

*République Algérienne Démocratique et Populaire*

*Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique*

*Université Mouloud Mammeri de Tizi-Ouzou*

*Faculté de Génie Electrique et d'Informatique*

*Département d'électrotechnique*



# MÉMOIRE DE FIN D'ÉTUDES

*En vue de l'obtention du diplôme d'ingénieur d'état en électrotechnique*

*Option : Réseaux électriques*

*Thème :*

*Etude du courant de décharge*

*d'une isolation solide /air sous tension alternative*

*50Hz*

*Proposé et dirigé par :*

*M. M.A HANDALA*

*Réalisé par :*

*M. AKLI Sofiane*

*M<sup>lle</sup> SAHOULI Karima*

*Promotion 2010/2011*

## *Remerciements*

*Nous tenons à exprimer notre profonde gratitude et nos sincères remerciements à notre promoteur M. M.A. HANDHALA qui nous a orienté et soutenu et qui par sa collaboration effective et par ses judicieux conseils a rendu possible l'élaboration de ce travail.*

*D'une manière générale nous remercions les post - graduats leur accueil particulièrement : Melle KIRECHE N, M' BELHITECHE E.H*

*Nos remerciements les plus distingués vont également à tous ceux et toutes celles qui nous ont apporté l'aide de près ou de loin.*

*Notre reconnaissance va également à tous les enseignants qui ont contribué notre formation.*

*Que monsieur le président et les membres de jury trouvent ici l'expression de notre gratitude et de nos respect pour nous avoir fait honneur d'examiner ce modeste travail.*

# Dédicaces

## **A mes parents,**

Vous avez veillé sur moi depuis ma naissance jusqu' à aujourd'hui, vous m'avez assuré une vie digne ; vous avez manifesté beaucoup de sacrifices afin de me voir grandir devant vos yeux .Aujourd'hui, vient mon tour pour vous remercier en vous offrant ce travail qui est le fruit de vos sacrifices .Maman, papa je vous aime, je vous dois toute ma vie, je vous souhaite prospérité et parfaite santé.

## **A mes frères et mes sœurs**

J'apprécie beaucoup la grande affection que vous avez pour moi. A cette reconnaissance, je vous manifeste mon meilleur sentiment en vous offrant le fruit de mon travail, vous Samira, Mouloud, Amirouche, Nabil, Hassina, Younes : aucun mot n'est suffisant pour vous dire merci.

## **Je tiens aussi à dédier ce travail à :**

- La mémoire de mes grands parents.
- Mon petit ange Lina.
- Mon petit cœur Yacine.

## **A mes amis et mes proches**

Mes très chers proches qui m'ont beaucoup soutenue pendant toute ma formation, ils trouveront ici ma profonde gratitude.

A toute la famille SAHOULI et AMAROUCHE en général.

Mes dédicaces sont également adressées à tous mes amis(es) en général et tous ceux qui connaissent Karima.

A tous les étudiants de la promo sans exception

**SAHOULI Karima.**

# Dédicaces

**A mes parents,**

**A mes frères et mes sœurs**

**A mes amis et mes proches**

Mes très chers proches qui m'ont beaucoup soutenu pendant toute ma formation, ils trouveront ici ma profonde gratitude.

A toute la famille AKLI en général.

Mes dédicaces se sont également adressées à tous mes amis(es) ,surtout SLIMANE et MOULOUD, et tous ceux qui me connaissent.

A tous les étudiants de la promo sans exception

**AKLI Sofiane**

## Sommaire

<b>Introduction générale.....</b>	<b>8</b>
<b>Chapitre I .....</b>	<b>11</b>
<b>Étude bibliographiques .....</b>	<b>11</b>
<b>I.1. Introduction .....</b>	<b>12</b>
<b>I.2. Phénomènes de décharges dans les gaz .....</b>	<b>12</b>
<b>I.2.1 Caractéristiques courant – tension.....</b>	<b>13</b>
<b>I.2.1.1 Décharge non autonome sans multiplication électronique .....</b>	<b>14</b>
<b>I.2.1.2 Décharge non autonome avec multiplication électronique.....</b>	<b>14</b>
<b>I.2.1.3 Décharge autonome.....</b>	<b>19</b>
<b>I.2.2 Décharges en formes de canaux streamers: .....</b>	<b>22</b>
<b>I.2.3 Tenue diélectrique de l'air en champ uniforme .....</b>	<b>26</b>
<b>I.2.4 Tenue des gaz électronégatifs en champ uniforme .....</b>	<b>27</b>
<b>I.2.5. Influence de la géométrie des électrodes et de la forme de la tension.....</b>	<b>29</b>
<b>I.2.5.1 Tension continue .....</b>	<b>29</b>
<b>I.2.5.1. a. Polarité positive .....</b>	<b>29</b>
<b>I.2.5.1. b. Polarité négative.....</b>	<b>31</b>
<b>I.2.5.2 Tension impulsionnelle.....</b>	<b>32</b>
<b>I.2.5.3. Tension alternative .....</b>	<b>32</b>
<b>I.2.6 Influence de la pression du gaz .....</b>	<b>33</b>
<b>I.2.6 Facteurs influençant la tenue diélectrique du gaz .....</b>	<b>34</b>
<b>I.2.6.1 Facteurs influençant la tenue diélectrique de N2 .....</b>	<b>34</b>
<b>I.3. Phénomènes d'interface.....</b>	<b>35</b>
<b>I.3.1 Influence du taux d'ionisation effectif .....</b>	<b>35</b>
<b>I.3.2 Charges surfaciques.....</b>	<b>36</b>
<b>I.3.2.1 Génération de charges surfaciques .....</b>	<b>37</b>
<b>I.3.2.2. Accumulation de charges surfaciques .....</b>	<b>42</b>
<b>I.3.2.3 Charges surfaciques et champ électrique .....</b>	<b>42</b>
<b>I.3.3. Distorsion du champ électrique .....</b>	<b>43</b>
<b>I.3.4. Influence d'une surface diélectrique sur l'initiation et la propagation des streamers</b>	<b>47</b>
<b>I.3.5 Caractérisation optique des décharges glissantes .....</b>	<b>49</b>

I.3.6 Analyse fractale des décharges glissantes .....	52
I.4. Conclusion.....	53
Chapitre II.....	54
Montage expérimental.....	54
II.1. Introduction.....	55
II.2. Source haute tension .....	55
II.3. Choix du Systèmes d'électrodes.....	56
II.4. Choix du matériau isolant solide .....	61
II.4.1. Introduction .....	61
II.4. 2. Isolant solide.....	62
II.4.2.1. Types des isolants.....	62
II.4.2.2. Matériaux utilisés comme isolants solides [2], [12], [13] .....	63
II.4.2.2.a. Produit naturel.....	63
II.4.2.2.b. Isolants solides fabriqués .....	63
II.4. 3. Phénomènes de polarisation des isolants solides.....	64
II.4.4. Mécanisme de claquage des isolants solides .....	66
II.4.5.Claquage du à d'autres phénomènes .....	66
II4.5.1. Décharges partielles.....	67
II.4.5.2 Charge d'espace.....	67
II.4.6. Les polymères isolants .....	67
II.4.6.1.Définition.....	68
II.4.6.2 Polymérisation [17].....	68
II.4.6.3 Quelques caractéristiques des polymères .....	70
II.4.6.4. Les propriétés des polymères: .....	70
II.4.6.4.1. Résistivité.....	70
II.4.6.4.2. Rigidité électrique .....	71
II.4.6.4.3.Pertes diélectriques [8] .....	71
II.4.7. Le PMMA.....	72
II.4.8. Caractéristiques principales du PMMA.....	72
II. 5. Grandeurs mesurées et appareils de mesures.....	73
II.5.1. L'oscilloscope à mémoire .....	74
II.6. Montage expérimentale.....	74
II.7. Essais préliminaires .....	77

Conclusion.....	78
Chapitre III.....	79
Résultats expérimentaux .....	79
et interprétation .....	79
III.1. Introduction .....	80
III.2. formes des impulsions du courant de décharge.....	80
a) Essai préliminaire.....	80
b) Forme du courant.....	80
III.2.1. Forme du courant associé en polarité positive .....	81
III.2.2. Forme du courant associé en polarité négative .....	82
III.2.3. Interprétation des résultats .....	83
III.3. Influence du vieillissement sur le courant de décharge .....	85
III.4. Influence de l'épaisseur de la couche d'air sur le courant maximum de décharge .....	89
III.4.1. Interprétation du résultat.....	90
III.5. Influence de la tension appliquée sur le courant maximum de décharge.....	90
III.6. Influence de l'épaisseur et de la tension appliquée de l'isolant sur le courant maximum de décharge .....	91
III.7. Influence de l'épaisseur d'air et l'épaisseur du PMMA sur le courant de décharge.....	93
III.8. Conclusion.....	95
Conclusion générale .....	96
Annexe .....	101

---

# **Introduction générale**

---

Les structures isolantes mixtes solide/gaz sont présentes dans de nombreux appareillages à haute et moyenne tensions comme les transformateurs et condensateurs de puissance, les disjoncteurs et les câbles ainsi que dans les réseaux de transport et de distribution d'énergie électrique (isolateurs de support et de traversée). Dans certains composants, comme les disjoncteurs isolés au gaz, par exemple, les isolants solides sont utilisés comme enveloppe de l'appareil et comme support (buse) pour les électrodes (contacts); le gaz est utilisé pour ses propriétés isolantes et pour le soufflage de l'arc. Dans le cas des transformateurs de puissance, en plus de l'isolation des bobinages et des traversées, les solides servent comme panneaux (rôle mécanique) et comme barrière isolante en particulier dans les transformateurs cuirassés.

Durant leur exploitation, les équipements électriques et donc les structures isolantes mixtes qui y sont intégrées, sont exposés à différents types de contraintes : mécanique, thermique, électrique, chimique et environnementales. Dans cette étude, nous nous intéressons plus particulièrement aux contraintes électriques. En présence d'un champ électrique, divers phénomènes peuvent prendre naissance dans le volume ou à la surface des matériaux constituant l'isolation hybride. En effet, au-dessus d'une certaine valeur dite de seuil du champ électrique, des décharges volumiques ou surfaciques peuvent prendre naissance et se développer jusqu'à la rupture diélectrique (en volume) ou au contournement de l'isolateur conduisant ainsi à la destruction de la structure isolante voire à la mise hors service du système. La compréhension des mécanismes impliqués dans la génération et la propagation de ces décharges ainsi que leur caractérisation sont fondamentales pour la conception et le dimensionnement des appareillages.

Parmi les contraintes électriques -une fois le champ de seuil est atteint- le courant de pré-claquage, est un facteur fondamental qui provoque le vieillissement de l'isolant électrique et son claquage.

Dans cette étude nous étudions les courants associés aux décharges électrique dans une isolation mixte (air /solide) sous tension alternative 50Hz, et pour cela nous allons varier la couche d'air ainsi que la durée de décharge.

Le présent mémoire comporte trois chapitres. Dans le premier chapitre, nous décrivons dans un premier temps les phénomènes de décharges dans les gaz puis nous abordons les phénomènes d'interface (air/solide).

Le deuxième chapitre est consacré à la présentation de dispositif expérimental utilisé pour étudier les décharges surfacique à l'interface solide /air ainsi qu'a l'enregistrement des courant de décharge à l'aide d'un oscilloscope à mémoire, les propriétés fondamentales de l'isolant solide utilisé sont également présentées (structure et propriétés principales)

Dans le troisième chapitre nous présentons et analysons les résultats expérimentaux de mesure des courants de décharge enregistrés à l'aide d'un oscilloscope à mémoire pour une configuration d'électrode pointe – plan. L'influence de divers paramètres sur les courants associés aux décharges sont traitées.

Enfin, l'étude sera close par une conclusion générale sous forme de synthèse globale sur le travaille réalisé.

---

# Chapitre I

## Étude bibliographiques

---

## I.1. Introduction

Les systèmes d'isolation mixtes (ou hybrides), composés d'un diélectrique solide et d'un gaz, sont largement utilisés dans les équipements haute et moyenne tensions.

La rigidité diélectrique de ces structures dépend des propriétés du solide isolant et du type de gaz ainsi que de la pression et de la température de ce dernier. Le comportement de ces structures isolantes, face aux différentes contraintes auxquelles elles sont exposées et plus particulièrement aux décharges qui peuvent se développer dans le volume ou à l'interface des deux matériaux (solide et gaz), constitue l'un des principaux critères de dimensionnement et de conception d'une structure isolante pour un composant ou un système haute ou moyenne tensions donné. Par conséquent, la compréhension des mécanismes responsables de l'initiation et du développement des décharges en volume ou à l'interface et conduisant respectivement au claquage ou au contournement de ces structures isolantes passe par la compréhension des phénomènes se produisant dans chacun des constituants (solide et gaz).

Dans ce chapitre, nous abordons les aspects fondamentaux relatifs au comportement diélectrique de la structure mixte solide/air. Nous nous intéresserons dans un premier temps aux phénomènes de décharges dans les gaz. Bien que ces phénomènes soient étudiés depuis pratiquement deux siècles et que de nombreuses avancées soient faites ces dernières années, en particulier sur la phase d'ionisation, ils restent l'objet de nombreuses études à cause de leur complexité. Puis on passe les phénomènes d'interface gaz/solide.

