	122
50	128.6	126	125	121.6

Tableaux.A.11 - U_{50} en fonction de la conductivité dans le cas de la tige positive (h=12cm)

$\gamma(\mu s / cm)$ \ / $d(cm)$	8	35	65	130
-50	133.8	131.3	130.7	130
-15	135.5	132.1	131.2	131.4
0	137	134.4	132.8	130.8
15	137.7	135.9	133.3	130.7
50	140.5	137.1	135.7	132

Tableaux.A.12 - U_{50} en fonction de la conductivité dans le cas de la tige positive (h=14cm)

A.2.2 En polarité négative

Les tableaux A.13 à A.16 donnent la tension disruptive U_{50} en fonction de la conductivité pour les différentes distances d .

$\gamma(\mu s / cm)$ \ / $d(cm)$	8	35	65	130
-50	90.2	89.8	89.2	89.4
-15	92	91	89.4	89.3
0	93.75	91.3	91.1	89.9
15	99.8	94.1	91.7	90.2
50	101.2	98.5	94.7	95

Tableaux.A.13 - U_{50} en fonction de la conductivité dans le cas de la tige Négative (h=4cm)

$\gamma(\mu s / cm)$ \ / $d(cm)$	8	35	65	130
-50	168.8	168.55	167.2	168.1
-15	170.8	168.3	167.9	168.75
0	177.2	174.45	171.6	168.3
15	181.2	177.8	173.75	169.25
50	182.9	179.2	174.9	169.4

Tableaux.A.14 - U_{50} en fonction de la conductivité dans le cas de la tige Négative (h=8cm)

$\gamma(\mu s / cm)$ \ / $d(cm)$	8	35	65	130
-50	248.1	248.5	248.2	248.5
-15	248.1	249.5	249.1	249.2
0	251.4	249.3	251	249.4
15	255.5	255.2	250.8	249.7
50	257.3	257.15	251.8	250.5

Tableaux.A.15 - U_{50} en fonction de la conductivité dans le cas de la tige Négative (h=12cm)

$\gamma(\mu s / cm)$ \ / $d(cm)$	8	35	65	130
-50	292.3	291.85	291.7	292.1
-15	295.3	292.8	292	292.1
0	300.5	293.85	292.7	292.5
15	302.8	296.75	295.4	292.7
50	305.7	299.2	296.2	293.6

Tableaux.A.16 - U_{50} en fonction de la conductivité dans le cas de la tige Négative (h=14cm)

A.3 Influence de la hauteur de l'intervalle d'air [34]

A.3.1 En polarité positive

Les tableaux A.17 à A.19 donnent les variations de la tension U_{50} en fonction de la longueur de l'intervalle d'air tige-sol « h » pour les différentes distances « d », tige positive

d (cm) \ h (cm)	4	8	12	14
-50	56.2	89.5	121.6	129.8
-15	59	95.7	123.8	132
0	58.3	89.2	116.3	142.1
15	63	96	125.4	135.8
50	67.3	99.8	128.3	139.2

Tableaux.A.17 - U_{50} en fonction de l'intervalle dans le cas de la tige positive ($\gamma = 8\mu S / cm$)

d (cm) \ h (cm)	4	8	12	14
-50	56.7	86	121.3	131.5
-15	59	88.6	120.7	130
0	57.8	90	121.7	133.6
15	63	91.4	123.6	134.4
50	64.2	94.1	124.8	137

Tableaux.A.18 - U_{50} en fonction de l'intervalle dans le cas de la tige positive ($\gamma = 35\mu S / cm$)

d (cm) \ h (cm)	4	8	12	14
-50	57.7	87.7	119.8	126.3
-15	57.8	88.8	118.4	127.9
0	60	87.8	122.7	129
15	62	90	122	131.3
50	63	92	124.2	136.2

Tableaux.A.19 - U_{50} en fonction de l'intervalle dans le cas de la tige positive ($\gamma = 65\mu S / cm$)

A.3.2 En polarité négative

Les tableaux A.20 à A.22 donnent les variations de la tension U_{50} en fonction de la longueur de l'intervalle d'air tige-sol « h » pour les différentes distances « d », tige négative

$d \backslash h$ (cm)	4	8	12	14
-50	90.2	168	248	288.7
-15	88	171.2	248.4	294.2
0	93.7	184	251	302
15	98	186	254	304.6
50	99.1	180.7	251.7	308

Tableaux.A.20 - U_{50} en fonction de l'intervalle dans le cas de la tige négative ($\gamma = 8\mu S / cm$)

$d \backslash h$ (cm)	4	8	12	14
-50	89	166.8	248.3	292
-15	90.6	167.5	250	293.6
0	90	172	251	295.3
15	92.8	176	250.4	298
50	93.6	176	245.3	301.4

Tableaux.A.21 - U_{50} en fonction de l'intervalle dans le cas de la tige négative ($\gamma = 35\mu S / cm$)

$d \backslash h$ (cm)	4	8	12	14
-50	88.4	172	248	291.8
-15	87	168	248	291.2
0	90.7	169.6	266	300.6
15	91	171.9	250	296
50	93.5	174	252	297

Tableaux.A.22 - U_{50} en fonction de l'intervalle dans le cas de la tige négative ($\gamma = 65\mu S / cm$)

