

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

UNIVERSITE MOULOUD MAMMARI DE TIZI-OUZOU



FACULTE DE GENIE ELECTRIQUE ET D'INFORMATIQUE  
DEPARTEMENT D'ELECTROTECHNIQUE

## Mémoire de Fin d'Etudes De MASTER ACADEMIQUE

Domaine : Sciences et Technologies

Filière : Génie Electrique

**Spécialité : RESEAUX ELECTRIQUES**

*Présenté par*  
MAHTOUT Kamel

Thème

## MODELISATION NUMERIQUE D'UN INTERVALLE POINTE – BARRIERE – PLAN

*Mémoire soutenu publiquement le 29/09/2014 devant le jury composé de :*

**Mohamed NEDJAR**, Professeur, UMMTO, Président

**Arezki DICHE**, Maitre Assistant A, UMMTO, Rapporteur

**Farid NAMANI**, Maitre Assistant A, UMMTO, Rapporteur

**Mustapha MOUDOUD**, Maitre de Conférences A, UMMTO, Examineur

**Slimane REZGUI**, Maitre Assistant A, UMMTO, Examineur

# Remerciements

---

Aux termes de ce travail, il m'est agréable d'exprimer mes vifs remerciements à tous ceux, qui de près ou de loin, ont participé à la réalisation de ce mémoire.

Je tiens à exprimer ma grande reconnaissance et profonde gratitude à l'égard de :

Mon promoteur monsieur A. DICHE et mon co-promoteur F.NAMANI pour leurs serviabilités, leurs disponibilités et leurs remarques constructives qui m'ont été utiles tout au long de mon projet.

Je tiens aussi à remercier les membres de jury pour l'honneur qu'ils m'ont fait en acceptant de juger mon travail.

# Dédicaces

---

Je dédis ce modeste travail :

- ❖ A la mémoire de mes très chers parents
- ❖ A tous mes amis (es) sans exception.
- ❖ A tous mes frères et sœurs.

# SOMMAIRE

---

I.INTRODUCTION GENERALE.....	1
------------------------------	---

## CHAPITRE I : LES DIELECTRIQUE

I.1 Introduction .....	2
I.2 Bandes d'énergies dans un solide.....	2
I.3 Généralités sur les diélectriques.....	3
I.3.1 Utilisation des diélectriques dans le domaine de l'isolation électrique.....	3
I.3.2 Caractéristiques des diélectriques.....	4
I.3.2.1 Définition d'un diélectrique.....	4
I.3.2.2 Définition de la constante diélectrique.....	4
I.3.2.3 Permittivité relative.....	5
I.3.2.4 Permittivité relative de quelques isolants.....	5
I.3.2.5 FORCE DIELECTRIQUE.....	6
I.3.2.6 La résistivité.....	6
I.4 Phénomène physique dans les milieux diélectriques.....	7
I.4.1 Polarisation des diélectriques.....	7
I.5 Rigidité diélectrique (Tenue au claquage).....	8
I.6 Comportement d'un diélectrique en présence d'un champ électrique.....	9
I.7 Conduction électrique.....	9
I.7.1 Nature et origine des porteurs de charges.....	10
I.7.b. Les charges extrinsèques.....	11
I.7.2 Recombinaison électrons-trou.....	11
I.8 Conclusion.....	12

## CHAPITRE II : LES DECHARGES DANS L'AIR

II.I. Introduction.....	13
II.2.Electrons primaires.....	13
II.3.CHOCS ELASTIQUES ET INELASTIQUES.....	13
II.3.1 Excitation.....	14
II.3.2. Ionisation.....	14
II.3.3. Recombinaison.....	14

# SOMMAIRE

---

II.3.4. Détachement.....	14
II.4 Rigidité diélectrique des isolants solides.....	14
II.4.1 Définitions.....	14
II.5. Décharge électrique dans la nature.....	15
II.5.1. Les décharges partielles.....	15
II.5.2. Décharges électrique non-autonome.....	15
II.5.3 Décharge électrique autonome.....	16
II.5.4. La décharge de Townsend.....	16
II.5.4.1 Modélisation de la décharge de Townsend.....	18
II.5.5. Tension d'amorçage en champ homogène (loi de PASCHEN).....	19
II.5.6. Théorie du streamer.....	19
II.5.7 Description de la décharge couronne.....	21
a. Seuil d'apparition de la décharge couronne.....	22
II.6. Les facteurs influençant sur la décharge couronne.....	23
II.6.1. Facteurs géométriques.....	23
a. Rayon de la courbure.....	23
b. Distance inter-électrodes.....	23
II.6.2. Les facteurs physico-chimiques.....	24
a. La température.....	24
b. L'humidité et la densité de l'air.....	24
c. La pression.....	25
II.6.3. Facteurs électriques.....	25
II.7. Influence de la distribution du champ électrique appliqué.....	25
II.8. Influence du type de tension appliquée.....	26
II.9. Paramètres influant sur le développement de la décharge.....	26
a. Présence des particules conductrices dans l'air.....	26
II.10. Influence de la distribution du champ électrique appliqué.....	26
II.11. Influence de différents paramètres sur la rigidité diélectrique.....	28
a. humidité.....	28
b. Pression hydrostatique.....	28
c. Distance entre électrodes.....	28
d. Température.....	28
II.12- Influence de la barrière sur la décharge couronne.....	28
II.12.1- définition.....	28

## SOMMAIRE

---

II.13 Influence de l'épaisseur de la barrière et de la permittivité.....	29
II.14 Influence des paramètres extérieurs à la nature de la barrière .....	29
II.15 Influence des barrières isolantes sur la rigidité diélectrique de l'air.....	30
II.16. Conclusion.....	32

### CHAPITRE III : APPLICATIONS ET RESULTAS

III.1 Introduction.....	33
III.2. La méthode des éléments finis (MEF).....	33
III.2.1. Principe de discrétisation géométrique.....	33
III.3.Avantages et inconvénients de la méthode (MEF).....	34
III.4. Représentation des coordonnées de la structure étudié.....	34
III.5. Le maillage.....	35
III.6. Equations à résoudre.....	36
III.7 Cartographie du potentiel électrique.....	38
III.7.1.Etude de l'évolution de potentiel électrique en fonction de dimension de la structure étudié .....	39
III.8 Cartographie du champ électrique.....	39
III.9.Résultats et Interprétations .....	40
<b>CONCLUSION GENERALE.....</b>	<b>44</b>

Le développement des systèmes de haute tension a donné une grande impulsion à la recherche sur la décharge dans les intervalles d'air. De nombreux travaux ont été orientés pour l'analyse des différents paramètres caractérisant la décharge tel que le courant, le champ électrique ...

La connaissance de ces paramètres est d'une grande importance pour la coordination de l'isolement dans l'engineering des systèmes de haute tension.

En effet le dimensionnement et l'évaluation des performances d'un système de haute tension, reposent sur la connaissance du champ électrique dont découle le calcul de la charge d'espace, la rigidité du système [1].

Le recours, pour des raisons économiques, à des tensions de plus en plus élevées pour le transport de l'énergie électrique a nécessité et nécessitera encore, des distances d'isolement dans l'air de plus en plus grandes.

L'effet des barrières dans l'augmentation de la rigidité des systèmes pointe-plan, est le but d'augmenter leurs durées de vie, ainsi que leurs rigidités dépendent de plusieurs paramètres, parmi ces paramètres on trouve l'épaisseur et la longueur de la barrière, ainsi la permittivité du matériau diélectrique.

Dans le présent travail, on se propose d'étudier l'influence de la barrière sur la répartition du champ électrique dans une géométrie pointe-plan en utilisant la méthode des éléments finis.

Notre travail consiste à étudier la distribution du champ électrique pour un dispositif pointe-barrière-plan en absence de charge d'espace. L'étude sera faite en utilisant un logiciel éléments finis « femm ».

Le manuscrit est reparti en trois chapitres dont le premier sera consacré aux généralités sur les décharges électriques, le second sera consacré aux généralités sur les diélectriques, le troisième chapitre sera consacré à l'application et les résultats obtenus ainsi une discussion et interprétation de ces résultats. On termine par une conclusion générale.

## I.1 Introduction

La connaissance des propriétés électriques des matériaux pour les concepteurs des systèmes électriques ou autres est impérative. En effet, la considération des propriétés électriques est souvent très importante, particulièrement lors du choix des matériaux pour la conception d'un système donné. Le comportement électrique, pour un grand nombre de matériaux, est varié selon l'application et l'environnement de travail auquel il est destiné. Certains matériaux doivent être de très bons conducteurs par contre d'autres, doivent être de très bons isolants (diélectrique).

Un diélectrique est caractérisé par ses propriétés électriques, mécaniques, chimiques et thermiques [2].

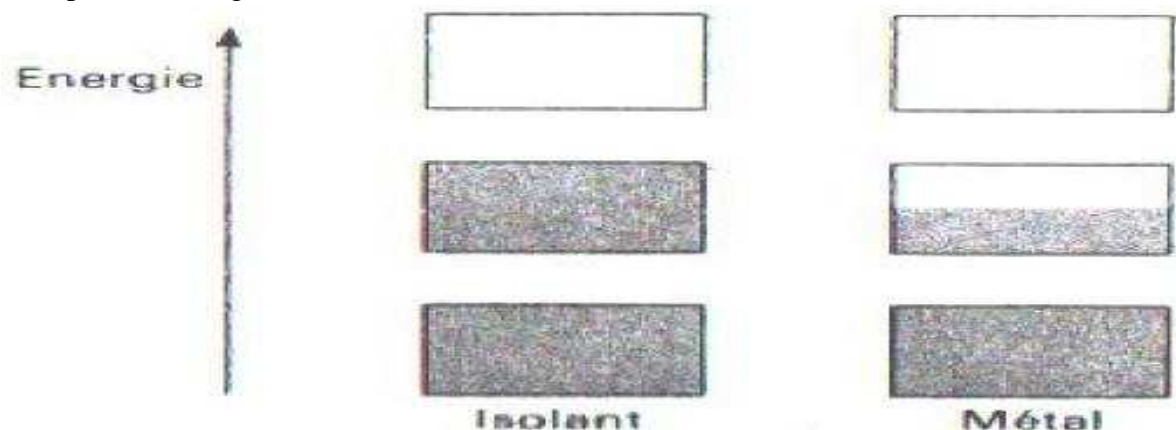
Dans ce chapitre, nous présentons des rappels sur les principales caractéristiques physiques des diélectriques.

## I.2 Bandes d'énergies dans un solide

Les propriétés de conduction électrique des matériaux peuvent être expliquées par leur structure électronique décrites par la théorie des bandes. Les électrons occupent des niveaux d'énergie bien définis dont le nombre est proportionnel au nombre d'atomes dans le cristal. Ces niveaux sont extrêmement proches les uns des autres et sont regroupés en bandes appelées bandes d'énergie permise.

Les bandes d'énergie permise sont séparées par des zones appelées bandes interdites où il n'y a pas de niveau d'énergie permise.

Dans un solide à 0 K, toutes les bandes d'énergie les plus basses sont remplies, sauf la dernière qui peut être partiellement remplie ou complètement remplie, deux configurations sont alors possibles (Figure I.1)



**Fig. I.1 :** Structure de bande d'un conducteur et d'un isolant à 0K [3]

Lorsque cette bande est remplie, on a affaire à un isolant à 0 K car l'application d'un champ électrique ne peut fournir assez d'énergie pour lui faire franchir la bande interdite afin d'atteindre les premiers niveaux disponibles : les électrons ne peuvent acquérir un mouvement collectif correspondant au passage du courant.

La principale différence entre un isolant et un conducteur est le nombre d'électrons disponibles pour assurer la conduction. En effet, dans un bon conducteur, le nombre d'électrons de conduction est de l'ordre de  $4,5 \cdot 10^{22}$  électrons par  $\text{cm}^3$ , alors que dans un isolant comme l'alumine ce nombre vaut environ  $3,1 \cdot 10^{-2}$  électrons par  $\text{cm}^3$ . Par contre, du fait de la faible densité de porteurs dans l'alumine les interactions électron-électron sont faibles et la mobilité de ces charges est donc très élevée ( $200 \text{ cm}^2 \cdot \text{V}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$ ) que dans le cas d'un bon conducteur ( $80 \text{ cm}^2 \cdot \text{V}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$ ). La très faible conductivité de l'alumine ( $10^{-18} \text{ S} \cdot \text{cm}^{-1}$ ) est donc due au trop faible nombre d'électrons de conduction. En revanche, si des charges sont injectées dans l'isolant, celui-ci est capable d'assurer leur conduction jusqu'à ce qu'elles soient piégées [3].

### I.3 Généralités sur les diélectriques

Les isolants ou diélectriques sont des matériaux ayant une résistivité très élevée :  $10^8$  à  $10^{16} \Omega \cdot \text{m}$ , car ils contiennent très peu d'électrons libres [4]. Un bon isolant ne devrait pas laisser passer de courant lorsqu'il est soumis à une tension continue. Autrement dit, sa résistance en courant continue doit être infiniment grande ou la largeur de bande interdite des diélectriques est relativement grande ( $>3\text{eV}$ ). Cependant, en pratique, un courant de fuite très faible circule dans tous les matériaux isolants utilisés en HT continue. Le courant passant à travers un isolant en HT continue est également constant et est appelé courant résiduel. En HT alternative, n'importe quel matériau isolant laisserait passer un courant capacitif. Un isolant est caractérisé par ses propriétés mécaniques, chimiques, thermiques et électriques. [3]

#### I.3.1 Utilisation des diélectriques dans le domaine de l'isolation électrique

Les diélectriques étant de bons isolants électriques, ils sont utilisés pour remplir les fonctions de diélectrique d'un condensateur, afin de stocker le maximum d'énergie électrique dans le volume le plus faible possible. On insère aussi des couches de diélectriques dans les condensateurs industriels, ce qui permet d'augmenter la capacité en diminuant l'encombrement.

Les diélectriques sont aussi utilisés pour isoler des câbles électriques afin d'éviter des contacts avec d'autres câbles, ou assurer la protection des personnes, ou supporter les conducteurs d'un réseau électrique et les isoler les uns par rapport aux autres et par rapport à la terre.

### I.3.2 Caractéristiques des diélectriques

#### I.3.2.1 Définition d'un diélectrique

Un matériau est diélectrique s'il ne contient pas de charges électriques susceptibles de se déplacer de façon macroscopique. Autrement dit, c'est un milieu qui ne peut pas conduire le courant électrique. A ce titre, on l'appelle parfois isolant électrique.

On compte parmi ces milieux le verre et de nombreux plastiques. Par exemple, les câbles électriques sont souvent protégés d'un revêtement en plastique pour éviter que le courant électrique ne puisse en sortir.

Malgré l'impossibilité des milieux diélectriques de conduire le courant, ils présentent de nombreuses caractéristiques électriques. En eue les atomes qui constituent le matériau Champ électrique. Cette interaction se traduit par la création d'une polarisation reliée à ce champ électrique, par la susceptibilité électrique. [4]

$$\vec{P} = \chi \vec{E} \quad (\text{I.1})$$

Avec

$\chi$ : est la susceptibilité électrique, c'est une grandeur caractérisant la polarisation créée par un champ électrique.