## I.2. Phénomènes de décharges dans les gaz

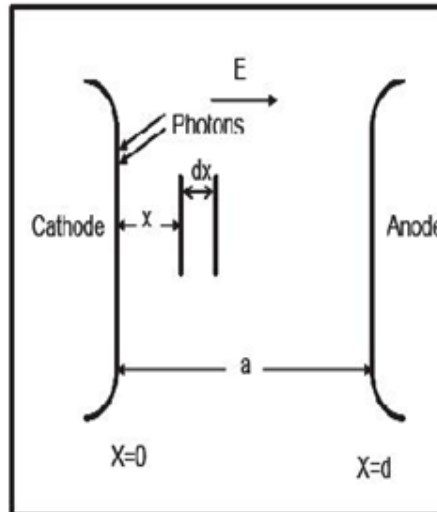
Le gaz le plus abondant et le plus utilisé de tout temps dans l'isolation électrique (lignes aériennes, électrostatique...) est l'air. Cependant, d'autres gaz tels que l'azote ( $N_2$ ), le dioxyde de carbone ( $CO_2$ ) et surtout l'hexafluorure de soufre ( $SF_6$ ) connaissent, depuis plus de trois décennies, un succès grandissant dans le domaine des systèmes haute tension (postes blindés, câbles à isolation gazeuse, ...). Leur utilisation a permis d'améliorer la fiabilité des systèmes et d'en réduire leurs poids et dimensions.

Sous l'effet d'agents ionisants naturels ou artificiels, les gaz peuvent perdre leurs propriétés diélectriques et devenir plus ou moins conducteurs. Cette perte de propriétés (ionisation) se traduit par la dissociation de molécules neutres en électrons et en ions. En présence d'un champ électrique entre les électrodes (planes et parallèles) le mouvement provoqué par les porteurs de charges donne naissance à un courant dit « courant de décharge ». La variation de ce courant en fonction de la tension donne la caractéristique courant – tension) qui a été étudiée pour la 1<sup>ère</sup> fois par Townsend.

En l'absence de champ électrique, il existe un équilibre dans lequel le taux de production d'électrons et d'ions positifs est compensé. Il convient toutefois de noter que la présence d'un champ dans l'espace inter électrode peut donner lieu, selon le niveau de tension appliquée aux électrodes, à une décharge de type non autonome ou autonome.

### I.2.1 Caractéristiques courant – tension

La variation du courant de décharges en fonction de la tension appliquée à un intervalle de gaz compris entre deux électrodes planes et parallèles (Figure 1.1) est représentée sur la Figure 1.2. Cette caractéristique  $I(V)$  comporte différentes zones correspondant chacune à un régime de décharges donné.



**Figure I.1** Système d'électrodes plan-plan permettant d'étudier la décharge dans un gaz [2]

#### I.2.1.1 Décharge non autonome sans multiplication électronique

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

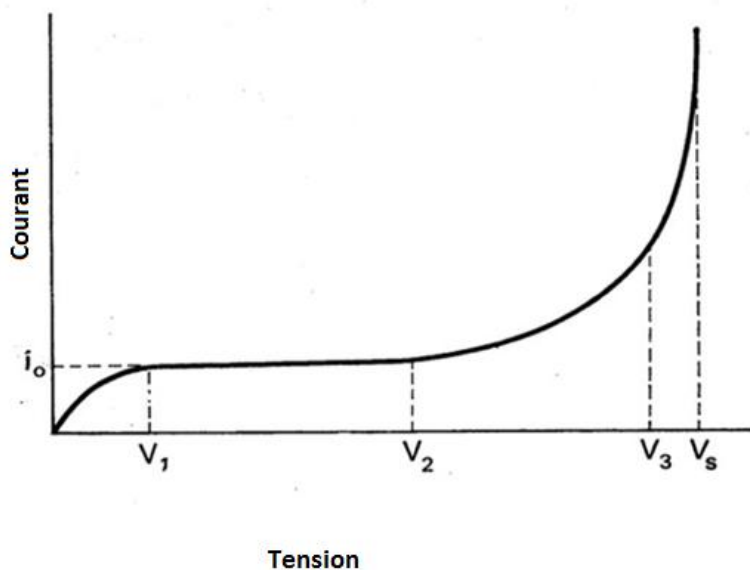
#### I.2.1.2 Décharge non autonome avec multiplication électronique

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

Cette croissance rapide du courant résulte de la multiplication électronique. Lorsque le champ électrique  $E$  augmente, les électrons émis par la cathode (électrons primaires), sous l'effet d'un rayonnement quelconque, sont de plus en plus accélérés. Certains gagnent ainsi une énergie suffisante pour ioniser par collisions des particules neutres, donnant naissance à

des ions positifs et à de nouveaux électrons. Chaque électron nouvellement créé contribue à son tour par ionisation, au cours de son déplacement vers l'anode, à la création d'une avalanche électronique véritable. Par la même, le nombre d'ions positifs augmente aussi. Le nombre de collisions est d'autant plus important que E est intense. Il est caractérisé par un coefficient (ou pouvoir) d'ionisation  $\alpha$  appelé "premier coefficient d'ionisation de Townsend".

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



**Figure I.2** Caractéristiques courant – tension pour différents régimes de la décharge sous tension continue [1]

Si  $N_0$  est le nombre d'électrons émis par la cathode par unité de temps et  $N_x$  le nombre d'électrons traversant le plan d'abscisse  $x$  par unité de temps et  $a$  la distance inter électrodes, l'augmentation de ce nombre sous l'effet de chocs ionisants sur un parcours  $dx$ , en admettant  $a$  constant, s'écrira :

$$dN_x = N_x \alpha dx \quad (I. 1)$$

Sachant que l'origine des abscisses se trouve à la cathode :

$$N_x (X = 0) = N_0 \quad (I.2)$$

D'où

$$N_x = N_0 e^{\alpha x} \quad (I.3)$$

Si  $a$  est la distance inter électrode, le nombre d'électrons  $N_a$  arrivant sur l'anode est :

$$N_d = N_0 e^{\alpha d} \quad (I.4)$$

Et le courant par unité de temps :

$$I = eN_d = eN_0 e^{\alpha d} \quad (I.5)$$

Ou encore :

$$I = I_0 e^{\alpha d} \quad (I.6)$$

Avec :

$I_0 = e N_0$ , le courant émis par la cathode sous l'effet du rayonnement extérieur.

$e$  étant la charge élémentaire d'un électron ( $-1,6 \cdot 10^{-19}$  coulomb).

Le coefficient d'ionisation  $\alpha$  dépend de l'état dans lequel se trouve le gaz ainsi que de l'énergie des électrons. En d'autres termes,  $\alpha$  dépend de l'intensité du champ électrique  $E$ , l'état du gaz étant déterminé par sa pression et sa température qui restent pratiquement constantes lors de l'ionisation par les électrons car le transfert d'énergie vers le gaz est trop faible. Comme la densité du gaz est proportionnelle à la pression  $p$ ,  $\alpha$  ne dépendra finalement que de  $E$  et  $p$ . Si  $n$  est le nombre moyen de collisions entre les électrons, le potentiel moyen acquis par les électrons sur le parcours ( $n \cdot \lambda$ ), correspondant à la vitesse moyenne de l'électron dans le gaz sous un champ électrique  $E$  est :

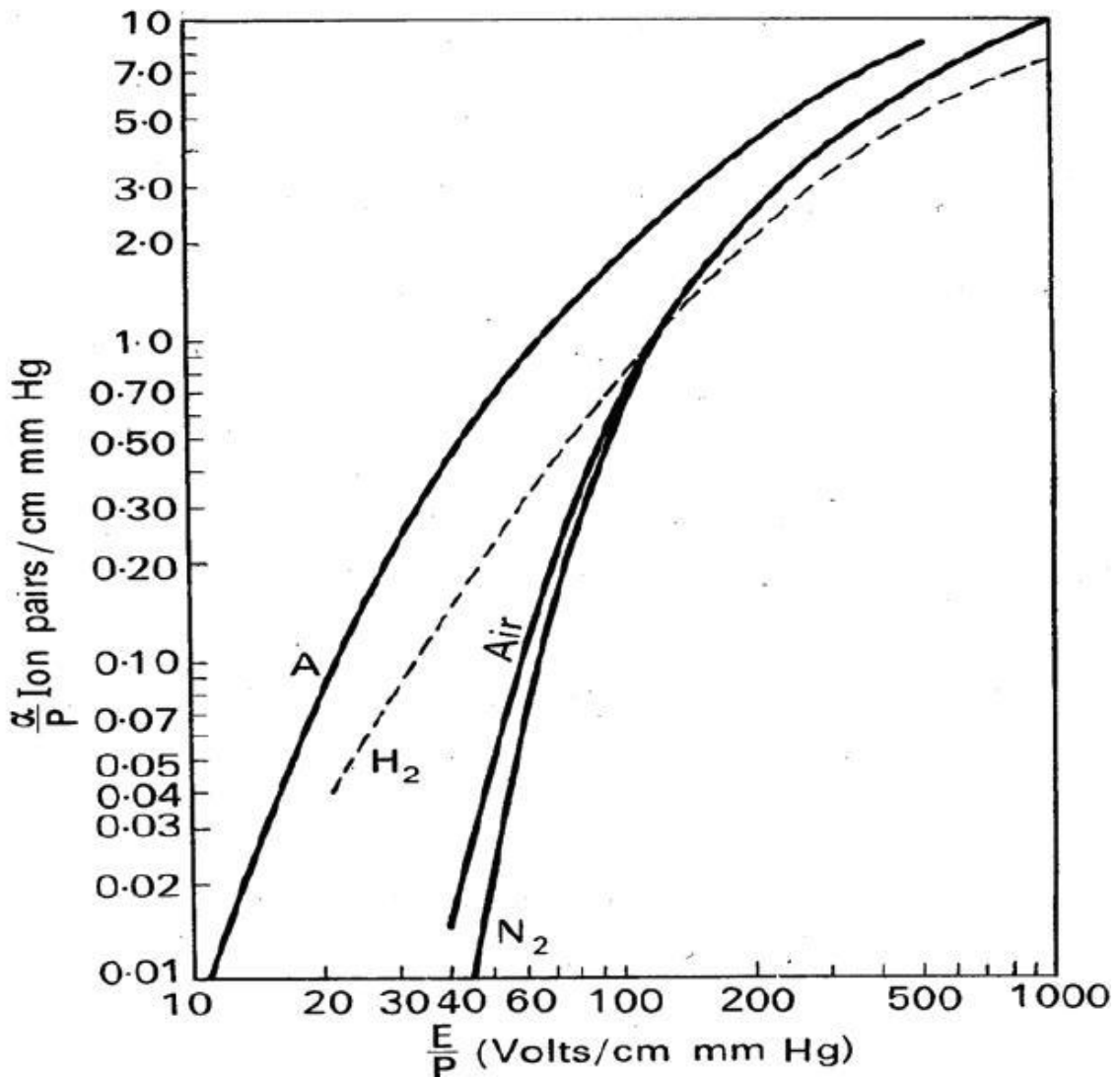
$$\alpha = p f(E \lambda) = p f\left(\frac{E}{A p}\right) \quad (I.7)$$

ou encore

$$\frac{\alpha}{p} = f\left(\frac{E}{A p}\right)$$

(I.8)

$f$  étant une fonction inconnue. Il n'existe pas de fonction analytique unique décrivant entièrement la courbe  $f$ . La figure I.3 donne la forme de la fonction  $\alpha/p = f(E/p)$  pour quelques gaz.



**Figure I.3 :** Variation du coefficient d'ionisation ( $\alpha/p$ ) en fonction de ( $E/p$ ) pour N<sub>2</sub>, Air, H<sub>2</sub> et un gaz A [1]

Cependant, une forme analytique approchée de la fonction  $f$  a été proposée par Townsend. Celle-ci, déterminée expérimentalement, n'est valable que dans un domaine limité de la quantité ( $E/p$ ). On aura :

Pour 
$$\frac{\alpha}{P} = A \exp\left(\frac{-B/E}{P}\right) \quad (I.9)$$

$$100 < \frac{E}{P} < 800 \text{ V}/(\text{cm.mmHg}^{-1})$$

A et B sont des constantes spécifiques du gaz considéré. Dans le cas de l'air, A et B valent respectivement 15 et 365. En outre, la relation (1.6) permet d'écrire la relation (I.10) :

$$\ln(I) = \ln(I_0) + \alpha \cdot a \quad (I.10)$$

Les courbes logarithmiques du courant en fonction de la distance inter électrodes sont des droites de pentes  $\alpha$  comme illustré par la Figure 1.4. Cette variation a été vérifiée expérimentalement par Von Engel pour des faibles valeurs de  $(E/p)$  et de distance inter électrodes, tout en maintenant  $\alpha$  constant. Lorsque  $(E/p)$  et  $a$  dépassent un certain seuil, d'autres phénomènes interviennent