Références bibliographiques

- [1] MEZAI Djamel, «Mesure du Champ Electrique par la Méthode de la Sonde à Capacité Repartie dans un Système Tige-Plan avec paratonnerre vertical sous Tension de Choc de Foudre», Thèse De Magister, Ecole Nationale Polytechnique, El Harrach, ALGER, 2006.
- [2] A. Tilmatine, «La foudre » Cours de A. Tilmatine, chapitre5, pp.1
- [3] Allaoua RAHMANI, «Zones d'attraction d'un paratonnerre horizontal dans le cas d'une terre hétérogène», Thèse De Magister, Ecole Nationale Polytechnique, El Harrach, ALGER, janvier 2011.
- [4] Philippe Dunand, « Protection des installations électriques contre la foudre», Dunod, Paris, 2003.
- [5] 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
- [6] M. Aguet:« Haute Tension »,Vol. XXII, Presses Polytechniques et Universitaire Romandes,1987.
- [7] T. Horvath: « Computation of lightning protection », Research studies press LTD, England; 1ère Ed; 1991. pp: 1-76.
- [8] C. GARY, « La Foudre : des méthodologies antiques à la recherche moderne», Masson, 1994.
- [9] C. GARY, « La Foudre : nature, histoire risques et protection », Dunod, Paris, 2004.
- [10] A. ROUSSEAU, C. Gary, Gérard Berger, « Foudre et protection des bâtiments », Technique de l'ingénieur, C3307, 1994.
- [11] C. Gary, « La foudre», MASSON Paris Milan Barcelone, 1995
- [12] M. A. Uman; « The lightning discharge »,Int. Geophys. series, N. Y. Academic press, vol.39, 1987
- [13] T.Horvath;« Computation of Ligthning Protection », Research Studies Press LTD, England 1991
- [14] A. Beroual, «Note de cours Master 2 Recherches Génie électrique : Matériaux du Génie Electrique Rigidité diélectrique des gaz », 2005
- [15] E. Kuffel, W. S. Zaengl: « High voltage engineering », Pergamon Press, G.B; 1ère Ed; 1984. pp: 463-488.
- [16] Emmanuel Perrin «Modélisation des effets indirects de la foudre sur avion composite». Thèse De Doctorat, Université DE Limoges, 05 Mai 2010
- [17] A.Boubakeur, « Phénomène de décharge électrique et Protection primaire», Ecole Nationale Polytechnique, 3 Mars 2014
- [18] Y. Bourek, «Détermination des conditions d'ionisation caractérisant le seuil de claquage de l'air par la logique floue » thèse de Magister, 2005
- [19] L. B. Loeb and J. M. Meek, « The Mechanism of the Electric Spark », Stanford University press, 1940.

- [20] 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.
- [21] P.Séguir,« Gaz isolants »,Techniques de l'ingénieur, traité de génie électrique, D 2 530, 1990.
- [22] 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.
- [23] 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
- [24] S.VAQUIE « Arc électrique » Les techniques de l'ingénieur Dossier D2870 - 03/1995
- [25] A. Fridman, A.Petrousov, J.Chapelle, JM.Cormier, A.Czernichowski, H.Lesueur & J.Stevelfelt « Modèle physique de l'arc glissant » J.PPhys.III France. 4 (1994) 1449-1465
- [26] Anne-Marie Pointu, Jérôme Perrin, Jacques Jolly « Plasmas froid de décharge – Applications et diagnostic » Les techniques de l'ingénieur Dossier D2835 (11/1997).
- [27] I. Fofna « Modélisation de la décharge positive dans les grands intervalles d'air » Thèse de Doctorat, l'Ecole Doctorale, Lyon, France 1996
- [28] Fieux R. and Bouteau M. (1970) Bull. Direction Etudes Recherches, EDF France, série B, N° 2, 55-88.
- [29] C.L. Wadhwa «High voltage engineering», EditionUniversity de Delhi, 2007, p 84-97
- [30] Benzouaoui Med El Yamine, Elbah W, kerriou A et A Raouf « Etude des zones d'attraction d'un paratonnerre horizontal en présence d'une terre hétérogène » Mémoire de Fin d'étude, 2012
- [31] C.E.I ; « Techniques d'essais de haute tension », 1973, (60-01/02).
- [32] A. Sabot, J. Michaud ; « Lignes et postes. Choix et coordination des isolement », Techniques de l'ingénieur », D4750. 1999
- [33] I. Fofana « Conception d'un générateur d'impulsion » Projet : 2010-161, 27 août 2010
- [34] S. A. A. Boumaza ; « Amorçage au choc de foudre des intervalles d'air tige-plan avec terre hétérogène », Thèse de Magister, ENP, Alger, Algérie, 1998.
- [35] K. Berger, R. B. Anderson, H. Kroninger ; « Paramètres des coups de foudre », Electra (F), N°41, 1975. pp : 23 - 37.

MEMOIRE DE FIN D'ETUDE EN VUE DE L'OBTENTION DU DIPLOME

MASTER EN GENIE ELECTRIQUE

SPECIALITE : RESEAUX ELECTRIQUES

Proposé et dirigé par : Mr. CHOUCOU Abdelmadjid

Présenté par : MAHDI Mourad

Thème

Etude de la rigidité diélectrique aux chocs de foudre des intervalles d'air tige – plan avec une terre hétérogène

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 hétérogène 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, La première partie de ce mémoire s'intéresse l'étude de la physique de la décharge de foudre et les mécanismes de décharges disruptives dans l'air, Alors que dans la deuxième partie nous avons essayé de présenter la simulation de la foudre aussi bien au laboratoire que numérique puis nous avons étudié l'influence de l'hétérogénéité de la tenue des intervalles d'air aux chocs de foudre sous les deux polarités.

Mots clés: Décharge de foudre, Intervalles d'air, Pointe-plan, Rigidité diélectrique, Terr hétérogène, Tension disruptives 50%.

N° d'ordre : REs_233