$\vec{P}$ : est la polarisation du diélectrique.

$\vec{E}$  est le champ électrique.

#### I.3.2.2 Définition de la constante diélectrique

La constante diélectrique symbolise la propriété du matériau à s'opposer au passage d'un courant électrique. Plus le matériau limite le passage d'un courant électrique et plus sa constante diélectrique est élevée. Dans la littérature, on parle souvent de la constante diélectrique relative.

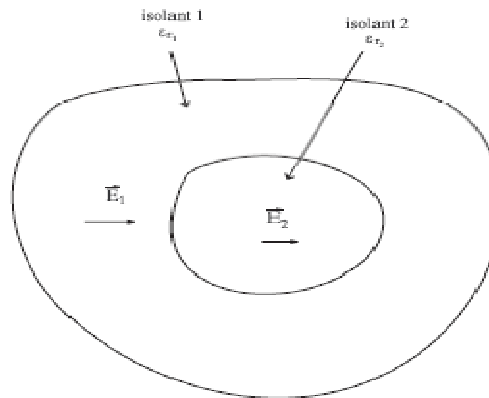
C'est à dire du rapport entre la constante diélectrique du matériau et celle de la constante diélectrique du vide prise comme référence ( $\epsilon_0 = 8.85.10^{-12} \text{F/m}$ ). [2]

### I.3.2.3 Permittivité relative

La permittivité d'un matériau est définie comme le rapport entre la norme du champ de déplacement électrique et celle du champ électrique appliqué au matériau. Pour des champs suffisamment grands, ce rapport n'est pas constant et tend vers  $\epsilon_0$ .  $\epsilon_0$  peut être vue comme la permittivité intrinsèque du vide. Pour un matériau donné de permittivité  $\epsilon$ , il est possible de définir la permittivité, normalisée par rapport à celle du vide. [4]

Pour l'air ou le vide,  $\epsilon = 1$ . Pour tous les autres isolants,  $\epsilon_r > 1$

Dans un isolant, le champ électrique est inversement proportionnel à la permittivité :



**Figure I.2:** Représentation de champ électrique dans un isolant [2]

### I.3.2.4 Permittivité relative de quelques isolants

Ces valeurs sont approximatives et peuvent varier nettement en fonction de la fréquence, de la température. La permittivité est appelée également constante diélectrique (symbole  $\epsilon_r$ ). [4]

Isolant	Permittivité relative
Air sec	1
Caoutchouc	4
Mica	6
Papier	2

**Tab. I.1.** Permittivités de certains isolants

I.3.2.5 FORCE DIELECTRIQUE

On a vu que l'application d'un champ électrique externe va polariser un diélectrique. Cependant, si le champ électrique est trop grand, le matériau devient conducteur. Dans ce cas, le champ électrique externe est assez grand pour arracher des électrons du diélectrique. La force diélectrique d'un matériau est l'amplitude du champ électrique qui cause cet effet. Le tableau donne la constante diélectrique et la force diélectrique de certains matériaux.

Matériaux	Constante diélectrique	Force diélectrique(c/m <sup>3</sup> )
Air	1.0	3×10 <sup>6</sup>
Huile	2.3	15×10 <sup>6</sup>
Papier	2 – 4	15×10 <sup>6</sup>
polystyrène	2.6	20×10 <sup>6</sup>
Caoutchouc	2.3 - 4.0	25×10 <sup>6</sup>
Verre	4 – 10	30×10 <sup>6</sup>

Tab. II.2 : Constante et force diélectrique de certains matériaux.

II.3.2.6 La résistivité

La résistivité  $\rho$ , qui s'exprime en A.M caractérise la résistance opposée au passage d'un courant électrique dans le matériau, pour une section et une longueur unitaire.

Son inverse est la conductivité électrique  $\sigma$  qui est donc une mesure de la facilité de passage du courant électrique dans la matière. La conductivité et la résistivité électrique des matériaux varient très fortement en fonction de la nature de leurs liaisons chimiques, de la composition et de la température (fig. II.3).

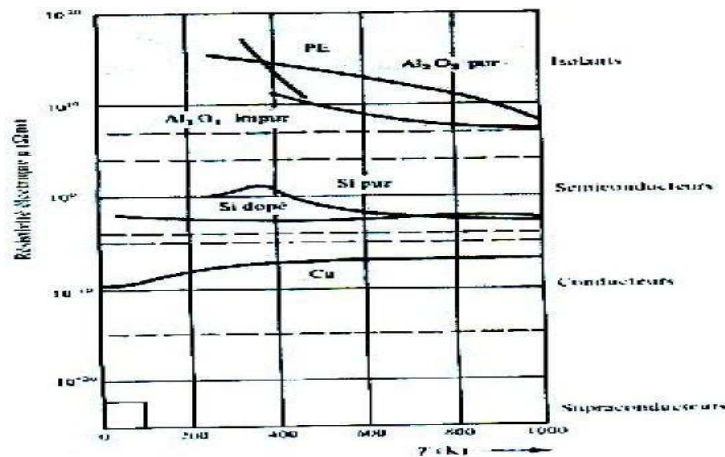


Fig. I.3 : variation de résistivité électrique  $\rho$  en fonction de la température T [3]

Ainsi à température ambiante, la conductivité électrique varie de  $10^8 (\Omega.m)^{-1}$  pour les meilleurs conducteurs métalliques jusqu'à  $10^{-16} (\Omega.m)^{-1}$  pour les isolants électriques les plus performants.

#### I.4 Phénomène physique dans les milieux diélectriques

Les électrons présents dans un milieu diélectrique ne peuvent pas, par définition, se déplacer sur de grandes distances. Ils peuvent par contre présenter des mouvements d'amplitude négligeable à notre échelle, mais peuvent être à l'origine de nombreux phénomènes. Ces mouvements sont souvent des mouvements d'oscillation autour du noyau: le nuage électronique peut être déformé et ainsi créer un dipôle électrostatique. Il en va de même pour le déplacement global des atomes au sein du matériau (ils créent également des dipôles).

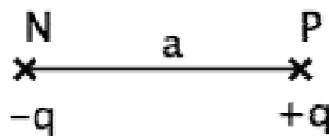


Schéma d'un dipôle

Un dipôle électrostatique se définit par un ensemble de 2 points P et N de charge respective  $+q$  et  $-q$  distant de  $a$ .

Cette notion est principalement utilisée en chimie où certaines liaisons entre molécules peuvent être expliquées en modélisant ces molécules par un dipôle. [2]

##### I.4.1 Polarisation des diélectriques

Lors de l'application d'un champ électrique sur un matériau diélectrique, les molécules ou atomes dont il est constitué sont déformés de telle manière que les barycentres des charges positives et négatives qui les composent ne coïncident plus, cette situation se présente pour certaines molécules même en l'absence d'un champ électrique extérieur (exemple, la molécule d'eau). Un tel atome ou une telle molécule possède ce que l'on nomme un "moment dipolaire électrique" (Les pertes diélectriques sont dues aux mouvements des porteurs de charges. L'émet de ces mouvement est appelé polarisation induite ou spontanée), grandeur qui caractérise à la fois la distance entre ces barycentres et la valeur absolue des charges déplacées.

Cette polarisation  $\vec{P}$  crée elle-même un champ électrique  $\vec{E}$  qui se superpose, à l'intérieur du matériau, à un éventuel champ initialement appliqué. Le vecteur polarisation est proportionnel au champ électrique appliqué  $E$  [4]

La polarisation diélectrique  $P(t)$  est introduite d'un point de vue macroscopique par l'équation liant le champ électrique  $E(t)$  au déplacement électrique  $D(t)$ :

$$\vec{D} = \epsilon_0 \vec{E} + \vec{P} \quad (\text{I.2})$$

Elle correspond macroscopiquement aux orientations des différents dipôles. On peut regrouper les polarisations en 2 grandes classes:

Les polarisations proches du domaine optique ( $10^{-12}$ ), et instantanées à notre échelle. Elles regroupent les polarisations électroniques et atomiques dues aux déplacements du nuage électronique et des atomes liés au sein de la molécule lors de l'application d'un champ électrique. Leur contribution au déplacement électrique est représentée par la Permittivité (ou constante diélectrique) hautes fréquences.

La polarisation dipolaire correspondant à l'orientation des moments dipolaires. C'est cette dernière qui confère ses propriétés au diélectrique, dans la gamme de fréquences des applications du génie électrique.

L'effet de la polarisation diélectrique avait été découvert par Michaël Faraday en 1837.

On distingue plusieurs types de polarisation : électronique, ionique, dipolaire, macroscopique, interraciale (ou du type Maxwell - Wagner), spontanée; celles-ci peuvent Coexister ou apparaître séparément. [3]

### I.5 Rigidité diélectrique (Tenue au claquage)

Le facteur limitant l'utilisation des diélectriques est le claquage diélectrique. Ce phénomène catastrophique conduit à une forte détérioration des propriétés mécaniques et diélectriques d'un isolant. Un défaut macroscopique traverse alors le matériau de part en part.

La mesure de la tenue au claquage consiste à appliquer aux bornes d'un matériau isolant à l'aide d'électrodes, un champ électrique d'intensité croissante jusqu'à ce que le champ électrique atteigne une valeur seuil au delà de laquelle le matériau laisse passer le courant (on dit alors qu'il y a claquage). Ce champ seuil ramené à l'épaisseur du matériau est

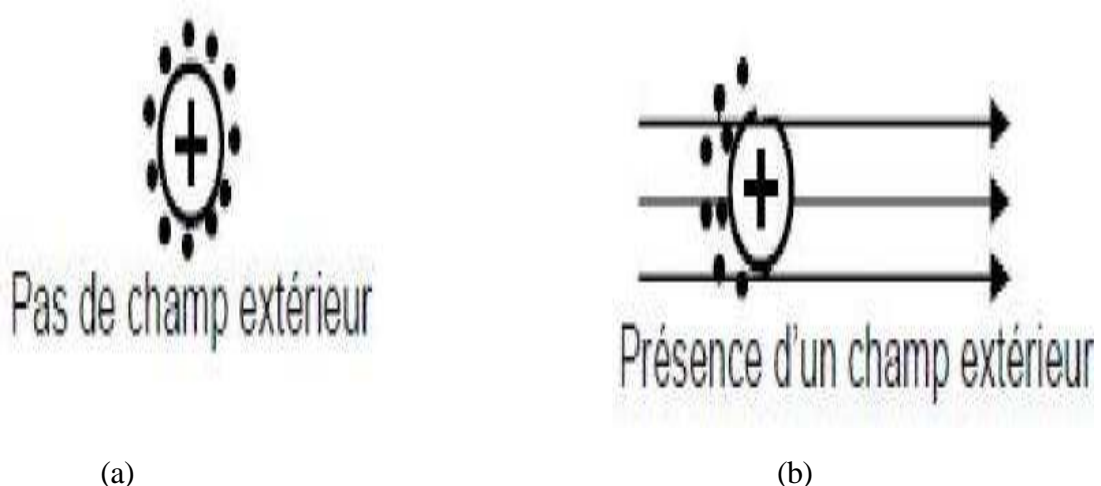
appelé rigidité diélectrique noté  $E_c$  (en  $V.m^{-1}$ ). La rigidité diélectrique est une des grandeurs les plus mesurées, normalisées et étudiées dans le domaine des isolants.

Lorsque des charges sont injectées dans un matériau isolant, il s'y produit une accumulation d'électrons et de trous. Ces charges induisent une polarisation et une déformation locale de la structure du matériau : accumuler des charges revient à accumuler de l'énergie. La résistance au claquage diélectrique dépend de la capacité du matériau à stabiliser ces charges. Lorsqu'il ne peut plus en stocker de supplémentaires, celles-ci peuvent se déstabiliser (quitter les pièges) brutalement et amorcer le claquage. L'énergie alors libérée est suffisante pour fondre et vaporiser localement le matériau [2].

### I.6 Comportement d'un diélectrique en présence d'un champ électrique

La propriété la plus importante d'un diélectrique est la polarisation sous l'action d'un champ électrique externe.

A l'échelle atomique : en l'absence d'un champ électrique, le moment électrique est nul car la somme algébrique des charges dans toutes les molécules dans un volume donné est nulle, du fait que les centres de gravité des charges positives et négatives coïncident. Lors de l'application d'un champ électrique, les centres de gravité ne coïncident plus et se séparent de quelques dixièmes d'angströms (fig. II.4). Les particules (atomes et molécules) sont alignées suivant la direction de  $\vec{E}$  et acquièrent un moment dipolaire  $\vec{p}$ , la matière peut alors être décrite comme une assemblée de dipôles électriques.

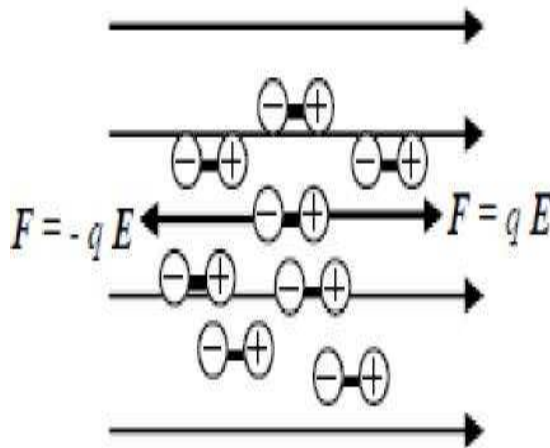


**Fig. I.4 :** Moyenne temporelle de distribution de charges dans un atome normal (a) et un atome placé dans un champ électrique (b).

D'après Dubois [5] on distingue quatre types de polarisation : électronique, ionique, par charge d'espace et dipolaire.

Un dipôle placé dans un champ électrique est soumis à un couple qui tend à l'aligner suivant la ligne de ce champ (fig. I.5).

En présence d'un champ électrique



Sans un champ électrique

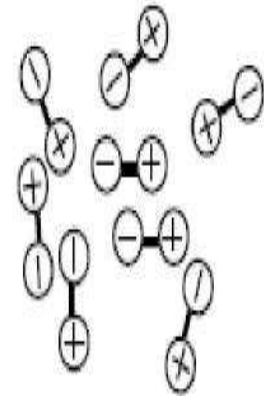


Fig. I.5 : Effet d'un champ électrique sur un dipôle [3].

## I.7 Conduction électrique

L'étude de la conduction électrique dans les matériaux isolants qui s'effectue le plus souvent en mesurant les courants traversant le diélectrique a pour but de fournir des réponses sur la nature, l'origine, et la concentration des porteurs de charges dans l'isolant.

### I.7.1 Nature et origine des porteurs de charges

On appelle charges d'espace l'ensemble des charges réelles positives ou négatives, contenues dans un isolant, ce qui inclut les charges de surface et de volume.

Dans un diélectrique, les charges peuvent être des électrons, des trous ou encore des ions. Leur origine peut être intrinsèque ou extrinsèque.