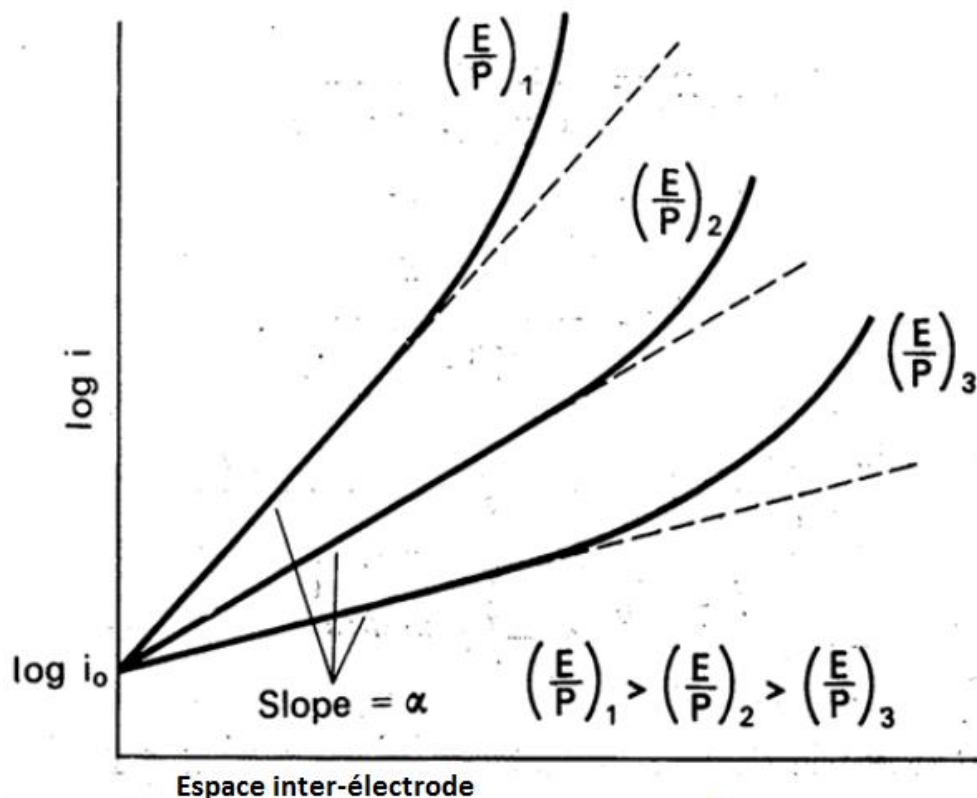


Figure 1.4 Variation du courant en fonction de la distance inter-électrode

### I.2.1.3 Décharge autonome

Si  $(e^{\alpha a})$  est le nombre d'électrons libres produits par un électron dans une avalanche de longueur  $a$ ,  $(e^{\alpha a} - 1)$  est le nombre d'ions positifs produits simultanément. Le nombre d'électrons émis par la cathode ( $N_c$ ) vers l'anode dans l'intervalle inter électrode donnent naissance à  $[N_c (e^{\alpha a} - 1)]$  ions positifs, qui en bombardant à leurs tours la cathode, libèrent  $[N_c (e^{\alpha a} - 1) \gamma]$  électrons supplémentaires en faisant intervenir un nouveau coefficient d'ionisation  $\gamma$ . Celui-ci est le "deuxième coefficient d'ionisation de Townsend" représentant le rapport entre le nombre d'électrons libérés à partir de la cathode et le nombre d'ions positifs qui tombent sur la cathode. La décharge dans ce cas est dite décharge autonome. La condition de décharge autonome pour un gaz donné à température constante est:

$$\gamma(e^{\alpha a} - 1) > 1 \quad (\text{I.11})$$

ou encore

$$\alpha a > \ln\left(1 + \frac{1}{\gamma}\right) \quad (\text{I.12})$$

Dans ce cas, la décharge est autonome.

La tension d'initiation de cette décharge  $U_d$  est déterminée à partir de l'expression:

$$\alpha a = \ln\left(1 + \frac{1}{\gamma}\right) \quad (\text{I.13})$$

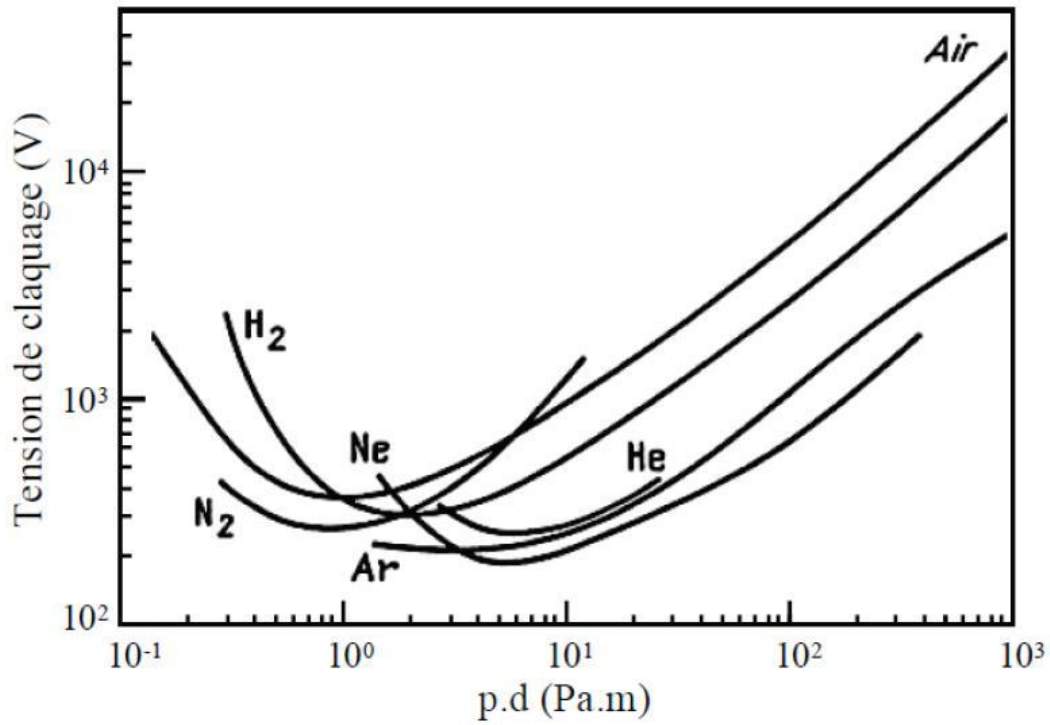
En admettant que la décharge autonome apparaît à  $U = U_d$  (avec  $U = E a$ ), les équations (I.9) et (I.13) nous donnent la condition de décharge autonome pour un gaz donné à une température constante :

$$U_d = \frac{B p a}{\ln(A p a / \ln(1 + (1/\gamma)))} \quad (\text{I.14})$$

Si le champ électrique n'est pas perturbé par des charges d'espace, la tension d'apparition de la décharge autonome dépendra uniquement du produit (p.a) :

$$U_d = f(p a) \quad (I.15)$$

Cette variation de la tension en fonction du produit de la pression et de la distance inter électrodes est appelée **loi de Paschen** plus connue expérimentalement par les courbes dites de Paschen. La figure I.5 donne les courbes de Paschen pour le N<sub>2</sub>, Air, H<sub>2</sub>, He, Ne et Ar [3]. Cette loi de Paschen s'explique par le fait que pour une distance inter électrodes donnée en champ uniforme et à très faible pression (présence d'un nombre très limité de molécules), l'avalanche ionisante est limitée entraînant une tension disruptive relativement élevée. Dans le cas des pressions élevées, la grande densité du gaz fait que le libre parcours moyen des particules ionisantes ne soit plus suffisante pour déclencher facilement une avalanche. Comme on peut le remarquer, ces courbes ont toutes la même allure et possèdent un minimum correspondant à une valeur particulière du produit (p.a) min. Dans l'air par exemple, ce minimum vaut environ 350 Volts pour une valeur de (p a)<sub>min.</sub> = 66,7 Pa.cm ; ce qui signifie qu'en dessous de 350 Volts, il ne peut y avoir d'amorçage dans l'air.



**Figure 1.5** Courbe de Paschen pour différents gaz [3]

Le tableau I.1 donne quelques valeurs du minimum de Paschen pour certains gaz en fonction du produit  $(p \cdot a)_{\min}$  et de la nature du matériau constituant le métal cathodique.

**Tableau 1.1** Minimum de Paschen en fonction du gaz et du métal de la cathode

Matériaux		Minimum de Paschen	
Gaz	Cathode	$(U_d)_{\min}$ (V)	$(p \cdot d)_{\min}$ (mm.Hg.cm)

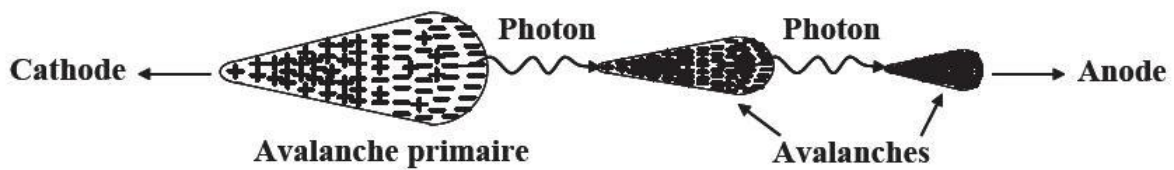
Air	Fe	330	0,57
N2	Fe	275	0,75
O2	Pt	295	1,25
H2	Fe	450	0,70
Hg	Fe	520	2

Notons toute fois qu'il est également possible d'appliquer le mécanisme de Townsend à des configurations d'électrodes donnant lieu à un champ quasi uniforme comme les systèmes cylindre - cylindre (concentriques ou excentriques) ou sphère - sphère concentriques avec un faible intervalle par rapport aux rayons des électrodes. Cependant, le coefficient d'ionisation  $\alpha$  étant dépendant de  $E$ , lequel est fonction de la position  $x$  dans l'intervalle inter électrode, la condition de décharge autonome doit tenir compte de ce fait car la présence de charges d'espace et la géométrie des électrodes rendent difficile l'application de la condition de décharge autonome dans le cas des champs non uniformes. Le champ correspondant à la tension  $U_d$  peut s'avérer insuffisant pour maintenir l'ionisation par collisions. Dans ce cas, la tension nécessaire pour qu'il y ait claquage de l'intervalle de gaz ( $U_c$ ), doit être supérieure à  $U_d$  ( $U_c > U_d$ ). [2]

### I.2.2 Décharges en formes de 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. 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.

Pour expliquer le mécanisme de développement des décharges dans les grands intervalles, L. B. Loeb et J. M. Meek [4] 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 1.6). Selon ce modèle, la décharge se développe sous forme d'un canal très conducteur appelé streamer (canal de plasma).



**Figure I.6** Schéma de développement de la décharge par avalanches photo ionisantes

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

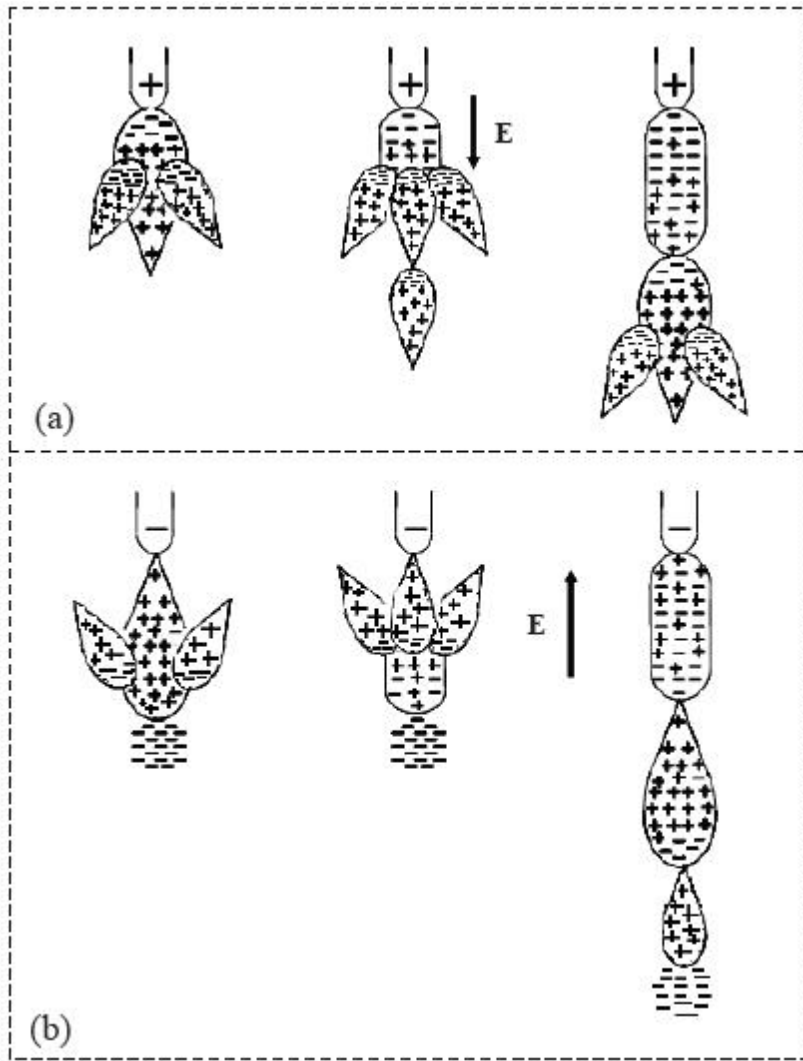
première. Ces avalanches secondaires jouent le rôle de facteur d'entretien de la décharge (qui devient autonome) et d'amplification du nombre de porteurs de charges libres.

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.

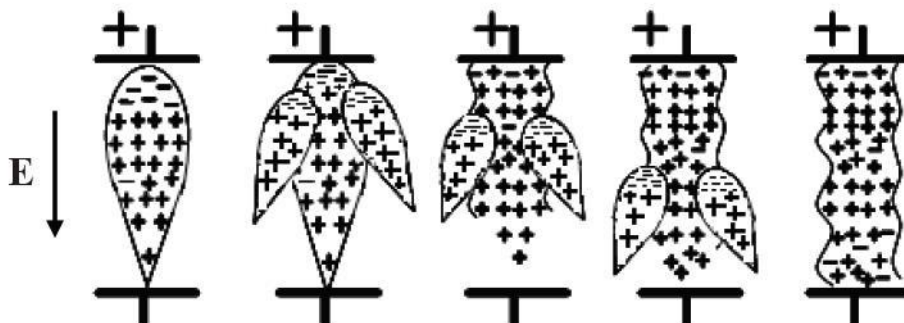
D'autre part, lors de collisions élastiques avec les particules de gaz, les charges leurs transmettent une partie de leurs énergies cinétiques. Il en résulte une augmentation de la température du gaz. Tant que celle-ci est inférieure à celle nécessaire à l'ionisation thermique, elle n'aura aucune influence 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 ( $> 1$  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 I.7 à I.9 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).



**Figure I.7** Etapes successives de développement d'un streamer dans un gaz en configuration d'électrodes pointe - plan : (a) pointe positive ; (b) pointe négative



**Figure 1.8** Etapes de développement d'un streamer positif en champ uniforme [2]

### I.2.3 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 I.2 [5] donne la rigidité diélectrique de quelques gaz en comparaison avec l'air sous champ uniforme à pression atmosphérique pour une distance inter électrode  $d_s = 1$  cm.