#### I.7.1.a. Les charges intrinsèques :

Il s'agit des ions contenus initialement dans l'isolant ou générés soit par électro dissociation(fig. I.6.b) d'espèces neutres, soit par ionisation des constituants du solide ou de la migration d'espèces ioniques, sous l'action de la température et/ou de la contrainte électrique, ces espèces pouvant être des molécules du matériau ou des adjuvants divers (catalyseur, antioxydants, impuretés).

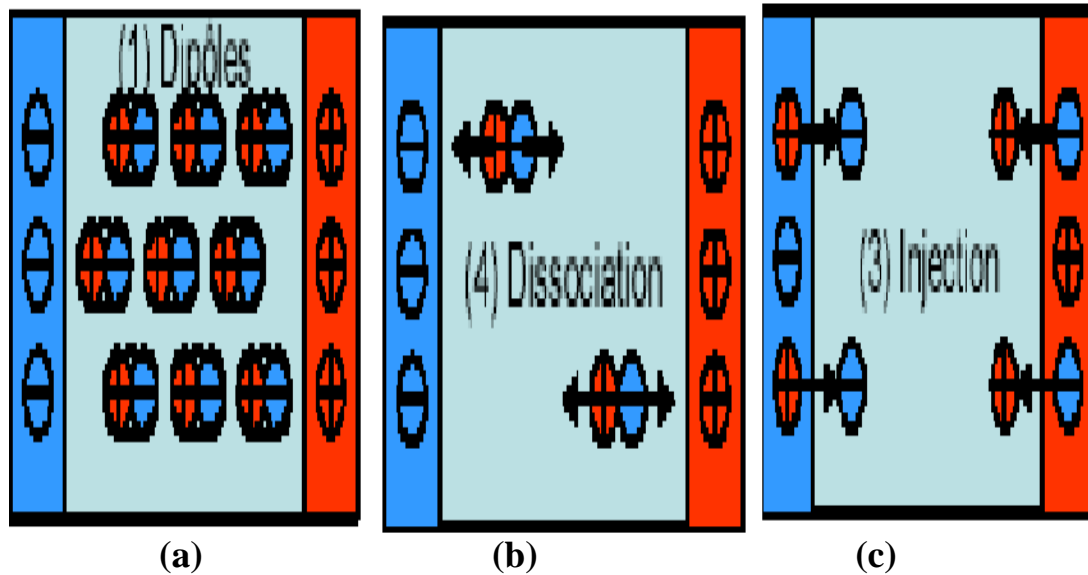


Fig. I.6 : Synthèse des différents types de charge d'espace

### I.7.b. Les charges extrinsèques

Elles sont des électrons et des trous injectés à partir des électrodes métalliques vers l'isolant sous l'action d'un champ électrique (fig. I.6.c). Elles peuvent aussi résulter de la diffusion des ions des électrodes vers l'isolant.

### I.7.2 Recombinaison électrons-trou

Les charges, lors de leur diffusion, peuvent se recombiner avec des charges piégées de signe opposé. Les transitions de recombinaison d'un porteur avec une charge piégée mettent en jeu des énergies plus faibles qu'une transition directe électron dans la bande de conduction, trou de la bande de valence, elles sont donc beaucoup plus probables qu'une transition bande à bande.

## II.8 Conclusion

L'interaction d'un champ électrique avec la matière est un problème étudié depuis très longtemps et l'un des mieux connus. Dans ce chapitre nous avons rappelé l'essentiel des propriétés des matériaux isolants.

La seule propriété qui les distingue du vide est d'avoir un constant diélectrique relatif différent de l'unité. Nous avons montré également que la présence de défauts dans ces matériaux donne lieu à des pièges (superficiels ou profonds) qui peuvent capturer les porteurs de charges (électrons, trous, ions).

La réponse des matériaux à la charge électrique est complexe et reste un sujet d'actualité. Elle consiste en des phénomènes de polarisation et de conduction qui sont superposés et liés diversement selon la nature du matériau.

**II.1. Introduction :**

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

La compréhension des phénomènes physiques intervenant lors des décharges permet d'expliquer les mécanismes fondamentaux qui régissent la propagation de la décharge dans les gaz. [5]

Un gaz est constitué d'un grand nombre de particules de différents types, atomes, molécules, ions, électrons en agitation incessante. En l'absence de champ électrique, les molécules de gaz sont soumises à l'agitation thermique et subissent une multitude de chocs. Ces particules bombardées. 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 [1].

**II.2. Electrons primaires**

Il est tout à fait bien connu qu'aucune décharge électrique ne peut s'initier dans l'air sans la présence d'au moins un électron dans le volume de gaz couvrant l'espace inter-électrodes. Ces électrons, présents au tout début de la décharge sont communément appelés électrons germes ou encore électrons primaires. Ils permettent d'initier la première avalanche électronique sans laquelle aucun type de décharge ne peut prendre forme encore moins se maintenir. Ils peuvent être produits par radiation cosmique, par les sources naturelles d'ionisation, par les charges résiduelles issues des décharges précédentes ou encore par détachement des ions négatifs par effet de champ [6].

**II.3. CHOCS ELASTIQUES ET INELASTIQUES**

Soumises à un champ électrique et donc à la force de Coulomb, les particules chargées vont entrer en collision avec les espèces chimiques environnantes. On distingue alors les collisions élastiques des collisions inélastiques. Dans les chocs élastiques, les atomes conservent la même structure interne, seule leur vitesse est accrue. Globalement,

l'énergie cinétique du système reste inchangée.

Par contre, dans les chocs inélastiques, l'énergie interne des particules change.

L'énergie de la particule incidente, dans ce cas, est suffisante pour que la particule heurtée passe à un niveau excité plus haut ou soit ionisée. Les chocs inélastiques sont donc la source d'un nombre important de réaction physico-chimiques qui vont alors modifier les propriétés macroscopiques du gaz. [7]

On distingue alors les phénomènes ionisants :

**II.3.1 Excitation** : lorsqu'un atome a acquis suffisamment d'énergie pour qu'un des électrons passe à un niveau (orbital) d'énergie plus élevé, l'atome passe alors de son état *fondamental* à un état *excité*.

**II.3.2. Ionisation**: dans ce cas, l'énergie absorbée par l'atome lors de la collision

est suffisante pour qu'un de ses électrons soit arraché de l'attraction du noyau.

L'électron est alors soit attaché à un autre atome (attachement), soit il s'éloigne à l'infini.

Puis les phénomènes dé ionisants :

**II.3.3. Recombinaison** : la recombinaison est le phénomène d'attachement de particules lorsqu'un ion positif rencontre un électron ou lorsque deux ions de signes contraires se rencontrent.

**II.3.4. Détachement** : c'est le phénomène qui se produit lorsqu'un ion négatif perd son électron supplémentaire.

## **II.4 Rigidité diélectrique des isolants solides**

### **II.4.1 Définitions**

La rigidité diélectrique d'un matériau est la valeur maximale du champ électrique que l'on peut lui appliquer sans que se produise une dégradation irréversible nommée claquage ou perforation diélectrique rendant impossible une nouvelle application de la tension. Le claquage est précédé par une augmentation importante du courant circulant dans le matériau avec des conséquences thermiques destructives : fusion, évaporation, décomposition, carbonisation, ... [17].

Divers mécanismes peuvent conduire au claquage. Nous citerons les principaux mécanismes connus actuellement.

**II.5. Décharge électrique dans la nature**

Deux phénomènes naturels connus mettent en jeu les décharges électriques :

**II.5.1. Les décharges partielles**

Les décharges partielles (DP) apparaissent, en général, sous l'application d'une tension élevée. Elles provoquent la dégradation du matériau et peuvent conduire au claquage de l'isolant ou du diélectrique.

Les décharges partielles (DP) sont des décharges électriques qui apparaissent dans les diélectriques solides, liquides ou gazeux présentant des défauts (cavité, décollement,...) dès qu'une tension suffisante est appliquée. Ces décharges correspondent à une rupture des gaz occlus dans les défauts, et elles sont appelées 'partielles' car elles ne court-circuitent pas l'ensemble de l'isolation. [18]

**II.5.2. Décharges électrique non-autonome**

Une décharge électrique est dite non-autonome, si elle s'interrompt dès que cesse d'agir l'agent ionisant extérieure. On sait que les gaz sont généralement de bons isolants, mais il est possible sous certaines conditions de les faire traverser par un courant de particules chargées. On dit alors que le gaz est le siège d'une décharge.

Si nous appliquons une tension  $V$  entre les électrodes, aucun courant ne passe. Par un procédé thermique direct ou indirect, ou par un rayonnement ultraviolet, provoquons une émission thermoélectronique ou photoélectrique à la cathode. Les électrons sont émis et forment une Charge d'espace près de la cathode. Si on augmente  $V$ , on collecte de plus en plus d'électrons (partie A de la figure I.3) jusqu'au moment où, pour une émission donnée, on a saturation (partie B de la figure I.3). Le caractère essentiel de cette décharge est qu'elle n'est pas auto-entretenu et que le courant cesse dès que la production soit arrêtée par un processus extérieur.

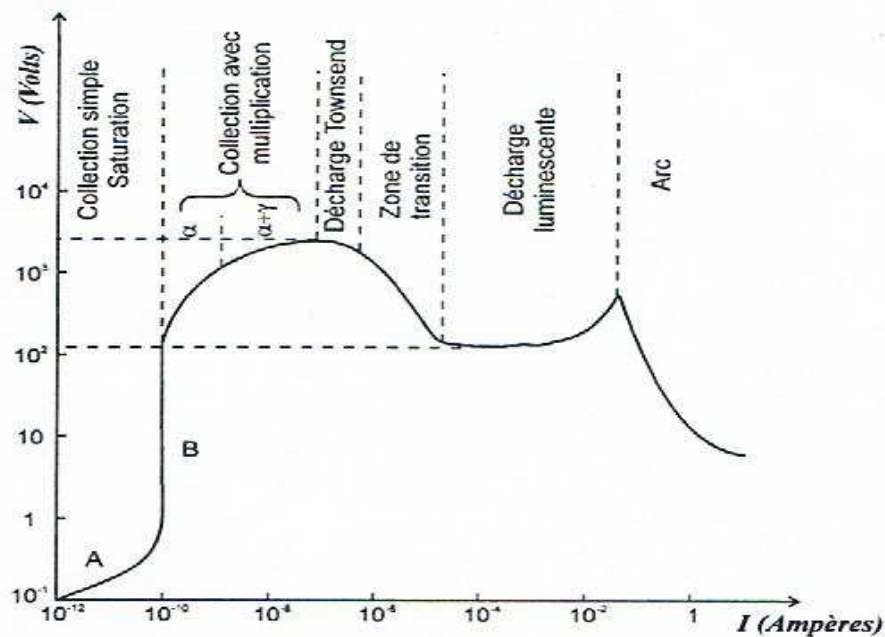


Figure II.1 : Caractéristique schématique de la décharge.

### II.5.3 Décharge électrique autonome

Les décharges qui peuvent survivre à l'agent ionisant extérieur, sont dites autonomes. Les décharges apparaissent lorsque la tension appliquée aux électrodes dépasse une valeur minimale.[19]

Le siège d'un ou plusieurs phénomènes produisant les électrons nécessaires à l'entretien de la décharge sans intervention d'un agent ionisant extérieur.

La nature et les conditions d'établissement d'une décharge autonome dépendent de la pression du gaz. Townsend a étudié la transition de la décharge dite non autonome à la décharge autonome, en considérant un ensemble de processus susceptible d'être à l'origine de ce phénomène.

### II.5.4. La décharge de Townsend

En champ uniforme et aux faibles  $p.d$ , le phénomène de la décharge est expliqué par la théorie de Townsend. Dans la théorie de Townsend, les ions positifs de l'avalanche électronique vont vers la cathode (électrode négative). Si ces derniers ont une énergie suffisante, ils peuvent arracher des électrons par bombardement de la cathode. Lorsque l'intensité du champ électrique est suffisante, ce phénomène devient important [8]. L'avalanche s'auto entretient et le claquage se produit même si la tension n'est plus appliquée. L'accroissement d'une quantité  $dn$  d'un nombre initial  $\eta$  d'électrons libres qui

devient d'une longueur  $dx$  dans un gaz à pression  $p$  sous l'effet d'un champ toujours uniforme  $E$ , est donné par le coefficient suivant :

$$\alpha = \frac{1}{\eta} + \frac{dn}{dx}$$

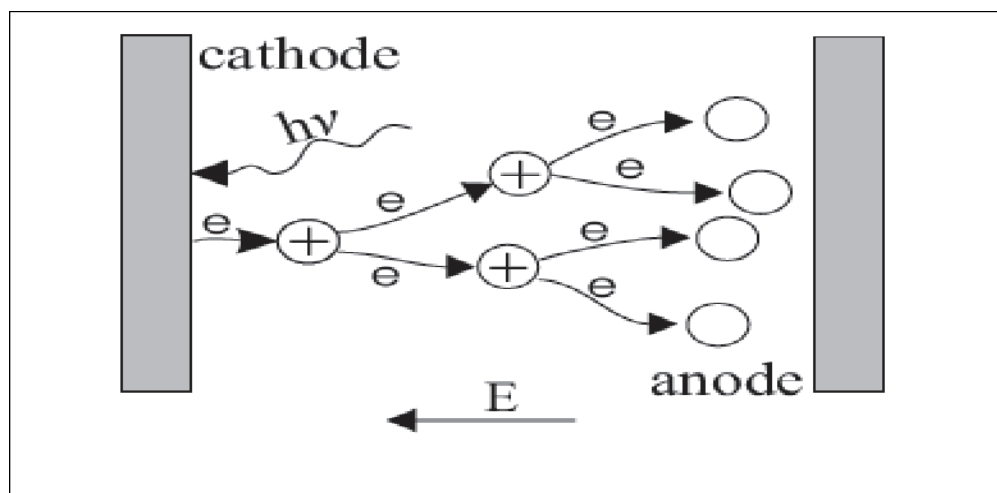
Cette première phase d'ionisation désigne le premier coefficient de Townsend, qu'est défini comme étant le nombre moyen de paires ions-électrons (ou le nombre moyen de chocs ionisants) qu'un électron effectue par unité dans la direction du champ électrique. Il dépend du champ électrique, de la pression et de la nature du gaz une influence de la nature du gaz. Au bout d'un certain parcours, les électrons ne sont plus énergétiques pour créer de nouveaux pairs électrons.

Pour qu'une avalanche s'auto entretient et le claquage se produit, il faut que de nouveaux électrons-germes puissent rapidement apparaître. Il existe de nombreux processus pouvant conduire à la création de nouveaux germes. Citons les plus importants [9]

Au sien du gaz : au lieu d'être ionisés par collision avec un électron, les atomes peuvent être excités, puis se désexciter en émettant un photon. Le photon peut à son tour ioniser un autre atome par photon-ionisation.

Dans la cathode : les ions positifs formés au cours des collisions ionisantes bombardent la cathode et peuvent en extraire des électrons.