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 ;

Symbole	Masse (g)	Masse volumique à 0 °C (kg/m <sup>3</sup> )	Température de fusion (°C)	Température d'ébullition (°C)	Conductivité thermique à 0 °C (en 10 <sup>-3</sup> W/m · K)	Rigidité diélectrique
Air.....	28,96	1,292 9	.....	.....	23,547	1
O <sub>2</sub> .....	31,999	1,429	- 218,4	- 182,962	23,965	0,91
CO <sub>2</sub> .....	44	1,977	- 56,6 (5,2 bar)	- 78,6	14,101	0,75
N <sub>2</sub> .....	28,013	1,251	- 203,8	- 195,8	23,530	1
H <sub>2</sub> .....	2,016	0,089 9	- 259,14	- 252,8	169,565	0,45
CCl <sub>3</sub> F <sub>3</sub> .....	104,46	.....	- 181	- 81,1	34,6 (liquide)	1,7
CCl <sub>2</sub> F <sub>2</sub> .....	120,91	1,4 (à 57 °C)	- 158	- 29,79	73	2,4
CH <sub>3</sub> F <sub>3</sub> .....	70,01	1,52 (à - 100 °C)	- 160	- 82,2	13,8 (liquide)	1,06
CCl <sub>3</sub> F.....	137,37	1,467 (à 25 °C)	- 111	+ 23,82	8,374	4
CH <sub>4</sub> .....	16,04	0,554 7	- 182	- 164	29,76	1
CF <sub>4</sub> .....	87,99	3,034	- 150	- 129	69,16(liquide)	1,25
N <sub>2</sub> O.....	44,01	1,977	- 90,8	- 88,5	14,67	1,14
C <sub>3</sub> F <sub>16</sub> O.....	416	.....	- 113	+ 101 à + 104	.....	> 5 à 60 °C et 0,8 bar
C <sub>3</sub> F <sub>8</sub> .....	188,02	.....	- 183	- 36	16	2,2
c-C <sub>4</sub> F <sub>8</sub> .....	200,04	.....	- 38,7	- 4	.....	3,5
SF <sub>6</sub> .....	146,05	6,502	- 50,5	- 63,8	140,68	2,5
C <sub>2</sub> F <sub>6</sub> .....	138,01	1,59 (à - 78 °C)	- 100,6	- 79	16,96	1,6
C <sub>2</sub> Cl <sub>2</sub> F <sub>5</sub> .....	154,48	.....	- 106	- 38,7	13,9	2,8
C <sub>2</sub> Cl <sub>2</sub> F <sub>4</sub> .....	170,92	1,455	- 94	+ 3,6	11,56	2,8
C <sub>4</sub> F <sub>8</sub> .....	200,04	1,529 7	- 129	- 3	.....	4,5
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 I.2** Rigidité diélectrique relative de quelques gaz par rapport à l'air dans un champ uniforme [5] La rigidité

La rigidité diélectrique dans les conditions réelles dépend de plusieurs paramètres :  
 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 [6].

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

#### I.2.4 Tenue des gaz électronégatifs en champ uniforme

Comme pour les autres gaz, les mécanismes de décharge et de rupture diélectrique dans les gaz électronégatifs dépendent de l'intervalle inter électrodes : mécanisme de Townsend pour les faibles intervalles et mécanisme de streamers – leader pour les grands intervalles.

**Faibles distances** : La condition de décharges autonomes selon le mécanisme de Townsend est donnée par :

$$\gamma \cdot \int_0^a \exp \left[ \int_0^x (\alpha - \eta) dx \right] \alpha dx = 1 \quad (I.16)$$

$\gamma$  étant le 2ème coefficient de Townsend (coefficient d'émission de surface) pris dans notre cas comme  $\beta$ .

Pour un champ uniforme on aura :

$$\frac{\gamma}{\alpha - \eta} \left[ e^{(\alpha - \eta)a} - 1 \right] = 1 \quad (\text{I.17})$$

Dans les gaz électronégatifs, une partie des électrons n'atteint pas l'anode : elle est capturée.

Dans le cas particulier où aucun électron n'atteint l'anode, on aura :

$$\int_0^x (\alpha - \eta) dx = 0 \quad (\text{I.18})$$

Par conséquent, il existe un champ E pour lequel il n'y aura pas de claquage. Celui-ci correspond au cas où  $\alpha = \eta$ .

Cependant, il est difficile d'utiliser la théorie de Townsend pour des problèmes techniques à cause de la difficulté de déterminer  $\alpha$ .

**Grandes distances** : Pour appliquer le modèle des streamers dans les gaz électronégatifs, des conditions supplémentaires doivent être remplies:

- i) l'énergie des photons ( $h\nu$ ) émise par la tête de l'avalanche initiatrice de la décharge doit être suffisamment élevée ;
- ii) les photons doivent ioniser le gaz avant le front de l'avalanche ;
- iii) l'augmentation du champ E avant le front de l'avalanche, à la suite de concentration de charges dans l'avalanche primaire, doit être suffisante pour créer les avalanches suivantes.

Si ces conditions sont satisfaites, le critère d'amorçage peut s'écrire sous la forme :

$$(\alpha_x - \eta_x) \cdot \exp \left[ \int_0^x (\alpha - \eta) dx \right] = G(x, \rho) \quad (\text{I.19})$$

$\alpha_x$  et  $\eta_x$  sont les valeurs de  $\alpha$  et  $\eta$  à x ;  $G(x, \rho)$  est une fonction empirique qui peut être déterminée à partir des résultats obtenus en champ uniforme. Juste avant le claquage  $(\alpha_x / E) \gg (\eta_x / E)$

Le critère donné par l'équation précédente peut être écrit sous la forme

Expérimentalement,  $F(x, \rho)$  ne dépend pas beaucoup de x et de  $\rho$  dans un champ uniforme ;

$\ln F(x, \rho)$  est pratiquement constant. Ainsi, on aura :

$$\alpha_x \exp \left[ 2 \int_0^x (\alpha - \eta) dx \right] = F(x, \rho) \quad (\text{I.20})$$

Ou bien encore :

$$(\alpha_x / 2) + \int_0^x (\alpha - \eta) dx = f(x, \rho) \quad (\text{I.21})$$

Expérimentalement,  $F(x, \rho)$  ne dépend pas beaucoup de  $x$  et de  $\rho$  dans un champ uniforme ;  $\ln F(x, \rho)$  est pratiquement constant. Ainsi, on aura :

$$\int_0^x (\alpha - \eta) dx = k \quad (\text{I.22})$$

Dans le cas du SF6,  $k = 18$ . Notons qu'en pratique, la tenue diélectrique des gaz électronégatifs dépend aussi de la nature et de la forme des électrodes, de la forme et de la polarité de la tension, du type et de la concentration des impuretés, et de son fonctionnement avec les autres diélectriques.

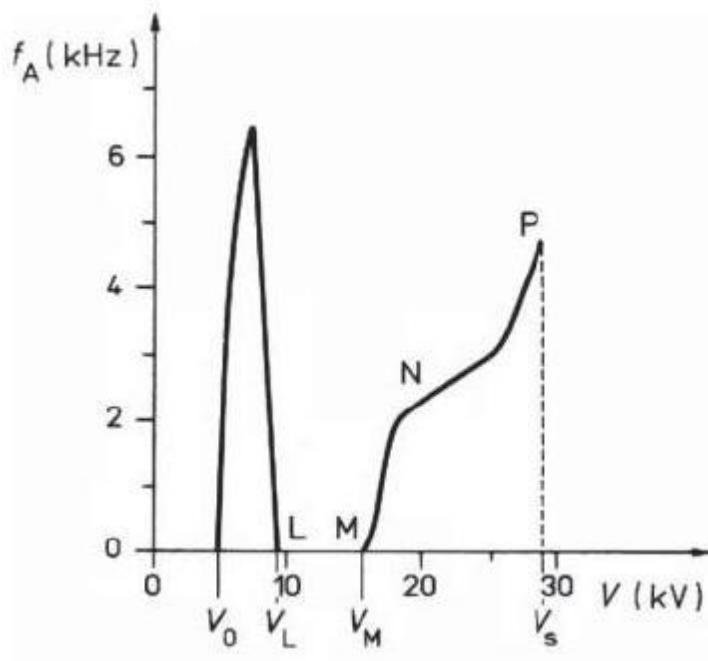
## I.2.5. Influence de la géométrie des électrodes et de la forme de la tension

### I.2.5.1 Tension continue

#### I.2.5.1. a. Polarité positive

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

- Dans un intervalle d'air pointe - plan à pression atmosphérique, différents phénomènes répétitifs peuvent être observés selon la valeur de la tension (figure 1.10).



**Figure I.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 [5]

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 piques préliminaires (preonset streamers) qui s'étendent assez loin de la pointe.
- Entre  $V_L$  et  $V_M$ , apparaît un régime parfaitement stabilisé dans lequel subsiste un courant continu, sans aucune impulsion ; cette région est appelée zone d'Hermstein.
- Au-delà de  $V_M$ , de nouvelles impulsions régulières apparaissent avec des dards qui soit disparaissent avant d'atteindre la cathode (dards pré-disruptifs ou prebreakdown streamers, zone MN), soit traversent tout l'espace inter électrodes (dards disruptifs ou breakdown streamers, zone NP).

Le courant continu de la zone d'Hermstein se manifeste par une décharge lumineuse entourant l'électrode.

Si l'on change le rayon de courbure de la pointe ainsi que la distance inter électrodes, les différentes zones que l'on vient d'indiquer peuvent être absentes ou apparaître dans un ordre différent. Par exemple, la totalité des phénomènes de pré-décharge ne se produit qu'à partir d'une distance inter électrodes de 30 cm quand le rayon de la pointe est de 1 cm. Cette distance décroît quand le rayon de l'anode diminue.

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

- Dans l'hexafluorure de soufre, les phénomènes observés sont globalement similaires à ceux observés dans l'air sec, excepté le fait que la pression pour laquelle ils apparaissent est plus faible dans le SF6 [5].
- 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.

#### I.2.5.1. b. Polarité négative

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 lumineuse est, en revanche, indépendante de  $r$  quelque soit l'intervalle inter électrodes.

Dans l'hexafluorure de soufre, des régimes de décharge sensiblement identiques apparaissent. Toutefois les impulsions de Trichel sont beaucoup plus irrégulières que dans

l'air [5]. Ils dépendent de la nature des électrodes ainsi que du pourcentage de la vapeur d'eau à l'intérieur du gaz.

### I.2.5.2 Tension impulsionnelle

D'une manière générale, l'écart entre la tension de claquage et la tension d'apparition de l'effet couronne est plus grand pour une onde dite lente (manœuvre - 250/2500  $\mu$ s) que pour une onde courte (foudre - 1,2/50  $\mu$ s). 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<sub>6</sub>-air avec seulement 1 % de SF<sub>6</sub> est supérieure à la tension disruptive du SF<sub>6</sub> pur. Cela est d'autant plus surprenant que la tension disruptive du mélange est inférieure à celle du SF<sub>6</sub> 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.

### I.2.5.3. Tension alternative

Sous tension alternative, les mécanismes conduisant au claquage sont plus complexes qu'en continue ou en impulsion par suite de l'influence des charges d'espace créées dans une alternance donnée sur l'alternance suivante. En général, aux pressions intermédiaires, la tension disruptive la plus basse est celle correspondant au développement de la décharge générée pendant l'alternance positive.

Dans l'air à pression atmosphérique et pour une pointe de 5 mm de rayon de courbure, des impulsions de Trichel peuvent apparaître pendant l'alternance négative. L'influence de l'humidité n'est pas très importante durant l'alternance positive.

Dans l'hexafluorure de soufre sous tension alternative, l'humidité joue un rôle extrêmement important en favorisant le processus de stabilisation par effet couronne. [2]

### I.2.6 Influence de la pression du gaz

Une augmentation de la pression du gaz s'accompagne en général d'une augmentation de la tension d'apparition de l'effet couronne et de la tension de claquage. Une exception importante à cette règle se manifeste avec les gaz électronégatifs. Dans ce cas, la tension de claquage passe d'abord par un maximum, puis décroît jusqu'à une certaine valeur critique de la pression pour laquelle elle devient égale à la tension d'apparition de l'effet couronne. Au-dessus de cette pression critique, la tension croît à nouveau et le claquage se produit avec l'apparition de l'effet couronne ; il (l'effet couronne ou corona) est immédiatement suivi par le claquage.

En dessous de la pression critique, la tension d'apparition de l'effet couronne dans le SF<sub>6</sub> est toujours inférieure à la tension de claquage en géométrie fil – cylindre où le fil est anode, quelque soit le rayon du cylindre. Des résultats similaires peuvent être observés dans l'air mais pour des pressions plus élevées que dans le cas du SF<sub>6</sub>.

Dans le cas du SF<sub>6</sub>, la gamme de pression pour laquelle la tension d'apparition de l'effet couronne (impulsion de Trichel) est inférieure à la tension de claquage, est plus élevée en polarité négative qu'en polarité positive. Par ailleurs, le maximum de la caractéristique.

$U_{\text{claquage}} = f(p)$  est plus élevé et se produit pour une pression plus grande en polarité négative qu'en polarité positive.

Les observations susmentionnées s'expliquent qualitativement de la manière suivante : en régime de décharge couronne, l'électrode de faible rayon de courbure est entourée d'une gaine de particules chargées dont le signe est le même que celui de la polarité de cette électrode. Ces particules se répartissant autour de la pointe, constituent une électrode virtuelle de rayon plus grand que l'électrode réelle et contribuent ainsi à abaisser le champ en son voisinage. Le rayon apparent de l'électrode augmente ainsi que la tension d'amorçage. À

partir d'une certaine pression correspondant à la tension de claquage maximale, la charge d'espace est concentrée de plus en plus près de la pointe, le rayon de cette électrode diminue de même que la tension d'amorçage.