C'est ce dernier processus qui a retenu l'attention de Townsend. Il introduit un deuxième coefficient note «  $\gamma$  » qui représente le nombre d'électrons arrachés à la cathode par un ion positif. Ce coefficient dépend de la nature du matériau constituant la cathode et du gaz.



**Figure. II.2 : Mécanisme de Townsend [8]**

II.5.4.1 Modélisation de la décharge de Townsend

L'avalanche électronique peut être étudiée quantitativement à partir de la connaissance du coefficient  $\alpha$  dit le premier coefficient d'ionisation de Townsend.

Ce coefficient représente le nombre d'électrons (ou ions positifs) créés par un électron par élément de longueur le long d'une ligne de force du champ appliqué.

A titre d'illustration considérant un système à champ uniforme : deux électrodes planes à une distance  $d$  l'une de l'autre contenant un gaz à la pression  $P$  avant le claquage figure(I.3).

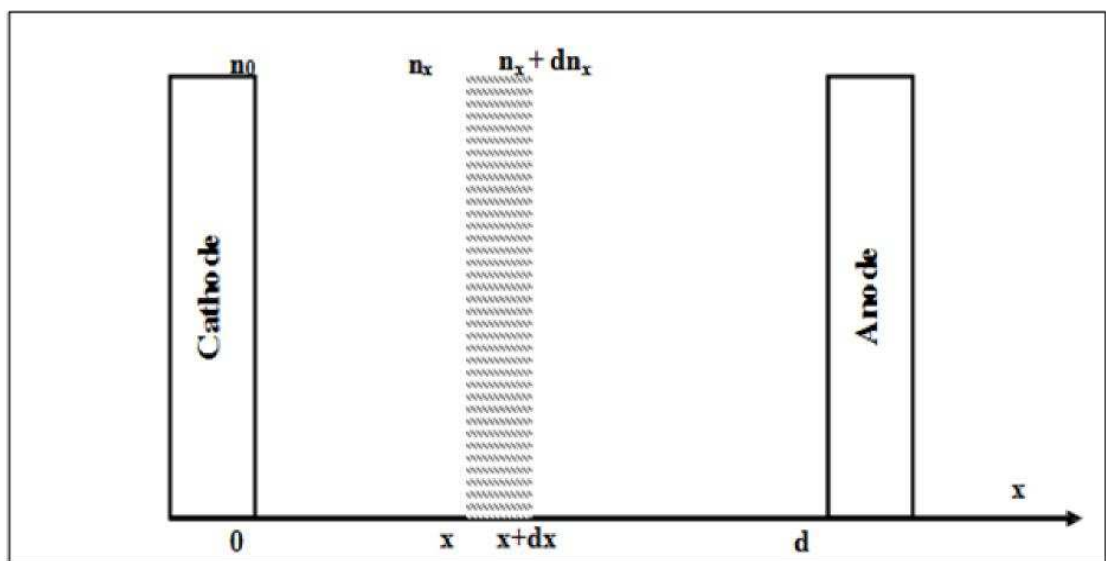


Figure II.3. Modélisation de la décharge de Townsend.

Où :

$n_0$  : nombre d'électrons/seconde émis de la cathode

$n_x$  : nombre d'électrons à l'abscisse  $x$

$d n_x$  : nombre d'électrons créés à l'abscisse  $x$

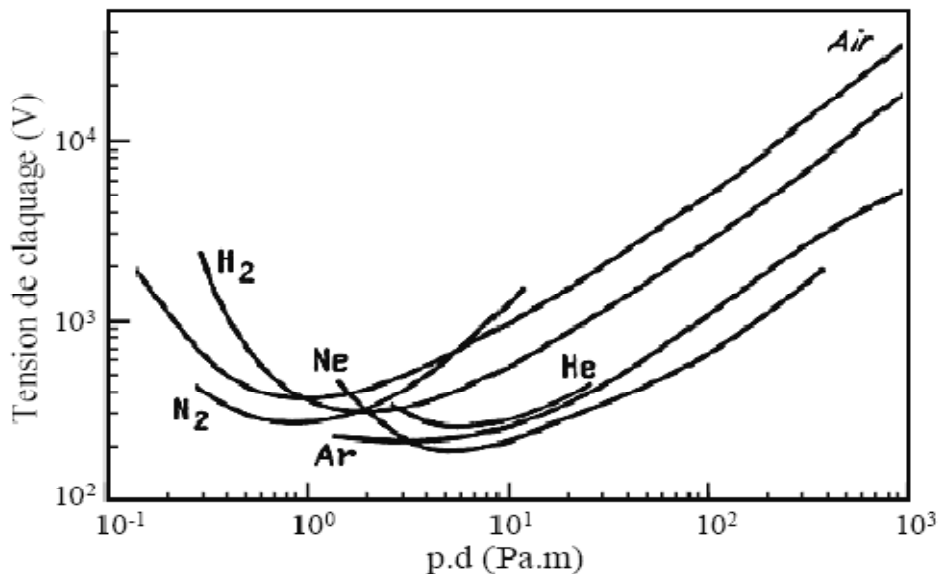
Sur un élément de longueur  $dx$ , un électron crée  $\alpha \cdot dx$  électrons, on écrit :

$$d n_x = \alpha dx$$

Lorsqu'à une abscisse  $x$ , il existait  $n_x$  électrons, le nombre  $dn_x$  d'électrons créés sera multiplié par  $n_x$ .

**II.5.5. Tension d'amorçage en champ homogène (loi de PASCHEN)**

La tension d'alimentation minimale pour déclencher la décharge est appelée tension du claquage. Il existe une relation qui lie la valeur de cette tension du claquage à la pression du gaz, et de la distance interélectrode : la loi de PASCHEN. Cette loi est habituellement représentée par la courbe caractéristique  $U_0 = f(p.d)$ , où  $p$  est la pression et  $d$  la distance interélectrode, et dépend de la nature du gaz introduit. [11]



**Figure (II. 4) :** tension de claquage pour différents gaz en fonction du produit ( $p.d$ ). [10]

Nous pouvons constater que pour un gaz à pression atmosphérique ( $p=1.013 \cdot 10^5$  pascal), les courbes passent un minimum pour une distance interélectrode d'environ  $10 \mu\text{m}$  ( $p.d = 0.5$  à  $5$  environ), cela par signifie que, pour la production des décharges à pression atmosphérique dans des conditions d'utilisation usuelles ( $d \geq 1\text{mm}$ ), la tension du claquage est une fonction croissante de la distance interélectrode [6].

**II.5.6. Théorie du streamer**

La vitesse des électrons étant environ 100 fois supérieure à celle des ions c'est bien que l'avalanche conduite à la formation d'une structure dipolaire comme le montre la figure (II.5).

Une région (vers l'anode) à forte densité d'électrons

Une région (vers la cathode) à forte densité d'ions positifs.

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

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

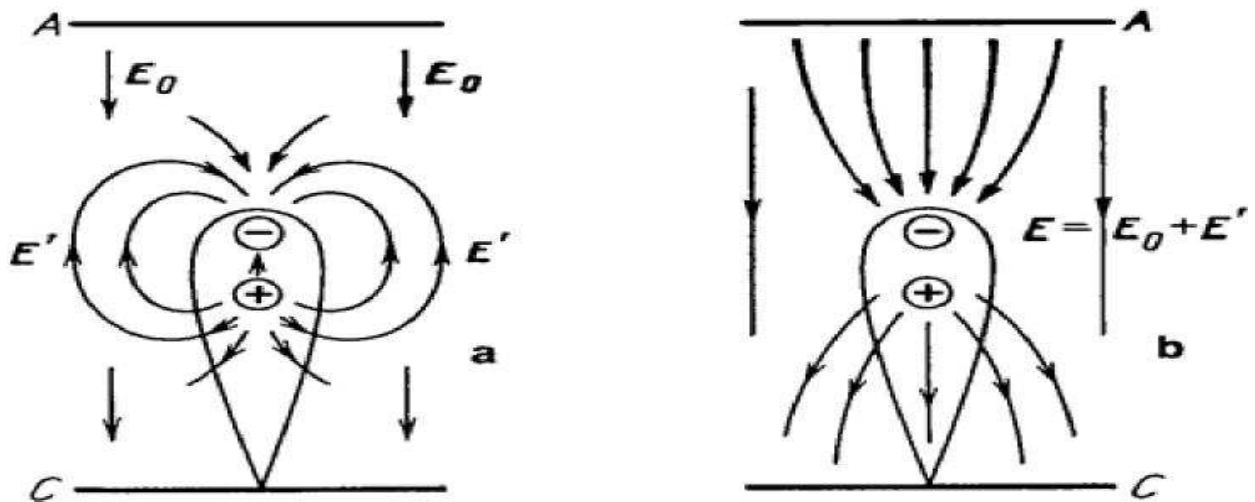


Figure II.5. Schéma d'une avalanche électronique

En la direction de la cathode, le champ électrique est augmenté par la charge d'espace positive. Dans cette région de nombreux électrons sont créés (par photo-ionisation) et de nouvelles avalanches dites "secondaires" se développent en direction de la première (l'avalanche principale). Les électrons de ces avalanches viennent neutraliser la charge d'espace positive figure (I.6).

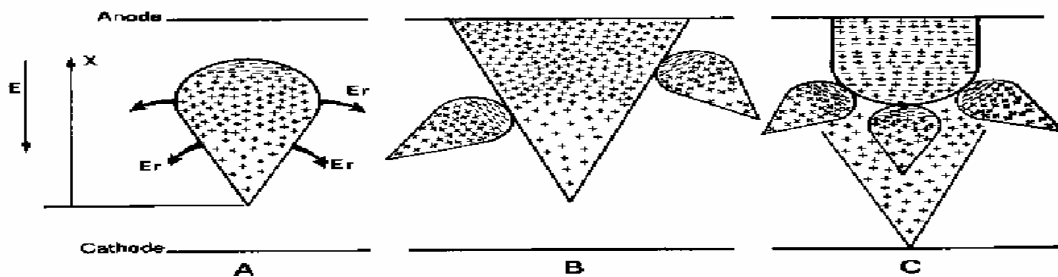


Figure II.6. Etapes successives de développement du streamer positif

$E_r$  : champ décharge d'espace.

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

Ainsi le streamer consiste en:

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

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

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

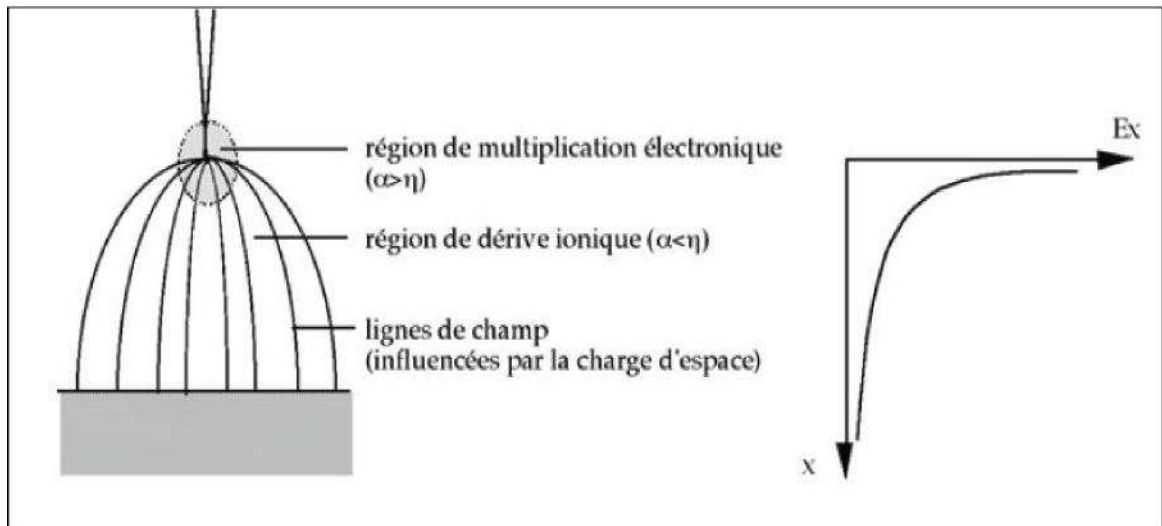
$$E_r = K.E_g \quad K \approx 1$$

Bon accord pour des valeurs de  $pd$  de l'ordre de 10 000 [torr.cm](#).

\* Critère de *Raether*: l'avalanche peut se transformer en streamer si le nombre de charges de l'avalanche principal atteint 10<sup>8</sup> à 10<sup>10</sup> électrons. Critère énoncé pour une pression atmosphérique. [1]

### **I.5.7 Description de la décharge couronne**

Le terme décharge couronne désigne une décharge électrique autonome dans laquelle les phénomènes d'ionisation primaire des atomes ou des molécules ont lieu essentiellement à proximité des électrodes, cela implique un champ électrique fortement inhomogène et suffisamment élevé près des électrodes du fait de leurs configurations géométriques (systèmes de type pointe-pointe ou pointe-plan) [8].



**Figure (II.7) :** Représentation schématique de la décharge couronne et du champ électrique sur l'axe de symétrie en fonction de la distance à la pointe.

**a. Seuil d'apparition de la décharge couronne**

Lorsqu'un conducteur est soumis à une tension croissante, le champ critique d'effet de couronne est défini par l'apparition brusque d'une importante conductivité de l'air dans son voisinage immédiat.

Selon F.W. Peek, pour une configuration cylindrique, l'apparition de l'effet de couronne est fonction du champ superficiel, du rayon du conducteur, et de la densité de l'air.

$$E_c = E_0 \delta m_1 m_2 \left( 1 + \frac{0.308}{\sqrt{\delta r}} \right) \quad [9,13] \quad (II.1)$$

Avec :

$E_0 = 30\text{kV/cm}$  : Valeur de crête du champ électrique en conditions normales.

$r$ : Rayon du conducteur en cm.

$m_1$ : Coefficient qui tient compte de l'état de surface du conducteur (l'irrégularité géométrique du conducteur).

$m_2$ : Coefficient qui prend en considération l'influence de la pollution des conducteurs souvent le produit ( $m_1 m_2$ ) est remplacé par un seul coefficient : «  $m$  ».

$\delta$  : Densité de l'air.

$$\delta = \frac{p}{p_0} \frac{273+t_0}{273+t} \quad (II.2)$$

$p$  : pression autour du conducteur.

$p_0$  : pression normale qui est égale à 760 mm Hg.

Le terme «  $1 + \frac{0.308}{\sqrt{\delta r}}$  » : est appelé correction de Peek, il tient compte du fait que plus le rayon du conducteur est petit plus il est difficile d'ioniser loin de ce conducteur. Cette difficulté d'ioniser est due au fait que le champ électrique décroît très rapidement en s'éloignant du conducteur. [12,9]

Il est à noter que l'état de surface du conducteur est très importante dans la détermination du champ électrique. La relation précédente ne se vérifie que pour des surfaces parfaitement polies. On tient compte de cet effet en attribuant au conducteur un coefficient expérimental  $m < 1$ , appelé coefficient de surface.

Le champ critique  $E_0$  d'un conducteur imparfaitement poli s'exprime alors sous la forme [13] :  $E_0 = m E_c$

## **II.6. Les facteurs influençant sur la décharge couronne**

Plusieurs facteurs peuvent influencer le seuil et les caractéristiques de la décharge couronne [12] on distingue trois facteurs essentiels :

- Facteurs géométriques.
- Facteurs physico-chimiques.
- Facteurs électriques.

### **II.6.1. Facteurs géométriques**

#### **a. Rayon de la courbure**

L'augmentation du rayon de courbure augmente la tension seuil d'apparition de l'effet couronne.

#### **b. Distance inter-électrodes**

L'influence de la distance inter-électrodes sur les paramètres de la décharge est montrée sur la figure II.8.

Il apparaît clairement que le courant est plus important et croît plus rapidement avec la tension appliquée pour de faibles distances inter-électrodes. De plus, les seuils de décharge couronne apparaissent pour de faibles valeurs de tension dans le cas des distances inter-électrodes petites.

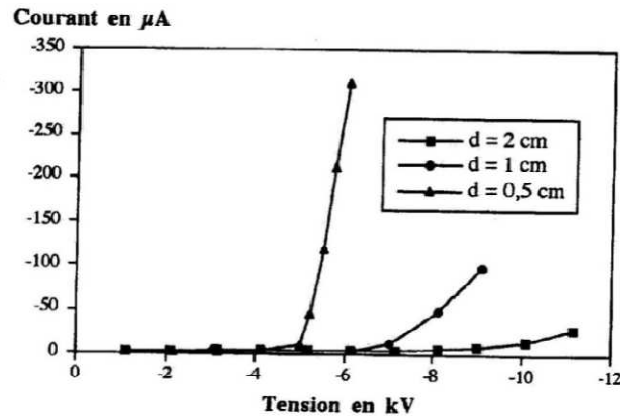


Figure II.8. Influence de la distance inter-électrodes sur le courant de la décharge couronne

[13]

### I.6.2. Les facteurs physico-chimiques

#### a. La température

Avec l'augmentation de la température, à la pression normale, la rigidité diélectrique de l'air diminue, ce qui favorise la décharge couronne. Cela est dû au fait que dans ce cas le libre parcours moyen augmente [14].

#### b. L'humidité et la densité de l'air

Pour les systèmes d'électrodes à champ non uniforme, l'humidité a une grande influence sur la tension de décharge.

Quand le taux d'humidité H augmente, la tension de décharge augmente. En effet, les molécules de vapeur d'eau s'attachent aux électrons libres et freinent ainsi le développement de la décharge. La tension de décharge est proportionnelle à la densité de l'air.

Des facteurs de correction doivent être appliqués :

- Soit pour convertir une tension mesurée dans des conditions atmosphériques quelconques à la valeur qui aurait été obtenue sous les conditions atmosphériques de référence.
- Soit pour convertir une tension d'essai spécifiée pour les conditions de référence en sa valeur équivalente dans des conditions régnant au cours de l'essai.
- Le facteur de correction  $k_d$  tenant compte de la densité de l'air :

$$K_d = \left(\frac{p}{p_0}\right)^m \left(\frac{t_0 + 273}{t + 273}\right)^n$$

$t_0 = 25^{\circ}\text{C}$  : température normale.

$p_0 = 1013 \text{ mbar}$  : pression normale.

$p$  : la pression atmosphérique en mbar.

$t$  : la température atmosphérique en degrés Celsius.

- Le facteur de correction  $k_h$  tenant compte du taux de l'humidité :

$$k_h = k^w$$

$h_0$  : humidité absolue normale. ( $h_0 = 11 \text{ g d'eau / m}^3 \text{ de gaz}$ ).

La constante  $k$  dépend de l'humidité absolue et les exposants  $m$ ,  $n$  et  $w$  dépendent de la nature et de la polarité de la tension ainsi que de la distance d'amorçage  $d$ .

Pour ramener la tension de décharge mesurée à sa valeur dans des conditions atmosphériques normales on utilise la relation suivante :

$$Ud_n = Ud \frac{k_h}{k_d}$$

### **c. La pression**

L'effet de la pression est proportionnel à la tension d'amorçage et inversement proportionnel au courant .

### **I.6.3. Facteurs électriques**

L'effet couronne diffère selon qu'on applique à un système d'électrodes une tension continue ou alternative.

Les différents modes d'émission de charges qui ont été décrits en tension alternative sont observés également en tension continue, la seule différence est que l'effet couronne en tension alternative implique que la concentration des émissions de charges correspond à la crête de la sinusoïde du courant, tandis qu'en continu l'émission de charges est permanente [15].

## **II.7. Influence de la distribution du champ électrique appliqué**

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

Si les électrodes sont dissymétriques, par exemple une configuration pointe-plan, les avalanches se développeront préférentiellement dans la région de fort champ c'est-à-dire

près de la pointe. Le streamer s'il prend naissance se propagera tant que le champ électrique total ( $E_g + E_r$ ) dans la région active permet de reproduire des avalanches secondaires.

### **II.8. Influence du type de tension appliquée**

L'existence ou non du streamer est liée à l'amplitude du champ électrique dans l'intervalle, donc de la tension appliquée aux bornes de l'intervalle, d'air en l'occurrence. La forme de la tension appliquée est donc importante pour décrire le déclenchement du streamer. Elle peut être alternative.

*En tension alternative (50 ou 60 Hz), les processus sont identiques car la fréquence de la tension appliquée est très inférieure à celle des streamers. La fréquence de répétition des couronnes est du domaine de l'audible.*

C'est précisément les bourdonnements que l'on entend sous les lignes HT. Dans ce cas, les streamers se développent tout autour du câble HT et on parle de "décharge couronne". [20]

### **II.9. Paramètres influant sur le développement de la décharge**

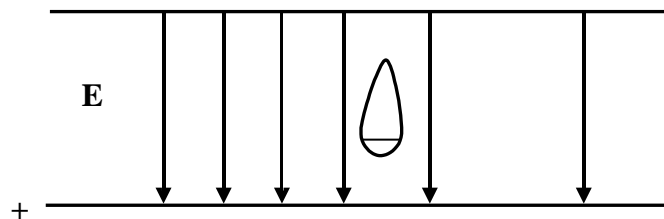
#### **a. Présence des particules conductrices dans l'air**

Les particules existant dans l'intervalle d'air pointe-plan sont responsables des modifications des conditions de décharge. La présence de particules conductrices réduit la rigidité de l'air. Un champ uniforme, relativement faible, peut déplacer des objets fins métalliques d'où la décharge est initiée par des micro-décharges produites par ces particules quand elles sont proches des électrodes. A. Sumuilaet L. Dascalescu [7], ont analysé les conditions de décharge en présence de petites particules conductrices sphériques, de rayon  $R$  et de masse  $m$  sous l'effet du champ  $E_{ni}$  de décharge de couronne pour un système pointe-plan avec une polarité positive.

### **II.10. Influence de la distribution du champ électrique appliqué**

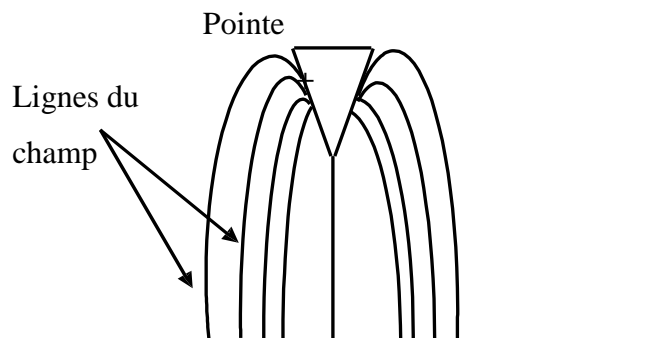
Si les électrodes sont des plans parallèles, le champ est homogène. Si son intensité est telle qu'un streamer prend naissance, son développement sera jusqu'à la cathode. La condition de claquage de l'intervalle (d'air ou de gaz) se ramène à la condition d'apparition du streamer.

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



**Figure I1.9 :** La configuration plan-plan les lignes de champs sont parallèles et le champ est parfaitement homogène dans l'espace inter électrodes. Dès qu'un streamer prend naissance il se propage jusqu'à l'anode

Si la pointe est portée à une tension positive par rapport au plan, les avalanches se développent vers la pointe et le streamer, en sens inverse vers le plan.



**Figure I1.10:** La configuration pointe positive plane à la terre, les lignes de champ montrent la dissymétrie du champ électrique entre électrodes.

Si la pointe est à un potentiel négatif, les avalanches s'éloignent de la pointe et les streamers aussi. Car la tête de l'avalanche dans ce cas est chargée par les électrons qui ont une vitesse plus grande que celle des ions qu'ils ont laissés derrière eux.

### II.11. Influence de différents paramètres sur la rigidité diélectrique

Il existe plusieurs facteurs qui ont une influence sur la valeur du champ disruptif dans les liquides. Parmi ces facteurs, les plus importants sont les impuretés et les gaz dissous dans le liquide, la pression hydrostatique, la configuration des électrodes, la température, la durée d'application de la tension et l'état antérieur du liquide.

#### a. humidité

La présence d'un peu d'humidité dans le liquide diminue considérablement la rigidité diélectrique de ce dernier.

#### b. Pression hydrostatique

L'augmentation de la pression hydrostatique améliore la rigidité diélectrique du liquide.

#### c. Distance entre électrodes

En augmentant la distance entre électrodes, la tension de calquage augmente. Dans le cas de champ électrique non uniforme lorsque la tension appliquée dépasse un certain seuil, l'effet de Couronne apparaît (formation de streamers).

#### d. Température

L'influence de la température est double. En augmentant la température, la concentration de gaz et de l'humidité diminue dans le liquide. Cependant, les conditions pour avoir un claquage thermoélectrique s'améliorent. Cette influence de double effet, fait apparaître un maximum local dans la caractéristique représentant la variation de la tension de claquage en fonction de la température.

### II.12- Influence de la barrière sur la décharge couronne

#### II.12.1- définition

Les barrières sont des matériaux qui présentent une très grande résistance au passage du courant électrique et dont la conductibilité est pratiquement nulle. Elles ont une structure moléculaire d'atomes ayant plus de quatre électrons périphériques. Ces électrons fortement retenus par des forces de liaison inter atomiques et ne peuvent guère devenir libres pour donner lieu à un courant électrique.

Les barrières isolantes sont utilisées pour isoler les conducteurs et les pièces sous tension afin d'empêcher les courts-circuits.

Les écrans isolant de natures différentes ; n'ont pas tous les même performances du point de vue de l'augmentation de la tension disruptive d'un système d'isolement, cela est du au fait que les paramètres définissant les propriétés d'un matériel varient d'un diélectrique à un autre.

### **II.13 Influence de l'épaisseur de la barrière et de la permittivité**

La permittivité et l'épaisseur de la barrière ont une influence sur la distribution des porteurs de charges positives et sur la tension à la surface de barrière.

Quand ces deux paramètres ont des valeurs importantes, le champ entre la barrière et le plan devient de plus en plus uniforme.

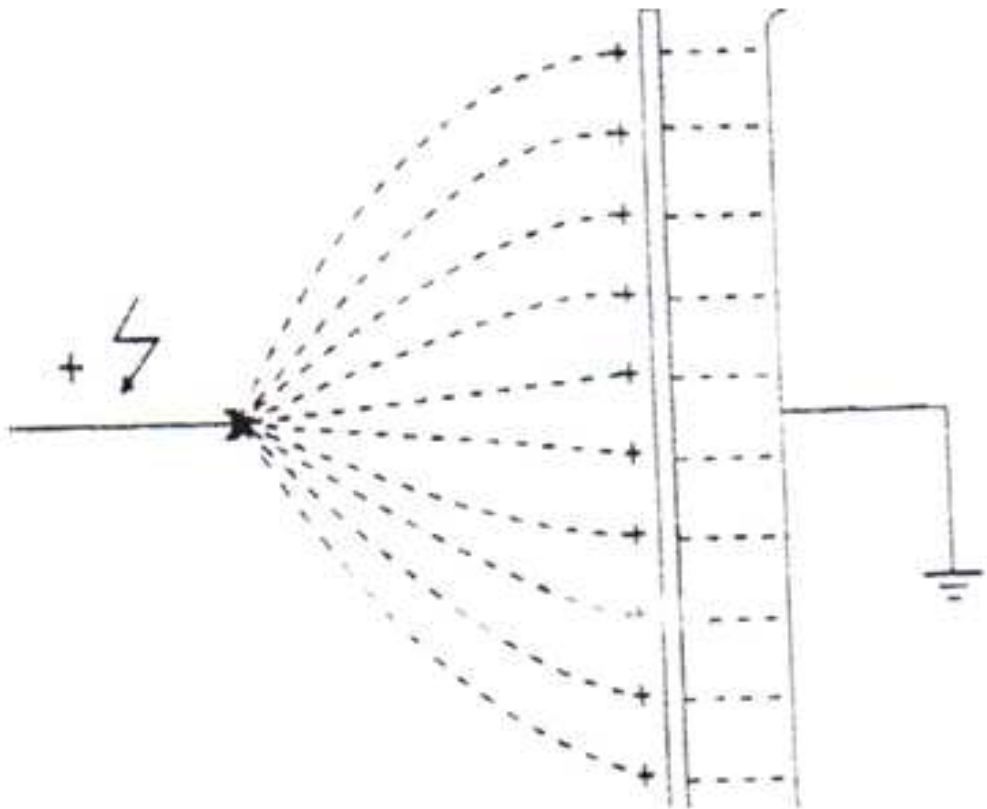
Le courant diminue de façon quasi linéaire avec l'augmentation de l'épaisseur de la barrière isolante pour les deux polarités mais la diminution est moins importante pour les impulsions négatives.

### **II.14 Influence des paramètres extérieurs à la nature de la barrière**

L'amélioration de la rigidité diélectrique d'un système pointe-plan en y plaçant correctement une barrière isolante peut être considérable. Les ions positifs créant la charge spatiale sont alors freinés par la barrière et se répartissent sur la surface.

La répartition du champ électrique subit une déformation en provoquant une augmentation de la tension disruptive du système et une amélioration notable quand la barrière est placée près de la pointe positive. Parmi ces paramètres, on pourra citer :

- L'influence du type de la tension appliquée aux électrodes,
- L'influence de la polarité de l'électrode pointe,
- L'influence de la position de la barrière ainsi que ses dimensions



**Figure I.11** : Déformation du champ électrique en présence de la barrière

## II.15 Influence des barrières isolantes sur la rigidité diélectrique de l'air

L'emploi des barrières isolantes est considéré comme l'un des moyens les plus importants pour l'amélioration de la rigidité diélectrique d'un système interélectrode. Cette idée est déjà ancienne. Elle fut remarquée, dès les années 1920 par C.P.Steinnut.