Les phénomènes sont qualitativement similaires pour les deux polarités mais très différents quantitativement. On peut montrer que la charge d'espace négative se crée plus facilement que la charge d'espace positive, ce qui explique que la tension de claquage ainsi que la pression critique soient plus élevées en polarité négative qu'en polarité positive.

Au-dessus de la pression critique, le claquage est direct et la tension de claquage ( $U_{cl}$ ) croît de manière monotone en fonction de la pression. À partir de valeurs suffisamment élevées de cette pression, la croissance de  $U_{cl}$  n'est plus monotone et une tendance asymptotique, similaire à celle observée en champ uniforme, se manifeste. En polarité positive, cet effet a été attribué à l'influence des impuretés en suspension dans le gaz. Ces impuretés (vapeur d'eau, oxygène, particules solides, etc.) sont découvertes des parois lorsque la pression du gaz augmente ; elles participent à la création d'ions négatifs lourds qui peuvent très facilement libérer leur électron supplémentaire à l'intérieur du volume critique, contribuant ainsi de manière sensible à l'abaissement de la tension disruptive.

Dans ce cas, la présence d'irrégularités à la surface de la cathode semble ne jouer aucun rôle sur l'apparition du claquage, la cathode n'intervenant que comme source partielle d'impuretés apparaissant dans le gaz.

## I.2.6 Facteurs influençant la tenue diélectrique du gaz

### I.2.6.1 Facteurs influençant la tenue diélectrique de N<sub>2</sub>

A l'instar du SF<sub>6</sub>, le comportement de l'azote est dominé aux facteurs qui modifient le champ ou les phénomènes photoniques dans l'intervalle. Toutefois, la croissance du coefficient d'ionisation primaire en fonction du champ est relativement plus rapide dans le SF<sub>6</sub> que dans l'azote. Les effets des facteurs agissant sur le champ sont comparativement moins prononcés pour l'azote que pour l'hexafluorure de soufre. C'est entre autres le cas des particules métalliques, fixes ou mobiles. L'impact des impuretés gazeuses dépend de leur

comportement vis à vis des phénomènes photoniques ; la tenue diélectrique de l'intervalle sera réduite par les molécules des impuretés si leurs énergies d'ionisation et/ou d'émission de photons sont inférieures à celles de la molécule de  $N_2$  (neutre ou excité).

### I.3. Phénomènes d'interface

L'étude des phénomènes de décharges surfaciques sur un isolateur en présence de gaz (ou mélange) est d'une importance capitale pour la conception et le dimensionnement des composants et systèmes électriques comme les buses de disjoncteurs (GIS, GCB, Switchgears...), les cônes dans les câbles à isolation gazeuse, les isolateurs de support et de traversée dans les appareils (transformateurs et condensateurs de puissance ...) et les lignes de transmission et de distribution de l'énergie électrique. Les mécanismes de décharge surfacique sont très complexes. Ils dépendent de plusieurs paramètres comme les propriétés physiques et géométriques du solide, le type de gaz (ou mélange) et sa pression, la géométrie des électrodes ainsi que la forme, la polarité et l'amplitude de la tension appliquée.

Même si l'on dispose de certaines données expérimentales sur ce type de décharges, il existe très peu d'interprétations physiques du phénomène. Il est cependant bien connu qu'en présence de ces structures isolantes, plusieurs phénomènes physiques peuvent mener à l'apparition précoce d'une décharge dans l'intervalle inter électrodes. Parmi ces phénomènes, on peut citer principalement l'interaction (effet combiné) dynamique entre la décharge glissante et la surface du solide diélectrique l'accumulation de charges électriques surfaciques [79,82], la modification des coefficients d'ionisation et d'attachement ainsi que le phénomène de distorsion du champ électrique.

#### I.3.1 Influence du taux d'ionisation effectif

Une décharge couronne se produisant sur une surface diélectrique en présence d'air. Les processus physiques fondamentaux impliqués dans le développement des avalanches dans un gaz en présence d'une surface diélectrique sont en effet plus difficiles à déterminer. Cette

complexité pourrait en partie être attribuée à l'accentuation du phénomène de photo-ionisation provenant du bombardement de la surface par les ions, électrons et photons.

La propagation d'une décharge électrique est dépendante du taux net d'ionisations qui lui même est fonction du champ maximal à la tête du streamer principal. Dans le cas d'un diélectrique solide en présence d'un gaz, l'avancement du streamer sera aussi fortement lié aux quantités d'ionisation et d'attachement. Celles-ci seraient grandement affectées par la présence du diélectrique. Selon l'interprétation physique proposée par Gallimberti et al, une surface diélectrique peut modifier les coefficients d'ionisation et d'attachement de deux façons:

- en émettant des électrons sous l'effet du bombardement des photons, des ions positifs et des électrons. Cet apport supplémentaire de la surface du solide contribue à fournir davantage d'électrons germes pour générer des avalanches secondaires et à favoriser davantage d'ionisations par collisions à la tête du streamer.
- en attachant les électrons dans des pièges surfaciques et les ions positifs par attraction électrostatique accentuant ainsi l'attachement électronique déjà induit par le gaz constituant l'interface.

Un autre phénomène qui peut davantage influencer les conditions de contournement d'un solide diélectrique est l'accumulation progressive de charges à sa surface. Ces charges dites surfaciques peuvent affecter de façon notable les propriétés de la décharge notamment ses paramètres d'initiation et de propagation.

### I.3.2 Charges surfaciques

Les isolants utilisés dans les systèmes de puissance sont susceptibles de se charger électriquement comme mentionné précédemment. Dans les conditions réelles de fonctionnement des systèmes industriels, il est très difficile voire impossible d'avoir une approche théorique parfaite de ces charges du fait de la complexité des phénomènes qui sont souvent mal définis à l'échelle microscopique. Pour une application bien définie, on peut, dans le meilleur des cas, recourir à des estimations de la charge générée ou susceptible de l'être, en utilisant des techniques de mesures expérimentales (force-image) ou de simulation pour des conditions expérimentales précises. Dans le présent travail, nous nous intéresserons

plus particulièrement au développement des décharges surfaciques en présence d'un gaz (ou mélange) et ce jusqu'au contournement de l'isolateur. Les mécanismes qui y sont impliqués sont largement affectés par les charges accumulées à la surface de l'isolateur. A priori, ces charges surfaciques sont susceptibles de modifier la distribution spatiale du champ électrique entre autres le long de l'axe des électrodes.

Elles peuvent également augmenter l'énergie interne du diélectrique en introduisant un terme d'énergie électrostatique et un terme électromécanique associés à la déformation du réseau atomique. En conséquence, elles peuvent changer les conditions de pré-disruption et créer alors des conditions de champ favorables à l'apparition des couronnes de streamers notamment au milieu de l'intervalle inter électrode. La dynamique de la décharge peut également être influencée par l'apport énergétique de ces charges surfaciques en amplifiant le taux d'ionisation effectif pour une disruption prématurée.

### I.3.2.1 Génération de charges surfaciques

Considérons le schéma ci-dessous représentant une interface gaz/solide soumis à un champ électrique. La composante du champ incident dans le gaz vaut  $E_0$ , et celle dans le solide diélectrique est  $E_i$  (figure I.11).



**Figure 1.11** Interface solide/gaz soumis à un champ électrique

En appliquant les équations de continuité et de déplacement, on peut écrire :

$$\begin{cases} \varepsilon_o E_{n,o} - \varepsilon_i E_{n,i} = \sigma_s \\ \sigma_o E_{n,o} - \sigma_i E_{n,i} = -\frac{\partial \sigma_s}{\partial t} \end{cases} \quad (I.23)$$

Où :  $E_{n,o}$  et  $E_{n,i}$  représentent respectivement les composantes normales des vecteurs champs  $E_o$  et  $E_i$ . En recombinaison ces deux équations, on obtient :

$$\frac{\partial \sigma_s}{\partial t} + \frac{\sigma_s}{\varepsilon_i / \sigma_i} = \frac{\varepsilon_o}{\varepsilon_i / \sigma_i} E_{n,o} - \sigma_o E_{n,o} \quad (I.24)$$

À l'équilibre, soit lorsque  $\partial \sigma_s / \partial t$  ne varie plus, il s'en suit :

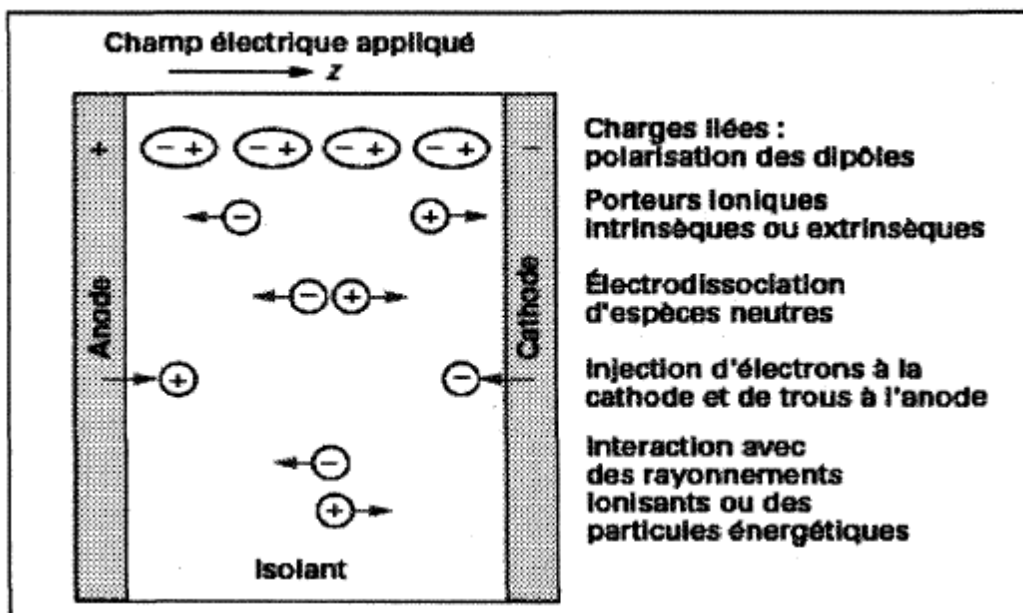
$$\sigma_s = E_{n,o} \left[ \varepsilon_o - \varepsilon_i \frac{\sigma_o}{\sigma_i} \right] \quad (I.25)$$

Sachant que  $\sigma_o > \sigma_i$  et  $\varepsilon_o < \varepsilon_i$  alors :  $\varepsilon_o / \sigma_o < \sigma_i / \sigma_i$ , les charges surfaciques seront générées aussi longtemps que  $E_{n,o} \neq 0$ .

Les charges électriques (électrons, ions positifs et négatifs) accumulées à la surface d'un diélectrique placé le long de l'axe des électrodes sont dites extrinsèques ou intrinsèques en fonction de leur origine. Elles sont dites intrinsèques lorsqu'elles sont produites initialement à l'intérieur du diélectrique par dissociation ou par ionisation naturelle. La dissociation peut concerner le diélectrique lui-même (comme nous l'avons vu dans le paragraphe relatif aux isolants solides), les additifs (couche semi-conductrice, impuretés) ou encore les contaminants (vapeur d'eau, poussière, etc.). L'interaction du diélectrique avec des rayonnements ionisants (UV, X et  $\gamma$ ) peut également conduire à une génération de charges par ionisation du diélectrique lui-même ou des impuretés qu'il peut contenir.

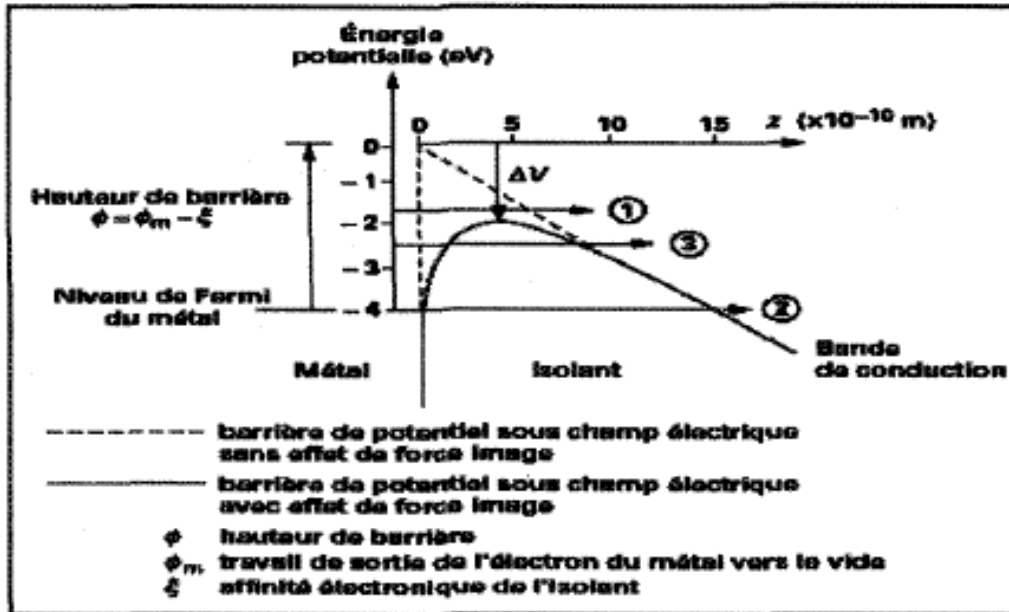
On parle de charges extrinsèques lorsqu'elles sont générées par:

- (1) injection à partir des électrodes.
- (2) le contact entre la surface libre du diélectrique et un plasma gazeux.
- (3) des décharges partielles ou des émissions par effet de champ à partir de la surface des électrodes.
- (4) de micro décharges entre les groupes de particules présentes à la surface du diélectrique.
- (5) des décharges partielles pouvant se produire à l'interface entre le diélectrique et les électrodes. La figure I.12 illustre ces différentes sources de charges surfaciques (ou d'espace) et de charges volumiques et de charges volumiques susceptibles d'être transportées vers la surface du diélectrique pour devenir des charges surfaciques.