D'après ces études, cet emploi, doit tenir compte de paramètres dont les plus importants sont la polarité et le type de tension appliquée, la position de la barrière ainsi que ses dimensions, sa résistivité superficielle.

Vers les années 1930, E. Max montre que la présence d'une barrière isolante modifie la répartition du champ électrique et provoque une amélioration notable quand la barrière est pratiquement sans effet. [21]

Les figures (II.12, II.13) montrent les allures qualitative de la distribution du champ électrique dans un système pointe-plan avec et sans barrière.

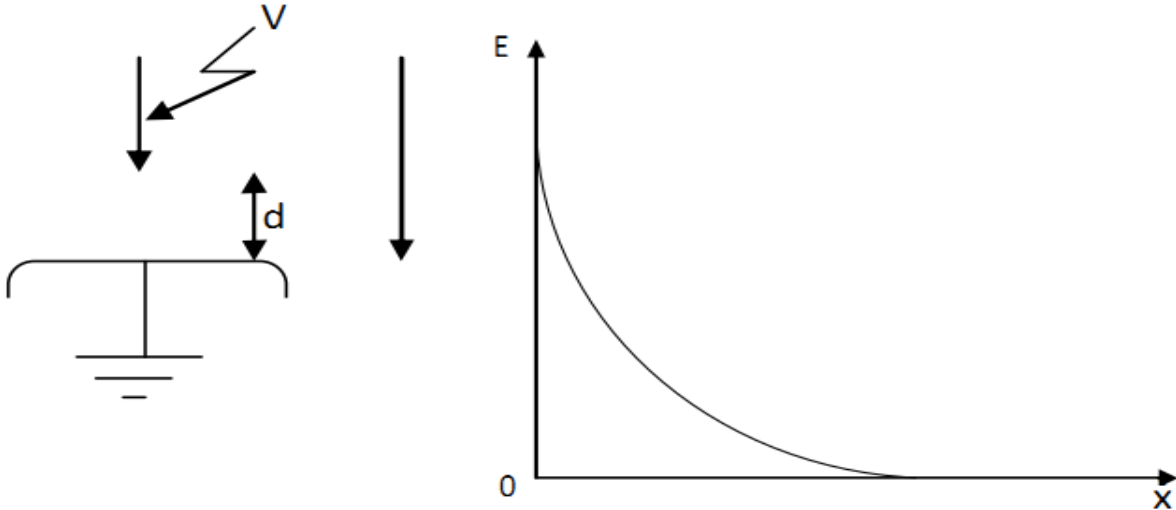


Figure II.12 : champ électrique dans le système pointe-plan

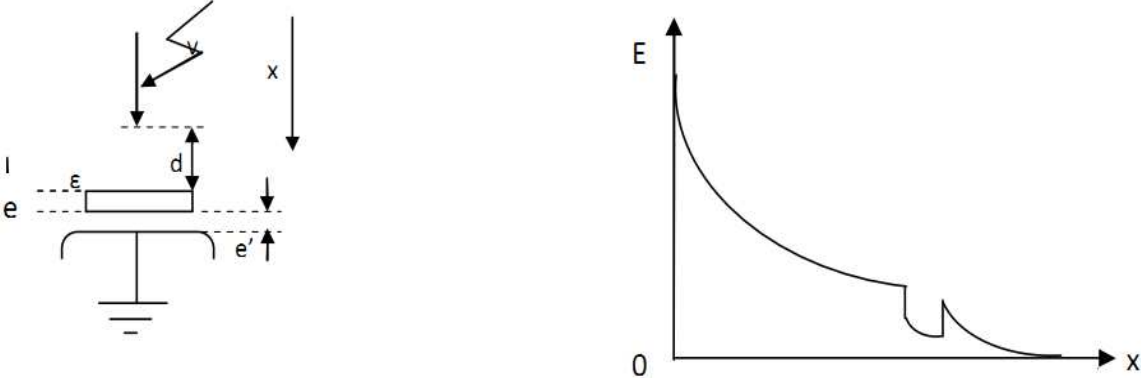


Figure II.13 : champ électrique dans le système pointe-barrière-plan

**I.15. Conclusion**

Nous avons présenté dans ce chapitre une brève revue sur les différents types de décharge électrique, et nous sommes intéressés particulièrement aux décharges électriques générées entre deux électrodes par l'application d'un champ électrique. Nous avons décrit l'origine et les différents facteurs qui influent sur la décharge dans le gaz.

### III.1 Introduction

La détermination de potentiel et du champ électrique d'un matériau passe par la résolution de l'équation de Poisson ou de Laplace. Il s'agit donc de la détermination de la répartition spatiale du champ électrostatique ( $\vec{E}$ ) ou de vecteur déplacement ( $\vec{D}$ ) et du potentiel ( $V$ ) en fonction de la répartition connue des charges et des conditions aux limites, c'est-à-dire de la répartition donnée du potentiel sur les surfaces limitant le volume pour lequel le champ est calculé. Le calcul du champ peut être effectué par plusieurs méthodes : analytique, graphique, expérimentale est numérique.

Le développement des méthodes numériques a ouvert des champs d'application très divers et plus particulièrement celui de la détermination des caractéristiques des matériaux, la performance de ces méthodes numériques a été démontrée par plusieurs chercheurs. Parmi les méthodes numériques les plus connues et les plus répandues pour la résolution des équations différentielles, décrivant des phénomènes ou des structures électromagnétiques, on peut citer la méthode des éléments finis (MEF), la méthode des différences finis (MDF), les méthodes des équations intégrales de frontières (BEM). Dans ce chapitre on se limite uniquement à la présentation de la méthode des éléments finis celle utilisé par femm (finite element method magnetics).

### III.2. La méthode des éléments finis (MEF)

La méthode des éléments finis à fournit un outil intéressant dans la discrétisation géométrique, apparue à la fois dans les années trente, elle n'a été appliquée aux structures électromagnétiques qu'à la fin des années 1968.

#### III.2.1. Principe de discrétisation géométrique

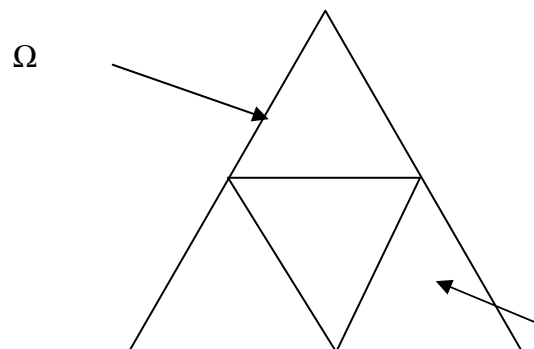


Figure. III.1. La discrétisation géométrique

$\Omega$  : le domaine définissant l'espace de la structure électromagnétique.

La discrétisation consiste à subdiviser le domaine  $\Omega$  en sous-domaine élémentaire  $\Omega_e$  dite aussi éléments finis, il faut que :

- $\Omega_e$  doit être homogène (un seul milieu, une seule source de courant, géométrie simple)
- Aucun sous-domaine ne doit empiéter sur son voisin et les vides sont interdits

### III.3. Avantages et inconvénients de la méthode (MEF)

La méthode des éléments finis consiste à approcher dans un sous-espace de dimension finie, un problème écrit sous forme variationnelle. La solution approchée est dans ce cas une fonction déterminée par un nombre fini de paramètres comme, par exemple, ses valeurs en certains points (les nœuds du maillage).

Cette méthode est intéressante compte tenu de sa souplesse d'utilisation en particulier lorsqu'il s'agit de phénomènes non linéaires dans la prise en compte des géométries complexes.

La complexité de mise en œuvre et le cout en temps de calcul et en espace mémoire, sont les inconvénients de la méthode [3].

### III.4. Représentation des coordonnées de la structure étudié

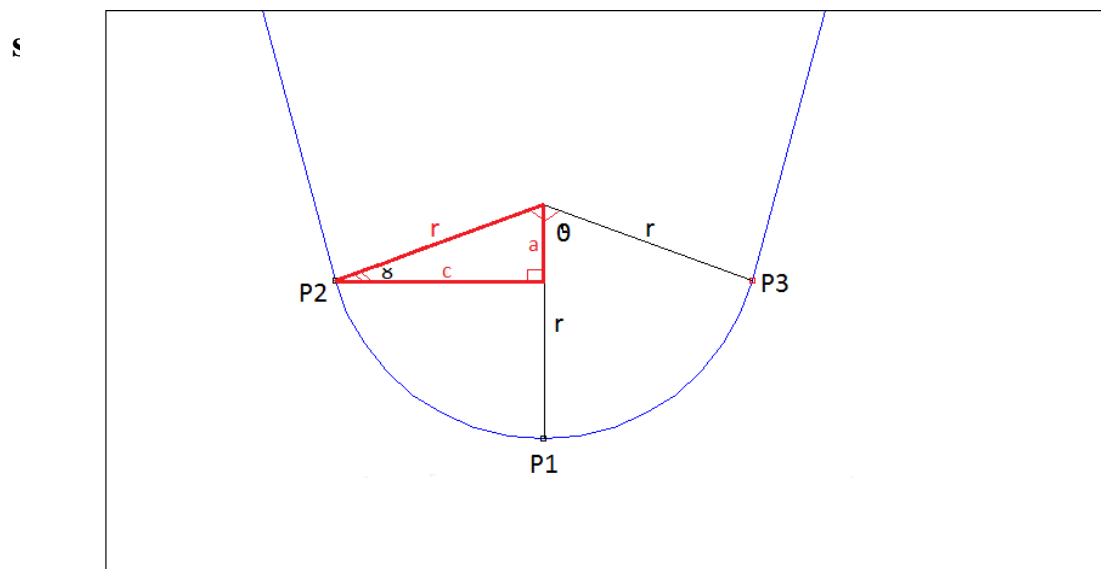
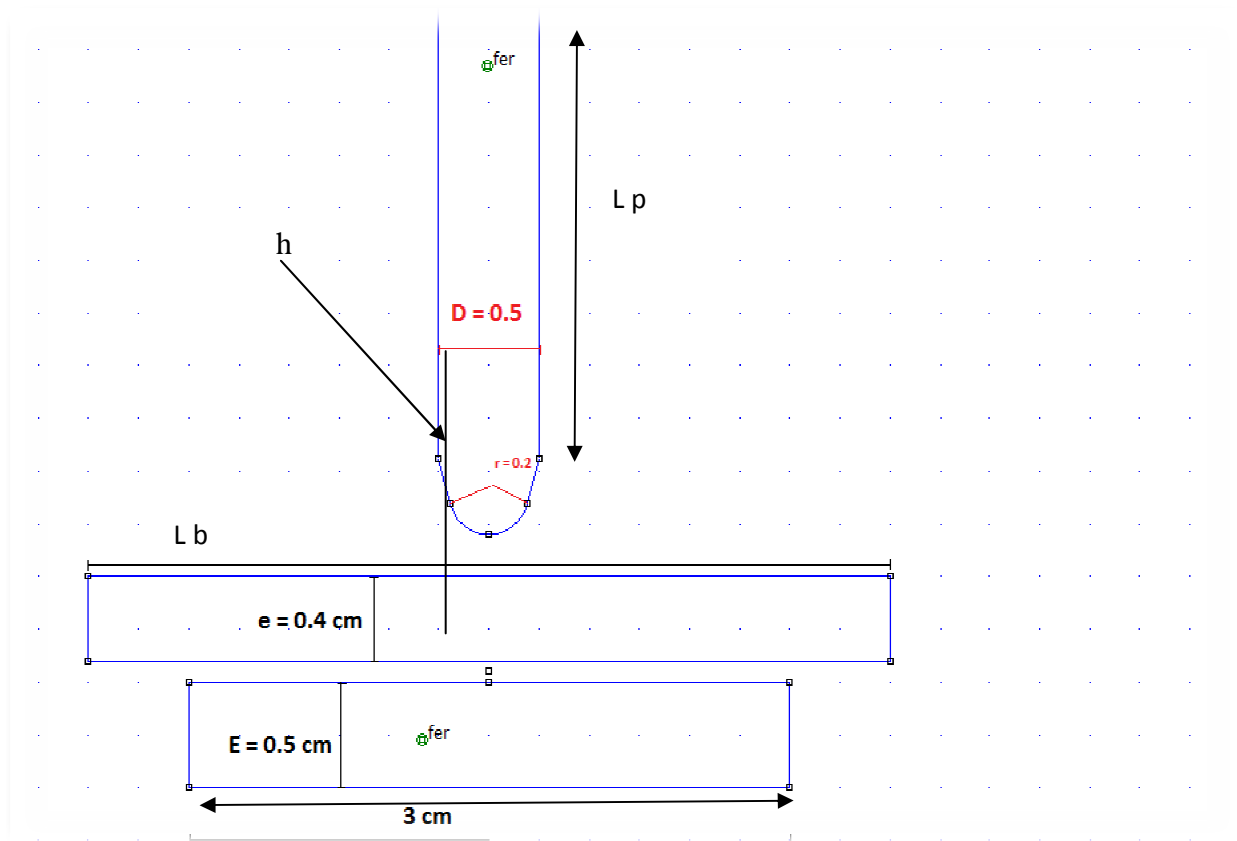


Figure. III.2. Représentation des coordonnées de la structure étudié



**Figure. III.3.** Représentation des coordonnées de la structure étudié

Les caractéristiques géométriques du système étudié sont données comme suit :

**Pointe :**

$$r = 0.2 \text{ cm}$$

$$D = 0.5 \text{ cm}$$

$$L_p = 4.5 \text{ cm}$$

$$e = 0.5 \text{ cm}$$

**Barrière :**

$$e = 0.4 \text{ cm}$$

$$L_b = 4 \text{ cm}$$

**Plan:**

$$E = 0.5 \text{ cm}$$

$$L = 3 \text{ cm}$$

Les caractéristiques physique sont telle que citées ci-après :

**Pointe:**

$$V = 2000 \text{ V}$$

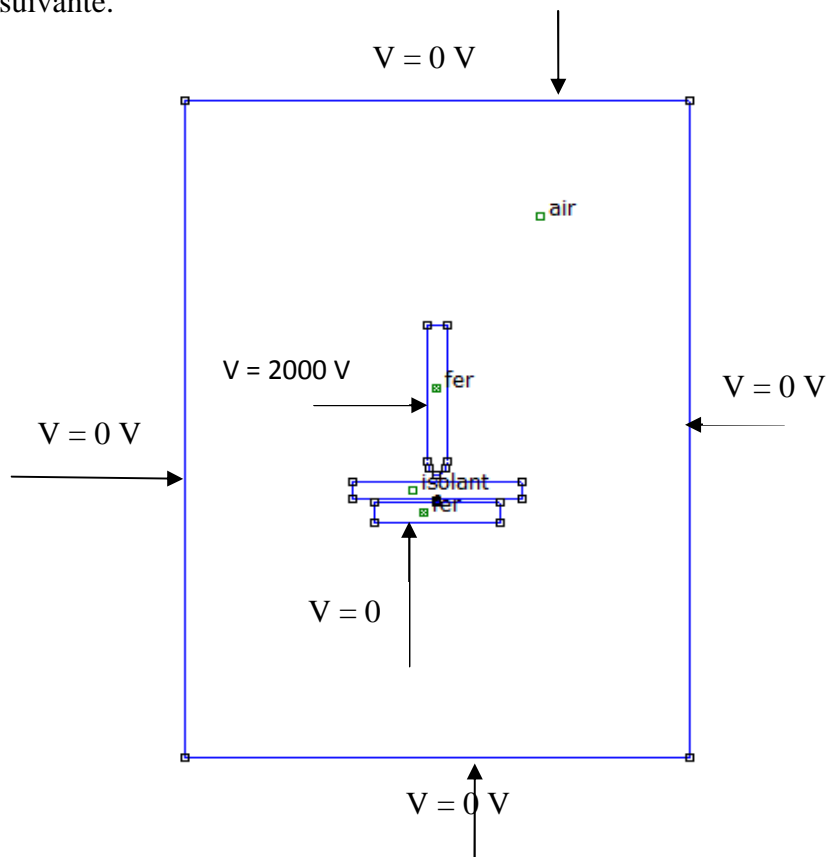
**BARRIERE :**

$$\varepsilon = 2 \text{ à } 13$$

**Plan :**

$$V = 0 \text{ V}$$

Le dispositif d'étude ainsi que les conditions aux limites associées est illustré par la figure (III.4) suivante.



**Figure. III.4.** Dispositif d'étude et condition aux limites associées

### III.5. Le maillage

Nous allons appliquer à la structure étudiée un maillage de type triangulaire

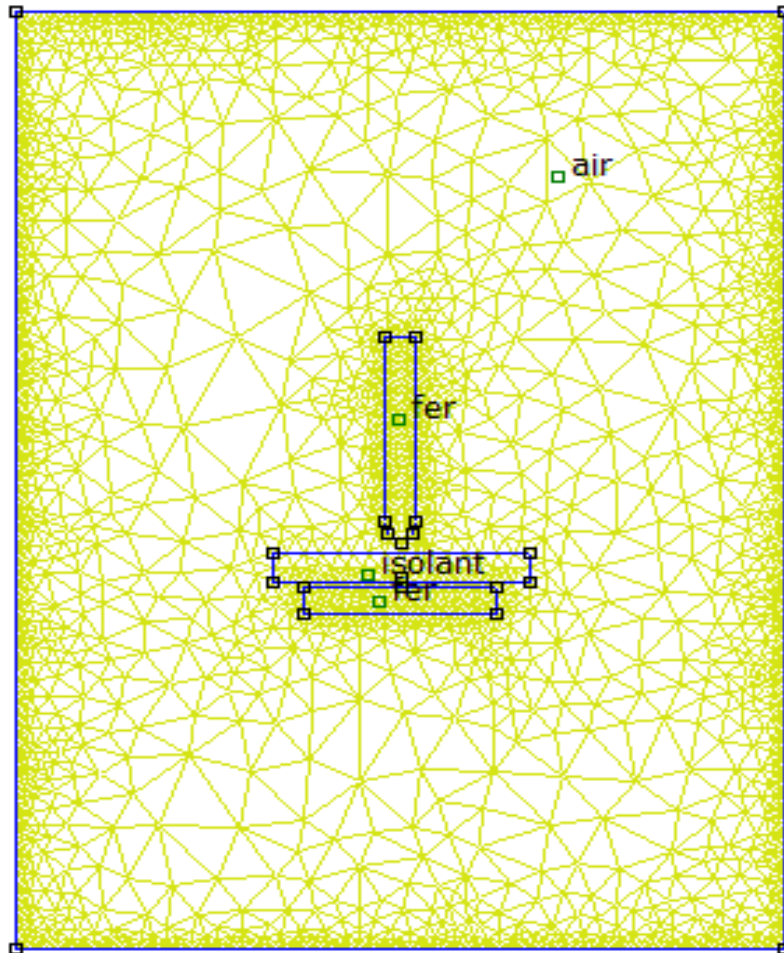


Figure. III.5. Représentation du maillage

### III.6. Equations à résoudre

Les équations ci-dessous sont celles caractérisant les problèmes électrostatiques

$$\nabla D = \rho \quad (\text{III.1})$$

$$\nabla E = 0 \quad (\text{III.2})$$

$$D = \varepsilon E \quad (\text{III.3})$$

$$E = -\nabla V \quad (\text{III.4})$$

Les équations (1) et (3) donne :

(III.5)

On remplace (4) dans (5) :

(III.6)

En fin on trouve :

➤ **Equation de Poisson :**

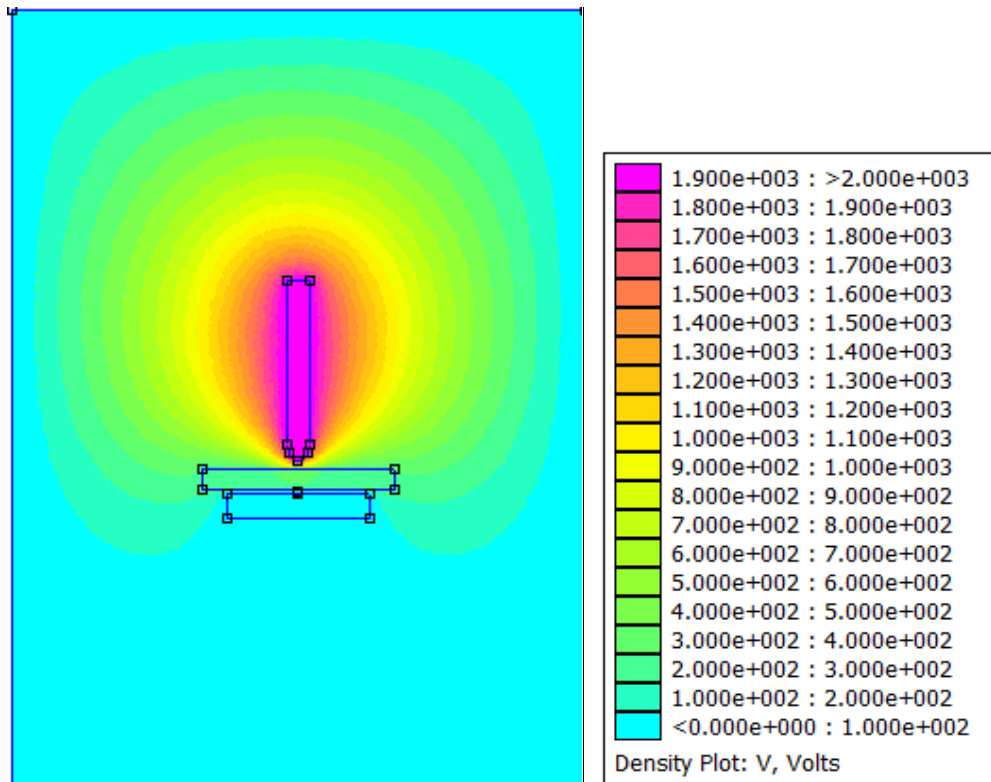
(III.7)

En absence de la charge d'espace :

➤ **Equation de Laplace :**

(III.8)

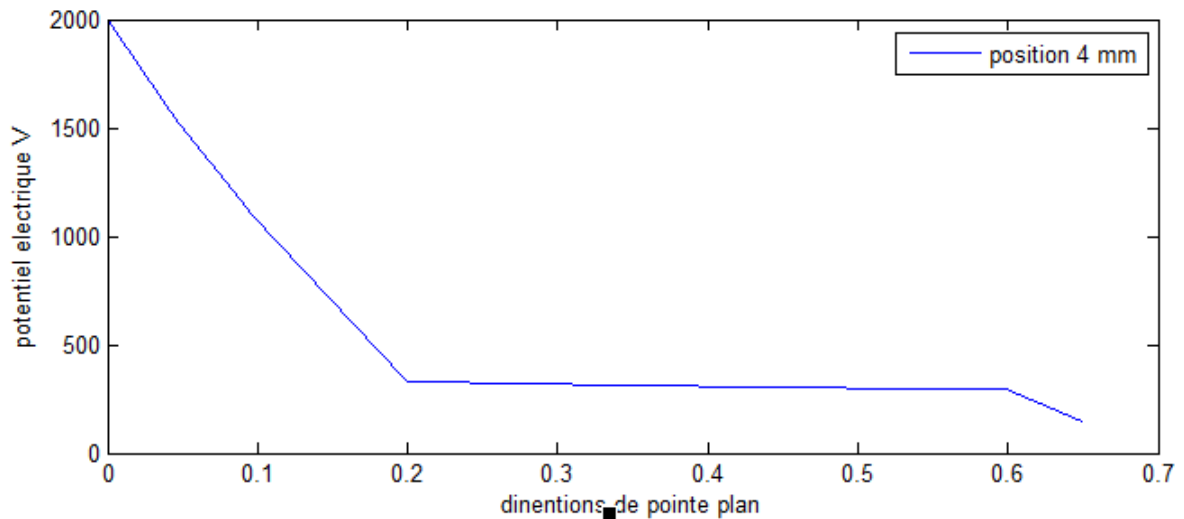
### III.7 Cartographie du potentiel électrique



**Figure.III.6 :** représente la cartographie de potentiel électrique

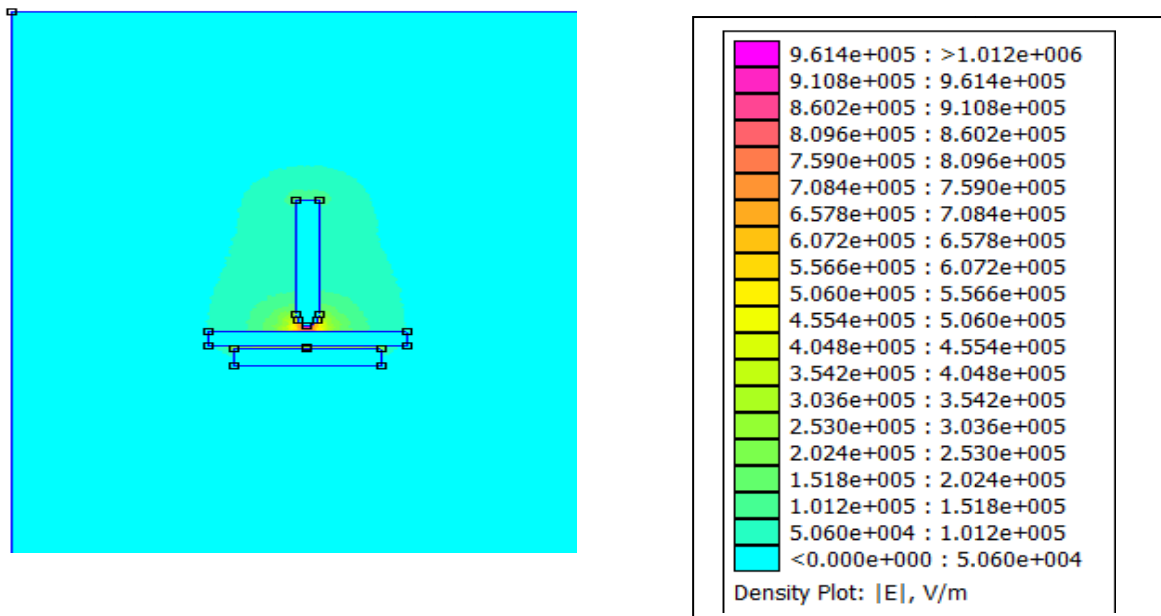
**III.7.1. Etude de l'évolution de potentiel électrique en fonction de dimension de la structure étudié :**

On remarque que quelque soit la valeur de l'épaisseur et la position de la barrière, la valeur du potentiel électrique reste la même. Elle est très importante au voisinage de l'électrode pointe 2000 volts, cette valeur diminue progressivement jusqu'à atteindre une valeur de 0 volts au tour de l'électrode plane.



**Fig.III.7.** Evolution de potentiel électrique en fonction de distance pointe-plan

**III.8 Cartographie du champ électrique**



**Figure.III.8 :** représente la cartographie du champ électrique

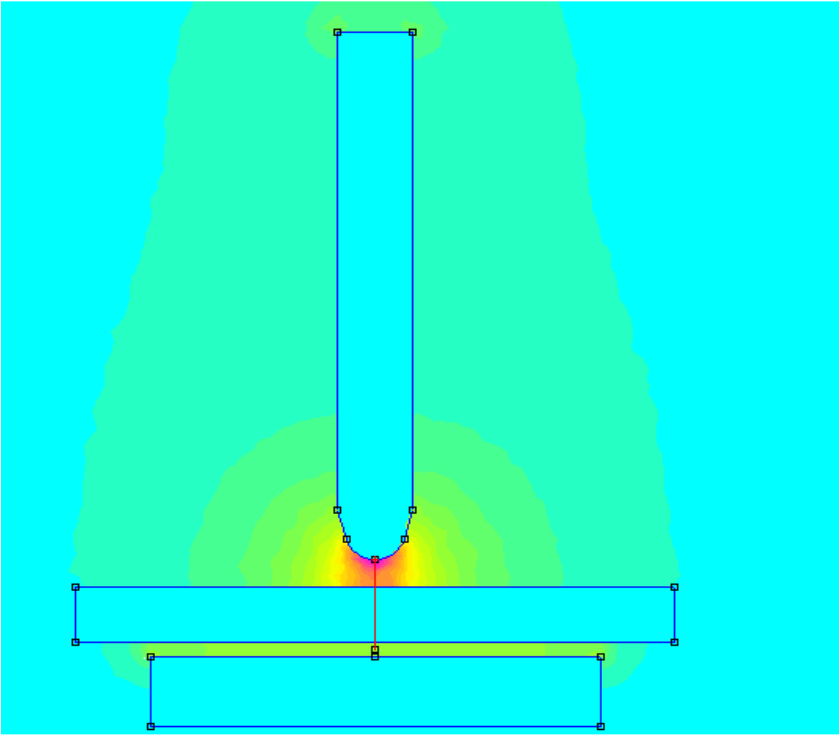


Fig.III.9. Représente le segment [AB]

III.9.Résultats et Interprétations

On remarque qu’au niveau de la pointe la valeur du champ est très imprtante au niveau de la pointe,

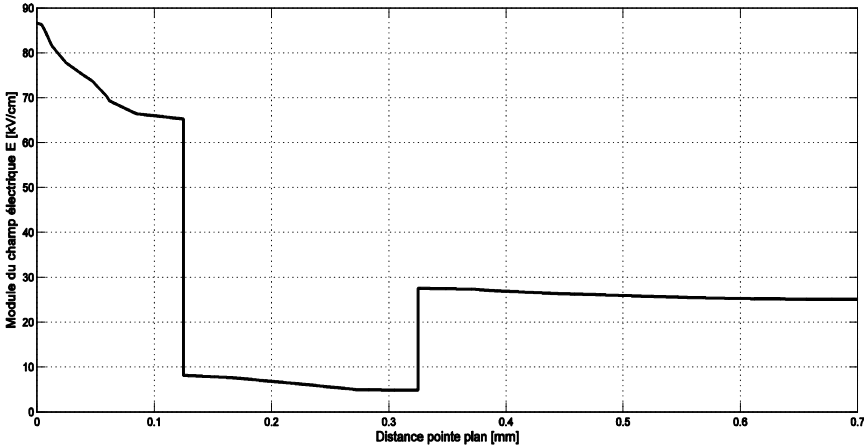


Fig.III.10.Evolution du champ électrique sur le segment [AB]

### III.9.2. Evolution du champ le long de l'arête supérieure et inférieure de la barrière

On remarque que la valeur du champ électrique sur l'arête supérieure est plus importante par rapport à l'arête inférieure. Cela s'explique par sa proximité de la pointe. On remarque aussi que le champ est maximal dans l'axe de la pointe. De plus, on relève une forte variation du champ due à la présence de la barrière.