**Figure I.12** Mécanismes de génération de charges dans un diélectrique placé le long  
De l'axe des électrodes

Des travaux effectués sous différentes conditions expérimentales laissent cependant apparaître que l'émission par effet de champ à partir des électrodes était la source probable la plus significative de génération de charges surfaciques. Ce mécanisme est illustré par la figure I.13.



**Figure I.13** Injection de charges par effet champ à partir des électrodes

Hormis les paramètres concernés par le solide diélectrique et le gaz, le champ électrique joue un rôle fondamental. En l'absence de celui-ci, toute charge issue du métal de l'électrode voit une barrière de potentiel dont la hauteur est telle que son passage vers le diélectrique est très difficile voire improbable. La hauteur de cette barrière dépend de l'épaisseur, de l'affinité électronique du solide diélectrique et de la nature du contact. En présence d'un champ électrique, la hauteur de la barrière sera réduite d'un facteur  $V$  selon l'expression suivante

$$\Delta V = \frac{e}{2} \left( \frac{eE}{\pi \epsilon_0 \epsilon_r} \right)^{\frac{1}{2}} \quad (\text{I.25})$$

$e$  étant la charge de l'électron,  $E$  le champ électrique appliqué,  $\epsilon_0$  la permittivité du vide et  $\epsilon_r$  la permittivité relative du diélectrique solide dont la valeur devra être prise dans le domaine des hautes fréquences vu que les phénomènes d'injection impliquent des déplacements de charges rapides.

La probabilité de franchissement de la barrière augmente donc considérablement avec l'application de la tension. Comme montré par la figure I.13, un électron est susceptible de franchir une barrière de potentiel selon trois mécanismes différents.

Dans le premier mécanisme, connu sous le nom d'effet Schottky, l'électron (ou le trou induit par la vacance d'électron) passe au dessus de la barrière par activation thermique tandis que pour le second, appelé effet Fowler-Nordheim, l'électron passe à travers la barrière de potentiel par effet tunnel. Le troisième qui est un mécanisme composite, connu sous la terminologie d'effet tunnel assisté thermiquement, consiste en une activation thermique de l'électron jusqu'à un certain niveau d'énergie inférieur au sommet de la barrière puis en une injection par effet tunnel. Le courant d'injection Schottky est très fortement dépendant de la température et n'intervient que pour des champs supérieurs à 100 kV/cm. L'effet tunnel par contre ne peut se manifester que lorsque la longueur d'onde associée à l'électron est plus grande que la largeur de la barrière à franchir. Cela ne devient vrai que pour des valeurs de champ de l'ordre de  $10^8$  à  $10^9$  V/m. Au-delà de ces valeurs, le courant d'injection augmente fortement mais diminue en dessous de ces valeurs.

Il convient tout de même de noter qu'il est très difficile de mettre en évidence, dans les diélectriques généralement utilisés en haute tension, les mécanismes d'injection de charges précédemment décrits. Les principales raisons en sont l'épaisseur des matériaux utilisés, la qualité de l'état de surface des diélectriques solides difficilement contrôlable à l'échelle microscopique et le caractère souvent très complexe de leur structure atomique et de leur forme. On comprend donc que dans la plupart des cas, il ne soit pas possible de corréler le courant mesuré aux paramètres intervenants dans les modèles théoriques d'injection de charge. Ces mêmes difficultés sont aussi observées lorsqu'il s'agit des mécanismes de génération interne. Comme nous l'avons déjà mentionné auparavant, le mécanisme de génération à partir des électrodes est le plus conséquent pour produire des charges.

Cependant, dans certaines conditions relevant notamment de l'inhomogénéité du

diélectrique, de l'existence d'interfaces gaz/solide dans l'intervalle inter électrodes et de la nature du champ appliqué, les mécanismes de génération interne peuvent produire un effet positif. Les processus d'accumulation que nous allons décrire dans le prochain paragraphe tiennent compte des mécanismes de génération interne et externe.

### **I.3.2.2. Accumulation de charges surfaciques**

Des connaissances actuelles, on peut distinguer trois mécanismes pouvant conduire à l'accumulation de charge à la surface d'un isolant solide:

- (1) le transport via le gaz de remplissage.
- (2) la conduction surfacique.
- (3) la conduction à l'intérieur du diélectrique.

Le mécanisme (1) suggère que les charges produites autour d'une électrode diffusent dans le gaz de remplissage à travers des lignes de champ pour s'accumuler vers le centre de la surface du diélectrique.

Quant au second (2), il préconise la circulation de charges à la surface du solide par l'effet du courant de fuite, alors que le troisième (3) est basé sur la migration vers l'extérieur de la surface du solide de charges produites à l'intérieur du diélectrique. Plusieurs travaux ont révélé que le mécanisme (1) était le plus conséquent. Cependant cela ne signifie pas que les deux autres ne peuvent pas être très efficaces si les conditions leur donnant naissance (caractéristique du champ appliqué, inhomogénéité du diélectrique) sont accentuées.

### **I.3.2.3 Charges surfaciques et champ électrique**

Après avoir été générés et transportés, les porteurs de charges s'accumulent à la surface de l'isolant solide. Ces charges surfaciques modifient la distribution du champ électrique initial. La composante la plus affectée du champ, selon la disposition du solide, est la composante normale. Les charges accumulées agissent sur elle en la diminuant du côté du gaz tout en l'accroissant du côté du solide diélectrique. Cependant, cette composante

normale ne pourra pas être inversée même si elle peut être largement réduite, ce qui signifierait que les pertes diélectriques deviennent nulles. La composante tangentielle du champ a aussi tendance à changer sous l'effet des charges surfaciques.

Une accumulation de charges négatives du côté de l'anode et de charges positives du côté de la cathode, renforce le champ tangentiel total dans les régions des électrodes et l'affaiblit dans la zone centrale de l'intervalle. Cette variation est accompagnée de la réduction du champ normal jusqu'à ce que le régime stabilisé soit atteint. Dans le cas extrême où le champ normal devient proche de zéro, le champ tangentiel sera constant et égal au champ moyen sur toute la surface du diélectrique.

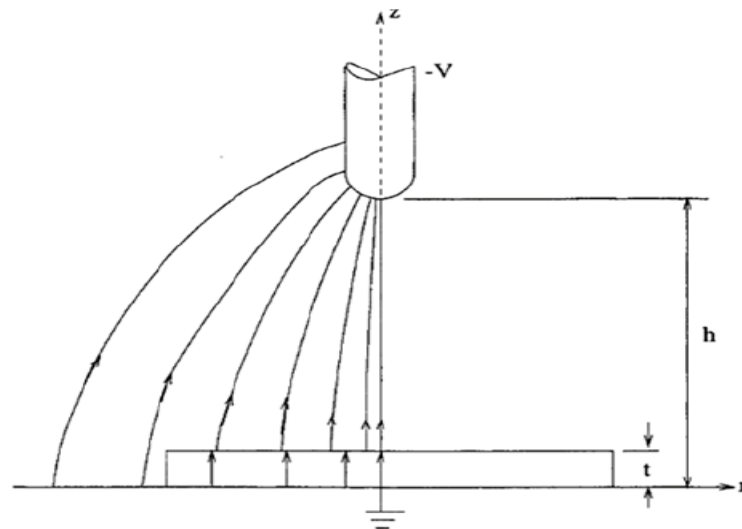
Etant donné que, durant tout le régime transitoire, le champ varie avec le temps avant d'atteindre cette condition de stabilité, le champ tangentiel sera faible au voisinage des électrodes et plus grand que le champ moyen dans la zone centrale de la surface du diélectrique. Ce phénomène est aussi obtenu lorsque, pour une raison ou une autre, la variation du champ tangentiel vers le régime de saturation est stoppée avant que la condition de stabilité ne soit atteinte. La variation de la composante tangentielle du champ montre que, tant qu'il n'y a pas d'intensification du champ au niveau des électrodes, le champ électrique total est renforcé sur la surface du diélectrique à mi-chemin des électrodes.

Dans le cas du régime alternatif, l'accumulation de charges est moins sévère qu'en régime continu car la constante de temps d'accumulation est beaucoup plus grande. Cela est dû à la variation permanente du champ appliqué en alternatif.

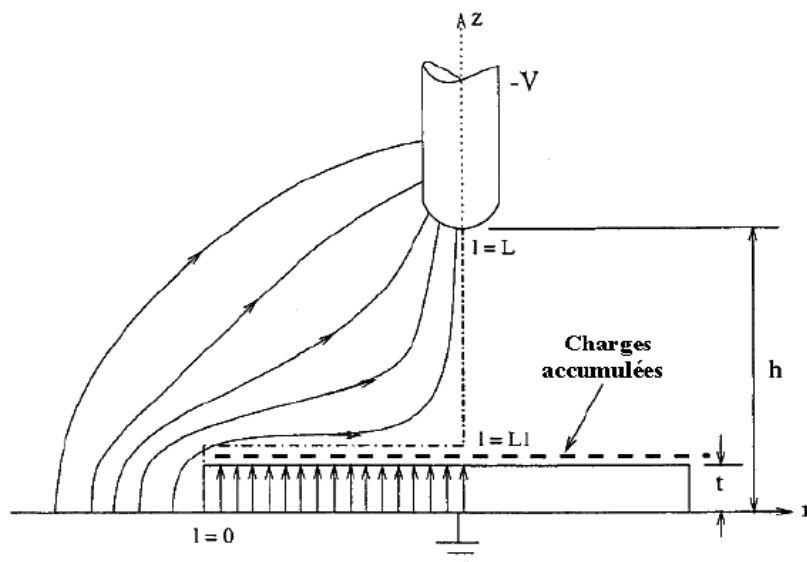
### **I.3.3. Distorsion du champ électrique**

Le système le plus simple pour obtenir des décharges surfaciques est le système pointe - plan. La distribution du champ électrique dans cet espace inter électrode est susceptible d'être modifiée par la présence d'un matériau diélectrique. Le comportement du champ, selon que la surface du diélectrique comporte ou non des charges électriques, n'est pas le même. L'accumulation de charges à la surface du diélectrique peut avoir comme

conséquence la distorsion du champ électrique entre les électrodes. Les figures I.14 et I.15 montrent des résultats de simulations effectuées en configuration pointe - plan pour déterminer le champ électrique dans l'espace inter électrode pour de petits intervalles et/ou en présence d'un diélectrique chargé ou non.



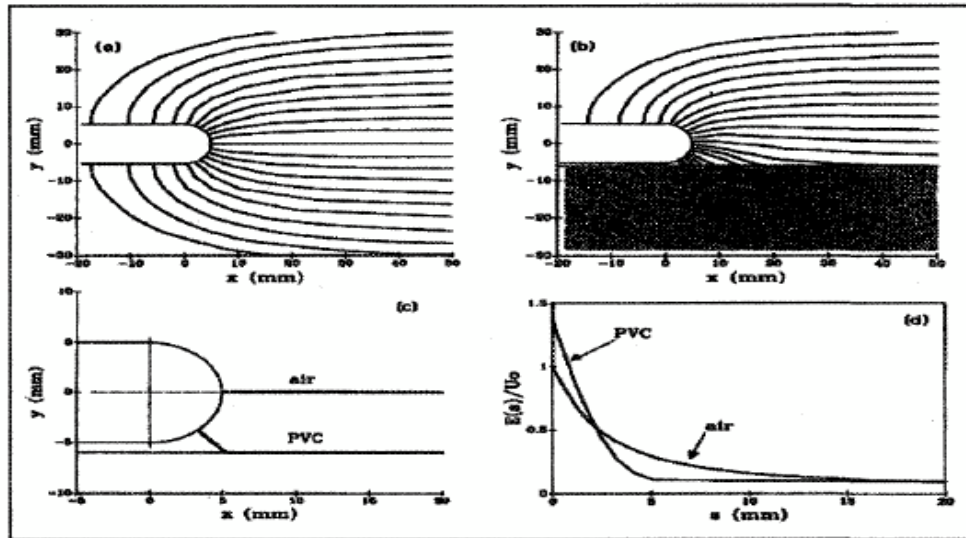
**Figure I.14** Distribution du champ électrique dans l'espace inter électrode en présence d'un diélectrique non chargé



**Figure I.15** Distribution du champ électrique dans l'espace inter électrode en présence d'un diélectrique chargé

En outre, la génération d'une décharge glissante à la surface d'un diélectrique solide

en présence de gaz (interface gaz/solide) dépend de la condition essentielle de l'existence d'une composante tangentielle du champ électrique à la surface du diélectrique. La figure I.16 donne une illustration de ce phénomène lorsqu'une surface diélectrique est placée entre deux électrodes.



**Figure I.16** Comparaison du champ électrique autour de l'électrode haute tension dans l'air et en présence de surface diélectrique

- (a) : lignes de champ dans un gap d'air
- (b) : lignes de champ en présence d'une surface de PVC ( $\epsilon = 4$ )
- (c) : champ maximal sur une surface de PVC en présence d'air
- (d) : champ axial dans l'air en présence d'une surface de PVC

La distribution du champ est obtenue par simulation numérique pour un système d'électrodes tige – plan. On remarque que le diélectrique solide placé parallèlement à l'axe des électrodes peut déformer les lignes de champ en les dirigeant vers sa surface et en accentuant le champ aux alentours de l'électrode haute tension. La ligne de champ maximal longe la surface du diélectrique solide en partant du point de l'électrode haute tension où le champ est le plus élevé.

Par comparaison aux phénomènes se produisant dans l'air, la déformation des lignes de champ en présence d'un solide diélectrique entraîne un champ géométrique

largement renforcé au voisinage de l'électrode haute tension et brusquement affaibli lorsqu'on s'éloigne de cette zone. Cette distorsion du champ est due au fait que la permittivité du solide diélectrique est relativement élevée par rapport à celle de l'air.