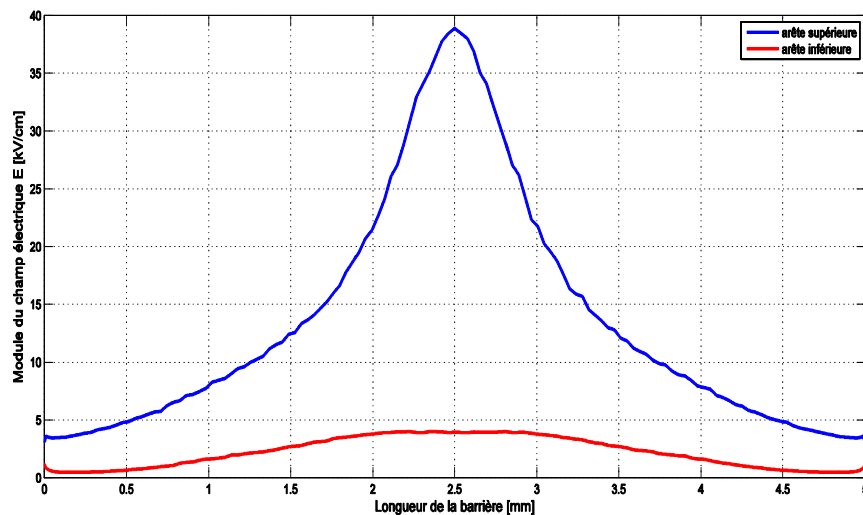


Fig.III.11. Evolution du champ électrique sur l'arête supérieure et inférieure

### III.9.3. Etude de l'influence de la permittivité diélectrique de la barrière

L'influence de la permittivité de la barrière sur le module du champ électrique au point milieu de l'arête basse de la barrière est illustrée par la figure ci-dessous. On remarque qu'au fur et à mesure que la permittivité augmente, le module du champ électrique diminue.

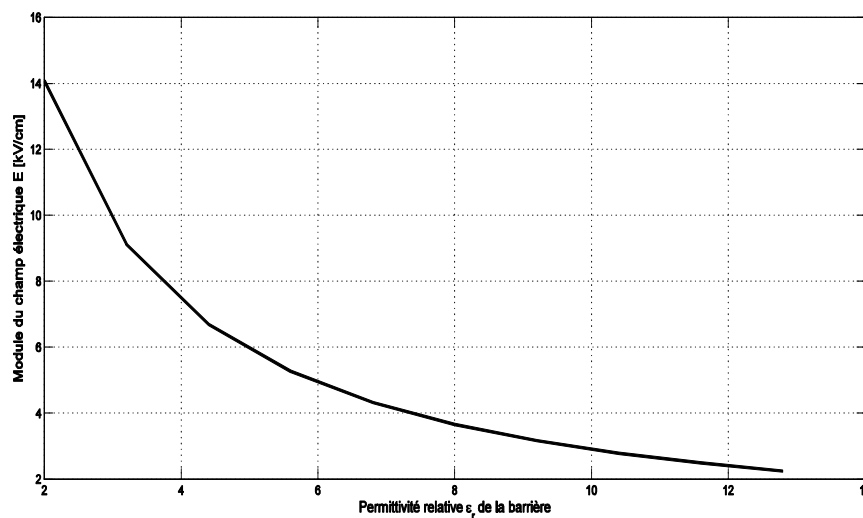


Fig.III.12. Etude de l'influence de la permittivité de la barrière

### III.9.4 Etude de l'influence de l'épaisseur de la barrière

Dans le présent cas, on s'intéresse à l'influence de l'épaisseur de la barrière sur le module du champ électrique au point milieu de l'arête basse de la barrière, pour une permittivité diélectrique de cette dernière constante (voir figure ci-dessous) en fixant la barrière à une même position.

On remarque que l'épaisseur de la barrière a une influence non négligeable sur la valeur du champ. Au fur et à mesure que l'épaisseur augmente, le module du champ électrique augmente.

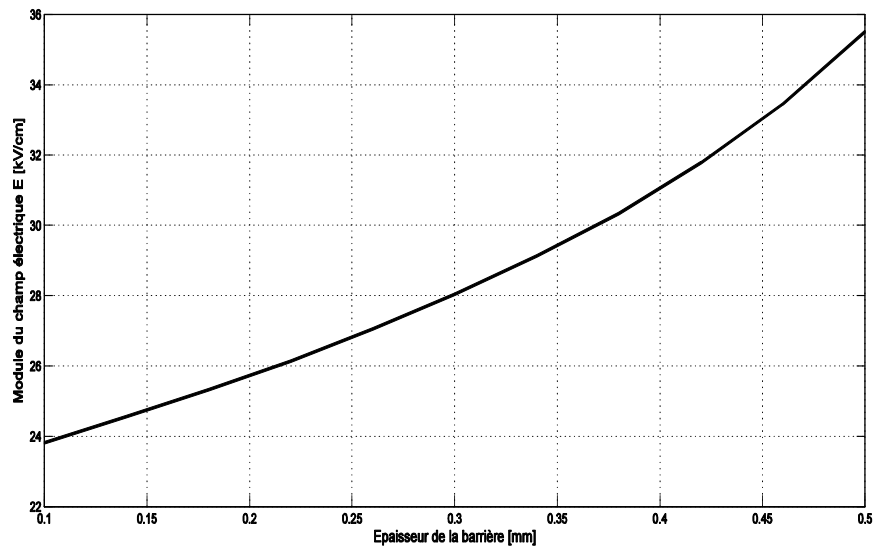


Fig.III.13. Etude de l'influence de l'épaisseur de la barrière

### III.9.5 Etude de l'influence de la position de la barrière

L'influence de la position de la barrière sur le module du champ électrique au point milieu de l'arête basse de la barrière est donnée par la figure ci-dessous. On remarque qu'au fur et à mesure que l'on s'approche de la pointe, le module du champ électrique augmente.

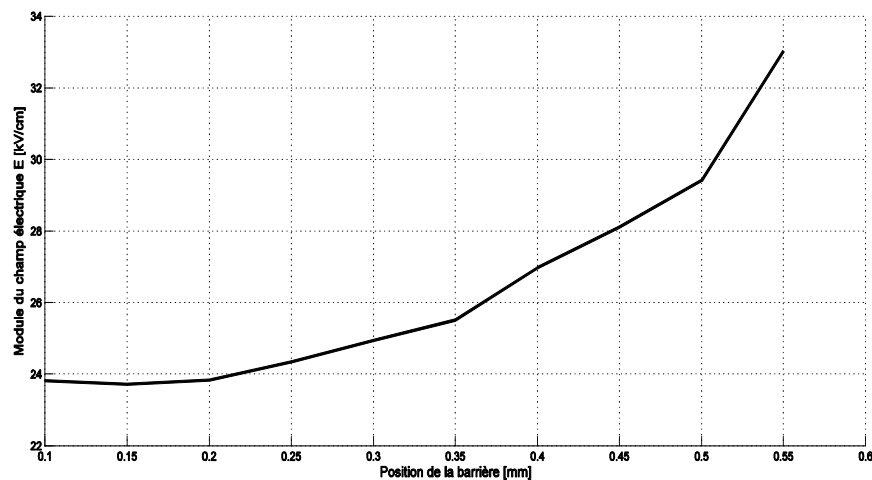


Fig.III.14. Etude de l'influence de la position de la barrière

### III.9.6 Etude de l'influence de la longueur de la barrière

L'influence de la longueur de la barrière sur le module du champ électrique au point milieu de l'arête basse de la barrière est donnée par la figure ci-dessous. On remarque qu'au fur et à mesure que la longueur augmente, le champ électrique au point milieu de l'arête inférieure de la barrière diminue pour finir par se stabiliser.

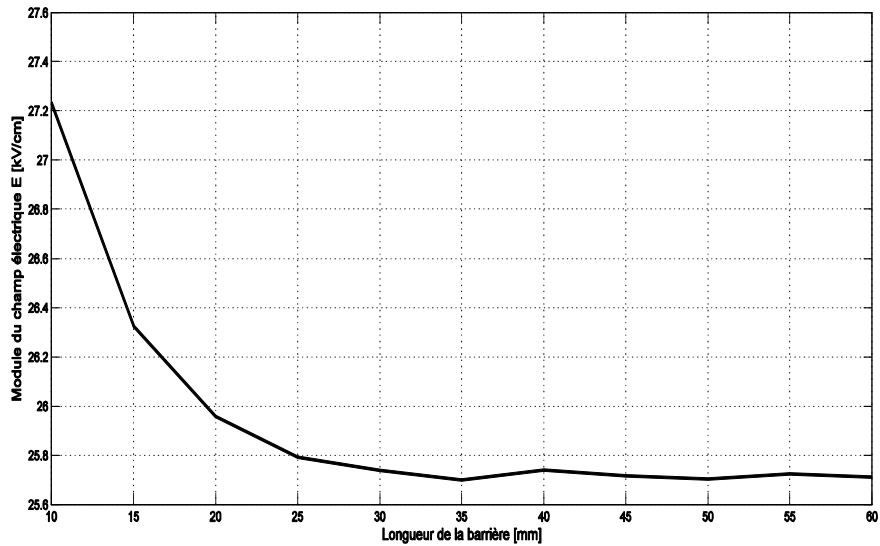


Fig.III.15. Etude de l'influence de la longueur de la barrière

## Conclusion générale

---

La recherche bibliographique répartie sur les deux premiers chapitres, nous a permis d'acquérir des connaissances sur les solides en général, ainsi que l'influence des barrières isolantes sur la répartition du champ dans les intervalles d'air.

Le but de ce travail était la détermination de la distribution du champ dans un intervalle pointe-barrière-plan. Nous avons fait l'étude pour une configuration 2-D.

Nous avons écrit les équations de Poisson et de Laplace pour le modèle simplifié ramené à deux dimensions.

La résolution a été effectuée en utilisant le logiciel Femm exploitant la méthode des éléments finis. Nous avons étudié l'influence des différents paramètres géométriques (position, épaisseur) ainsi que la permittivité diélectrique de la barrière sur la répartition du champ.

On remarque que :

- Au fur à mesure qu'on augmente la permittivité de la barrière le champ électrique diminue
- Au fur à mesure qu'on augmente l'épaisseur de la barrière le champ électrique augmente
- Au fur à mesure qu'on augmente la longueur de la barrière le champ électrique diminue
- Au fur à mesure qu'on augmente la position de la barrière le champ électrique augmente

- [1] A. Brahmia et A. Saci, « Etude de l'influence de la barrière isolante sur la rigidité diélectrique de l'air », Master académique, 2013
- [2] O. Hamdouche; «Modélisation numérique du transport du charges dans les diélectriques soumis à un champ électrique extérieur » Mémoire de magister, 2007
- [3] T. Brakat; «Intelligence en essaim, état de l'art et application dans les matériaux diélectrique», Mémoire de magister, Université de Batna, 2007
- [4] H. Omar; « Etude de l'influence de la charge d'espace sur le dynamiques des particules neutres » ; Mémoire de magister, Université Abou Bakr Belkaid Tlemcen, 2012
- [5] Mohamed Cherif Bouzidi; «Etude d'une décharge à barrière diélectrique (DBD) » ; Thèse de doctorat, Université de Toulouse 3 Poul Sabatier, 2013
- [6] E-H. Belhiteche; « étude de la dégradation d'un solide isolant soumis aux décharges électrique du surface » ; Mémoire de magister, UMMT, 2012
- [7] M. Boufeldja; « l'influence de la nature du matériau des parois sur la décomposition de l'ozone  $O_3$  dans une décharge couronne » Mémoire de magister, Université des sciences et de la technologie Mohammed Boudiaf Oran, 2009
- [8] M. Debit, « Etude des phénomènes de pré claquage a l'interface d'une isolation mixte solide/gaz » Mémoire de magister, UMMTO, 2012
- [9] M. Hairour ; « étude diélectrique d'une isolation hybride gaz/solide pour appareillage haute tension» Thèse de doctorat (Université de mont plier II) ,2007
- [10] H. Yala, « calcul numérique de champ électrique en géométrie fil-cylindre et fil plan lors de décharge couronne positive dans l'air » ; Mémoire de magister, U.A.Mira de Bejaia 2001.
- [11] A. Boubakeur ; « conception et simulation d'un réacteur fil cylindre a décharge couronne avec barrière diélectrique au traitement des oxydes d'azote dans des effluents marqués par un isotrope » Thèse de doctorat, U. Paris VI ,2012
- [12] S. Djedjiga, « Effet de la décharge couronne sur les surfaces isolantes et les surfaces métalliques », mémoire de magister en Electrotechnique, UMMT, 2011.
- [13] P. Panaget ; « étude en laboratoire des effets physico-chimique induit par les pertes électrique des lignes de transport a haute tension » ; thèse du doctorat de l'université pierre et marie curie, 1997
- [14] H. Kadi; « Influence de l'effet couronne sur les surtensions dans les lignes et les transformateur de haute tension » Mémoire de magister, UMMTO.

- [15] I. Ndiaye; «étude de décharge de surface sous tension alternative 50 HZ-effet sur une interface isolante air/solide», Thèse de doctorat d'état en électrotechnique, Université de Québec, 2007.
- [16] L. Khelloul, F. Meziane, «Influence d'une barrière diélectrique sur une décharge couronne en géométrie pointe-plan», mémoire d'ingénieur, UMMTO, 2006
- [17] F. Slimani; «étude de la configuration pointe plan en l'absence de charge d'espace avec FEMM», 2011
- [18] Anh Tho Vut Hi, « Etude de l'origine des décharges partielles sur des substrats céramiques enrobés », Thèse de Doctorat, Université de Grenoble, 2011.
- [19] M. L Coulibaly « Caractérisation des décharges électriques se propageant aux interfaces gaz/solide-relation entre propriétés des matériaux et démentions fractale » Ecole doctorale de Lyon ,2009
- [20] J-P. Salanne, « Contrôle du point de fonctionnement des décharges électriques par l'intermédiaire de leur alimentation. », thèse doctorat, polytechnique de Toulouse, 2005.