En présence de la surface diélectrique, le volume critique, tel que défini dans le cas de l'air, sera réduit. En effet, l'affaiblissement brutal du champ pour des points éloignés de l'électrode haute tension placerait le champ critique d'ionisation à une distance plus proche de l'électrode haute tension qu'il ne le serait dans le cas de l'air.

Cette réduction du volume critique indiquerait, pour une tension donnée, une probabilité de génération d'électrons plus faible. Autrement dit, la tension requise pour amorcer une couronne de streamers en présence d'un solide diélectrique serait plus grande que celle dans le cas de l'air seul.

Ce résultat théorique est cependant en contradiction avec ceux rapportés par d'autres chercheurs. Il est donc certain que les mécanismes conduisant à la formation d'une décharge surfacique en présence de gaz ne peuvent dépendre uniquement de la distribution du champ électrique et de son intensité. Plusieurs autres facteurs telles que la température et la pression, et surtout la nature des deux phases constituant l'interface, notamment le gaz (ou mélange), la composition et la surface du solide diélectrique, entrent en jeu.

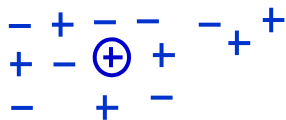
Ces facteurs, ajoutés à la distribution du champ local, auront naturellement comme principal effet de modifier les facteurs d'ionisation et d'attachement initiaux de l'intervalle de gaz. Dans nos recherches, les diélectriques solides que nous utiliserons sont le verre, le PTFE et la résine Epoxy en présence de gaz SF<sub>6</sub>, N<sub>2</sub> et CO<sub>2</sub> et mélanges SF<sub>6</sub>-N<sub>2</sub> et SF<sub>6</sub>-CO<sub>2</sub> sous différentes pressions. L'analyse que nous venons d'effectuer sur les mécanismes de génération et d'accumulation de charges ainsi que sur le phénomène de distorsion du champ électrique nous permettra de mieux appréhender les processus de génération et de propagation des décharges aux interfaces solide/gaz (ou mélange).

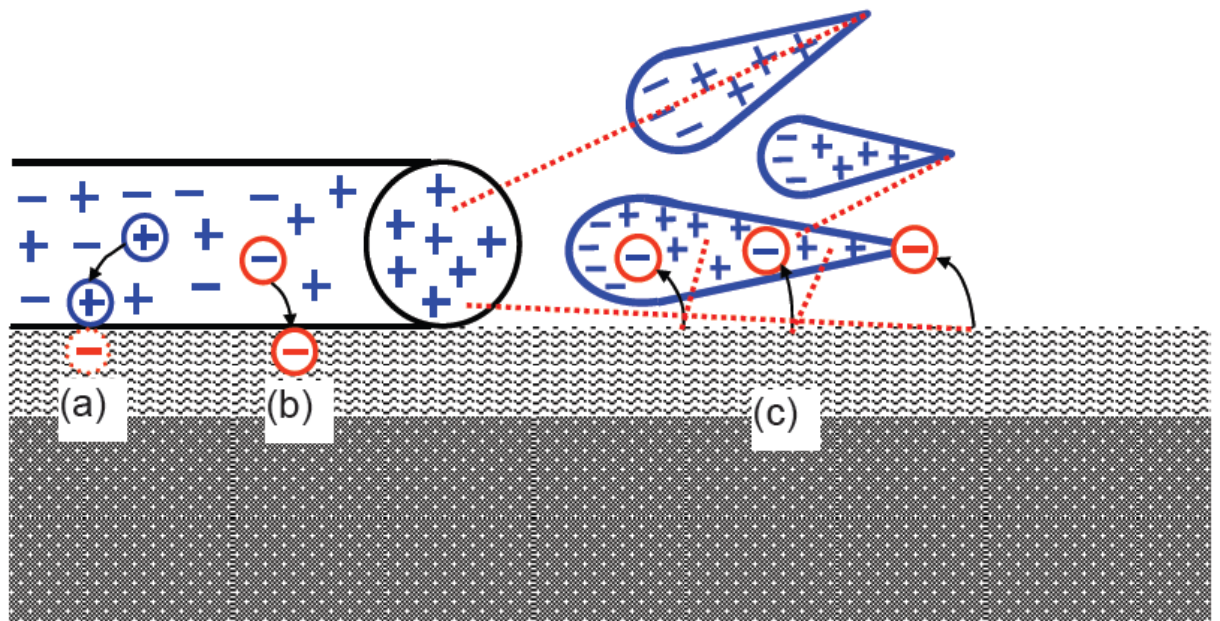
### I.3.4. Influence d'une surface diélectrique sur l'initiation et la propagation des streamers

L'initiation et la propagation des streamers en présence d'une surface diélectrique, comme dans le cas de l'air, seront fortement contrôlées par les coefficients d'attachement et d'ionisation. Seulement ceux-ci seront grandement affectés par la présence de cette surface.

Comme déjà évoqué succinctement dans le paragraphe I.3.1, une surface diélectrique modifie les coefficients d'ionisation et d'attachement de deux façons selon la théorie proposée par Gallimberti et al et mise en évidence par la figure I.17 ci-dessous :

- elle émet des électrons par l'effet du bombardement des photons. Ceci contribue à fournir davantage d'électrons déclencheurs d'avalanches et à favoriser davantage d'ionisations collisionnelles par augmentation de la quantité d'électrons présents dans le processus de la décharge. Cet effet a d'ailleurs été expérimentalement démontré sur les surfaces PTFE en présence de SF<sub>6</sub>.
- Elle peut attacher les électrons par des pièges et les ions positifs par attraction électrostatique causant ainsi davantage d'attachement en plus de celui déjà induit par le gaz de remplissage de l'intervalle inter électrodes.





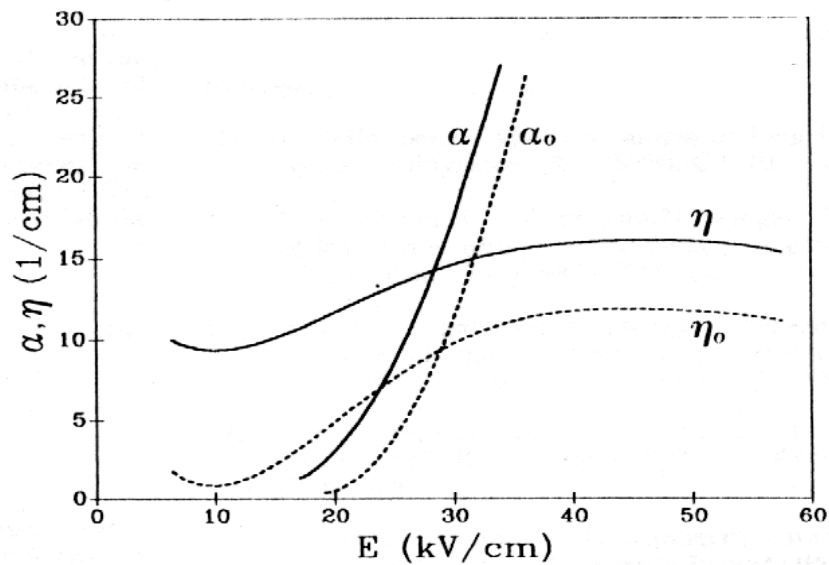
**Figure 1.17** Processus fondamentaux contribuant aux phénomènes d'ionisation et d'attachement dans la propagation d'un streamer à travers une surface diélectrique

(a) : ion positif capturé par les forces électrostatiques

(b) : électron capturé à travers les pièges surfaciques

(c) : extraction d'un photoélectron contribuant aux ionisations collisionnelles

La figure I.18 ci-dessous présente les coefficients d'ionisation et d'attachement dans le cas de l'air et ceux modifiés par la présence d'une surface de PVC



**Figure I.18** Coefficients d'ionisation et d'attachement de l'air respectivement  $\alpha_0$  et  $\eta_0$  (traits en pointillés) et ceux favorisés par la présence d'une surface en PVC (traits continus).

Comme le suggère le mécanisme présenté par la figure I.17, on peut s'attendre à ce que l'initiation et la propagation des streamers le long d'une surface diélectrique soient contrôlées par des coefficients d'ionisation et d'attachement plus grands que ceux dans l'air. Ceci est de plus conforté par le fait que les recombinaisons des ions positifs sur des surfaces diélectriques peuvent contribuer à extraire des électrons de celles-ci ou du gaz environnant.

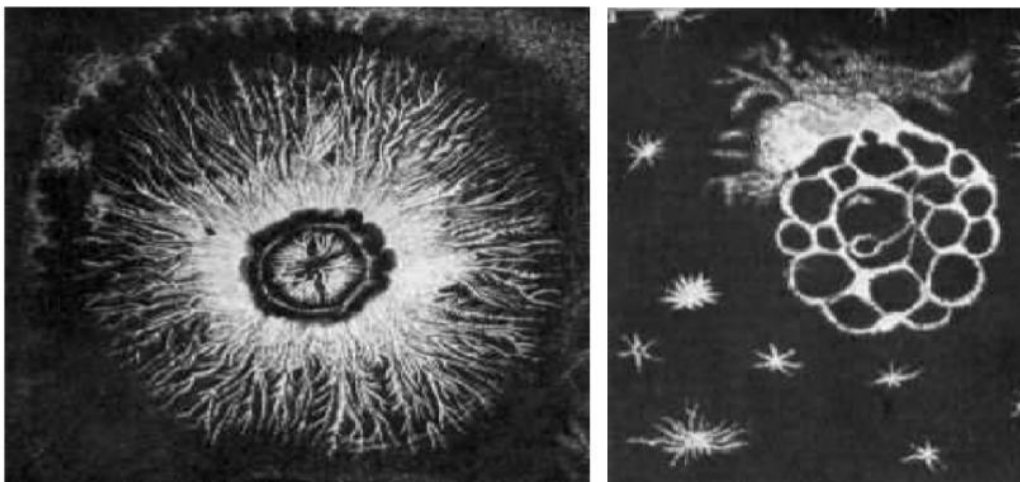
La plus faible énergie requise pour arracher un électron d'un solide est appelée fonction travail, ( $e\phi$ ). Cette énergie peut se présenter sous différentes formes : thermique (phonons,  $kT$ ), photonique ( $\hbar\nu$ ), énergie potentielle des atomes et des ions ( $eV^*$ ,  $eV_i$ ), énergie cinétique ( $\frac{1}{2} m V^2$ ) etc.

### I.3.5 Caractérisation optique des décharges glissantes

Les décharges surfaciques ont été découvertes en 1777, quand Lichtenberg découvre par le fait du hasard, la formation de petites figures de poudre sur une surface chargée d'électricité (figure I.19). Ces figures dites de Lichtenberg sont aussi appelées figures de poudre.

Elles ont suscité un grand intérêt chez beaucoup de physiciens, seulement parce que leurs formes diverses offrent l'un des plus beaux spectacles de la nature, mais aussi parce qu'elles ont initié la découverte des décharges électriques et qu'elles sont susceptibles de présenter une dimension fractale.

Pederson a été le premier à avoir étudié les figures dites de Lichtenberg où des photographies ont été utilisées pour l'étude des surtensions dans les lignes de transmission isolées au gaz. Merrill et Von Hippel ont proposé une interprétation physique de leur mécanisme de formation, basée sur les théories modernes des décharges dans les gaz. Puis, cette technique a été utilisée par de nombreux chercheurs pour caractériser les décharges surfaciques (ou glissantes). Plusieurs tentatives d'explication du phénomène de ces décharges ont également été proposées.

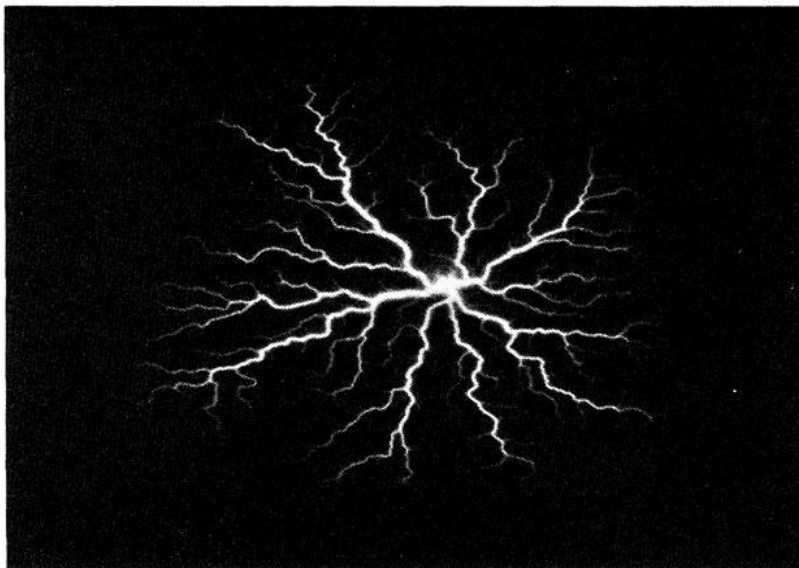


**Figure I.19** *Figures originales de Lichtenberg 1777*

Les techniques photographiques ont par la suite été utilisées par plusieurs auteurs pour la caractérisation des décharges. L'une de ces techniques consiste à placer du papier photographique sur un isolant immergé dans un gaz ou liquide diélectrique et de développer le contenu en utilisant des techniques photographiques ordinaires après avoir soumis la structure à une décharge électrique. La technique de figures de poudre et du papier photographique sont des méthodes d'observation statiques puisqu'elles ne permettent pas d'observer l'évolution

temporelle des décharges glissantes. Néanmoins, elles restent toujours d'actualité parce qu'elles procurent beaucoup d'informations utiles à la caractérisation des décharges et ont largement contribué à la compréhension de phénomènes liés aux figures de Lichtenberg.

Avec le développement des techniques de mesures notamment l'amélioration de la résolution spatiale et temporelle des systèmes optiques, l'étude des décharges surfaciques a beaucoup progressé durant ces trois dernières décennies. La technique d'embryoscopie est parmi les plus utilisées. Elle consiste à éclairer la cellule d'essais par un faisceau lumineux puissant, de courte durée (d'environ 1Ps), pendant la propagation de la décharge. Les branches de celle-ci, qui ont un indice de réfraction différent de celui du fluide diélectrique, vont alors dévier la lumière dans toutes les directions. Une caméra vidéo placée en dehors du faisceau lumineux permet d'obtenir une image par diffraction. D'autres techniques plus ou moins récentes permettent d'observer des décharges surfaciques sur un matériau solide en présence de gaz sous pression. La figure 1.20 ci-dessous donne un exemple de décharge surfacique obtenue dans le SF6 à 0,3 MPa sur un échantillon en verre de 2 mm d'épaisseur.



**Figure 1.20** Figure de Lichtenberg observée sur une interface verre/SF6 pour une impulsion de tension de 30 kVx1 $\mu$ s sous une pression de 0,3 MPa

Le développement et la propagation de la décharge surfacique peuvent être également suivis si le phénomène lui-même émet de la lumière, ce qui est le plus souvent le cas. La luminosité du phénomène étant généralement très faible et sa vitesse très grande, on emploie un tube amplificateur de brillance couplé par fibre optique à une caméra CCD qui délivre une

image permanente ou instantanée (temps d'exposition: quelques nanosecondes). On utilise également des caméras à balayage de fente (streak cameras) qui permettent de suivre en permanence le phénomène avec une très grande vitesse de balayage (1 cm/ns).

L'utilisation de cette technique facilite l'observation de l'évolution temporelle des décharges glissantes et le comportement dynamique de ses branches. Cependant, son utilisation dans le cas des décharges glissantes sur des solides opaques, pourrait avoir des limites réduisant ainsi considérablement le champ d'investigation.

### I.3.6 Analyse fractale des décharges glissantes

Les phénomènes de claquage (ou de contournement) dans les diélectriques gazeux, solides ou liquides se manifestent le plus souvent par la propagation de décharges constituées de multiples canaux formant des arborescences de formes complexes et diverses. La foudre et les décharges surfaciques sont les exemples les plus répandus. Leur structure générale montre une grande similitude entre les différents types de décharge. Cela suggère que la formation des branches des différents types de décharges serait gouvernée par une loi universelle peu sensible aux détails physiques du phénomène. Ce type d'universalité peut largement simplifier la classification et la description du phénomène de la décharge.

Avec l'utilisation de la géométrie fractale à la fin des années 1970, terme inventé par Mandelbrot pour désigner la forme des figures aléatoires et des figures auto similaires, la dimension fractale est considérée depuis, comme étant une des meilleures descriptions des figures de décharges. Les branches et les ramifications, apparemment désordonnées, peuvent être caractérisées et classées quantitativement par la géométrie fractale.

En 1982, Sawada et al ont introduit le modèle stochastique pour décrire les structures ramifiées des décharges. Ils ont aussi analysé les propriétés fractales d'une structure aléatoire en 2 dimensions obtenue par simulation en utilisant la géométrie fractale.

Par la suite (en 1984), Niemeyer et al ont utilisé l'approche fractale pour élaborer un modèle de maille en treillis des décharges électriques dans les gaz. Dans ce modèle, appelé aussi NPW (Niemeyer, Pietronero et Wiesmann), la probabilité de propagation des décharges

est explicitement liée au champ électrique local. Weismann et Zeller ont ensuite introduit plusieurs paramètres du champ électrique au modèle NPW et ont effectué des investigations sur le caractère stochastique des décharges surfaciques (2 dimensions) développant ainsi le modèle WZ (Weismann et Zeller). Depuis, de nombreux travaux de recherches ont concerné le modèle stochastique et l'analyse fractale des décharges obtenues par simulation.

#### **I.4. Conclusion**

Il ressort de cette analyse bibliographique que les mécanismes impliqués dans le développement des décharges se propageant aux interfaces gaz/solide (décharges glissantes) sont très complexes. Leurs caractéristiques (morphologie, longueur, courant, vitesse ...) dépendent de plusieurs paramètres. Il s'agit principalement des propriétés physiques et géométriques de l'isolateur (diélectrique solide), du type de gaz, et de sa pression, de la forme, de l'amplitude et de la polarité de la tension. Les phénomènes de polarisation influent également sur le comportement diélectrique de la structure isolante puisqu'ils contribuent par relaxation à l'échauffement du diélectrique solide. La distribution du champ électrique et la présence de charges surfaciques jouent également un rôle important dans les phases de propagation et de génération.

Quant aux décharges électriques (surfiques) aux interfaces solide/gaz, les modèles proposés permettent de décrire les décharges surfiques par une approche fractale. Cependant, les décharges glissantes ne présentent pas toutes un aspect radial. En conséquence, elles peuvent ou non admettre une dimension fractales

---

## **Chapitre II**

# **Montage expérimental**

---

## II.1. Introduction

Tout matériel électrique est exposé à différents types de contraintes: électriques, mécaniques, thermiques et environnementales. Dans notre travail, nous nous intéressons plus particulièrement aux contraintes électriques. Selon l'intensité du champ électrique aux différents points (ou zones) de la structure isolante considérée, des décharges partielles peuvent prendre naissance à la surface ou dans le volume de la structure (en général dans des défauts) et conduire au contournement ou au claquage. L'issue peut être fatale pour l'installation. Aussi et malgré les progrès énormes de modélisation et les outils de simulation qui ont permis de faire des économies considérables en temps et en essais expérimentaux, des validations et données expérimentales sont nécessaires avant la finalisation d'un produit (matériel).

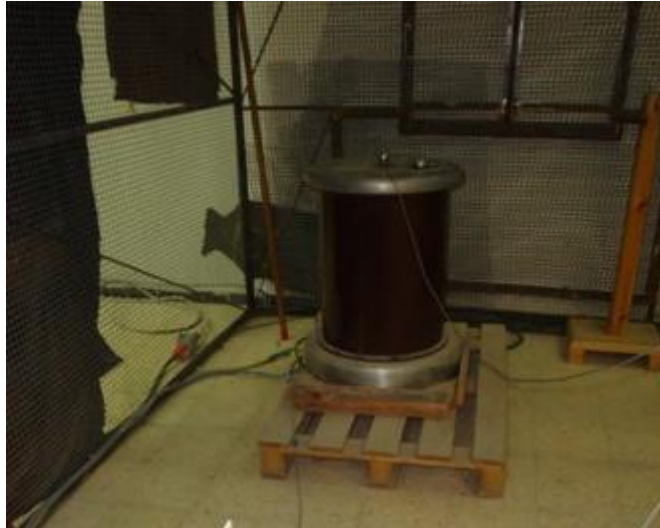
Dans ce chapitre nous nous présenterons le dispositif expérimental, qui est destiné à l'étude des décharges superficielles en tension alternative 50 Hz, se développant dans les interfaces solide\ air, ainsi que les systèmes d'électrode, l'échantillon de polymère que nous avons utilisé, et leurs propriétés fondamentales. La caractérisation et l'étude du comportement sous contraintes électriques d'un isolant nécessite de connaître sa structure et les principales propriétés du matériau [6]. C'est dans ce but que nous les avons présentés dans un premier temps. On passe ensuite aux méthodes de mesure des courants de décharge enregistrés à l'aide d'un oscilloscope à mémoire. On décrira ses caractéristiques principales, et définirons ses capacités et ses limites dans l'étude des impulsions de courant. La description du dispositif d'essai et différentes techniques utilisées terminera ce chapitre.

## II.2. Source haute tension

Une source de haute tension est utilisée : **Transformateur haute tension.**

Les générateurs de haute tension alternative 50 Hz, sont du type transformateur destiné à effectuer des essais diélectriques sur les isolants.

Dans notre essai l'alimentation est assurée par un transformateur monophasé qui a les caractéristiques suivantes : 100kV, 10kVA, 50Hz placé dans la cage de Faraday.



**Figure. II.1** *Transformateur d'essais*

La variation de la tension se fait à l'aide d'un autotransformateur se trouvant au niveau d'un pupitre de commande.

### **II.3. Choix du Systèmes d'électrodes**

Dans la plupart des systèmes utilisés en haute tension, le champ électrique est loin d'être uniforme : généralement, il est maximum au voisinage de l'électrode sous tension et diminue vers la partie à la masse. C'est le cas des structures tige-plan, conducteur-sol, conducteur pylône, etc. [2]

Les caractéristiques électriques des décharges dépendent fortement de la géométrie des électrodes.

Les systèmes d'électrodes qu'on peut utiliser sont les systèmes pointe - plan, sphère - plan, sphère - sphère et plan - plan. L'état de surface et les rayons de courbure des électrodes sont contrôlés.

La configuration pointe - plan est utilisée pour se placer dans les conditions de champs non uniformes. 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 [7].

L'expression du champ axial (suivant l'axe Z de la pointe) en approximation hyperboloïde est donnée par l'expression:

$$E_z = \frac{2U}{(R+z)\ln(4d/R)} \quad (\text{II.1})$$

$U$  représente la tension appliquée aux électrodes,  $d$  la distance inter électrodes et  $R$  le rayon de courbure de la pointe. Plus  $R$  est faible, plus le champ local à la pointe ( $0=z$ ) est élevé et sa distribution inhomogène. Cette inhomogénéité est caractérisée par le facteur de non uniformité  $\beta$  ou son inverse appelé « facteur d'utilisation du champ » noté  $\eta$  appelé aussi facteur de forme de Schweiger; ce dernier est défini comme étant le rapport entre le champ moyen dans l'espace inter électrodes et le champ maximal (c'est-à-dire le champ au niveau de l'électrode acérée (électrode de plus faible rayon de courbure) [8]. Si  $E$  est la valeur maximale du champ dans l'intervalle, le facteur d'utilisation du champ (noté  $\eta$ ) est égal à :

$$\eta = \frac{E_{\text{moy}}}{E_{\text{max}}} = \frac{U/d}{E_{\text{max}}} = \frac{U}{E_{\text{max}} d} \quad (\text{II.2})$$

$$\eta = 1/\beta$$

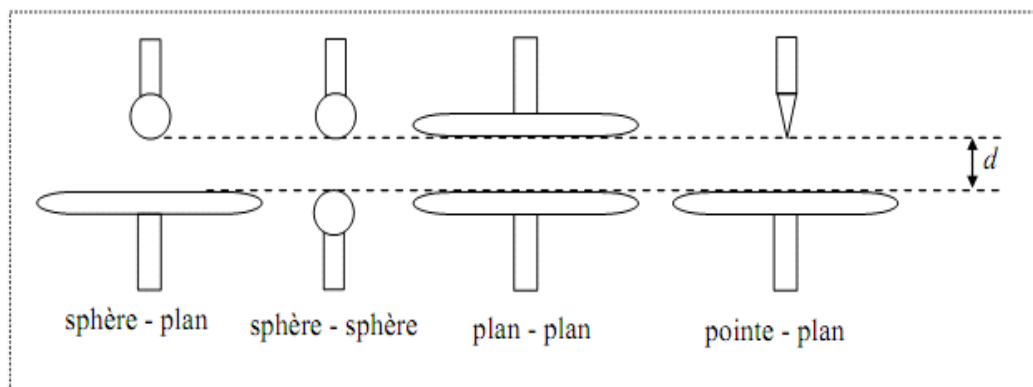
$\eta$  est compris entre 0 et 1. Plus  $\eta$  est proche de 1, plus le champ sera uniforme. C'est ce vers quoi essaie de tendre l'industriel [8].

Lorsque le champ est suffisamment hétérogène, une décharge de type couronne apparaît. Par convention, on appelle situation à champ non homogène les configurations pour lesquelles, sous certaines conditions de pression, un effet couronne est susceptible d'apparaître. En revanche, les situations pour lesquelles le claquage apparaît directement, sans effet couronne, sont appelées configurations à champ quasi homogène. Ces configurations

dépendent non seulement du facteur d'utilisation du champ, mais aussi de la nature du gaz isolant lui-même [9].

Lorsque le facteur d'utilisation du champ est suffisamment bas, le champ électrique au voisinage de l'électrode acérée est très grand. L'amplification de l'avalanche critique peut devenir très importante et, contrairement au cas d'un champ uniforme, une propagation de la décharge par un mécanisme de type streamers peut se manifester même en l'absence de surtension. La zone dans laquelle le champ électrique est élevé (et où une très forte multiplication des électrons se produit) coexiste la plupart du temps (géométries pointe - plan, fil - cylindre, etc.) avec une zone dans laquelle le champ électrique est très faible où les différentes particules chargées dérivent lentement soit vers l'électrode la plus proche, soit vers la zone de multiplication. La nature très différente des phénomènes physiques qui apparaissent dans l'une ou l'autre zone conditionne en grande partie la structure des décharges qui sont susceptibles d'apparaître [9].

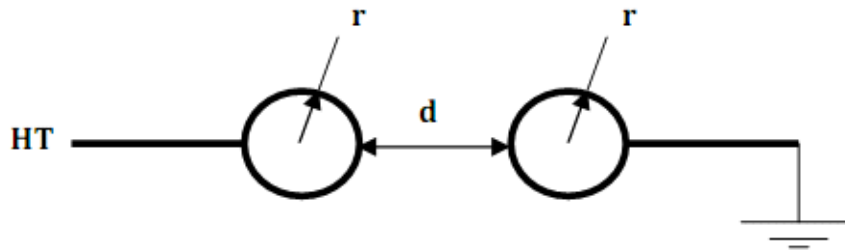
Dans chaque configuration, les deux électrodes en regard sont axisymétriques. La figure II.2 illustre les différentes configurations d'électrodes.



**Figure II.2 Configurations des différents types d'électrodes [9]**

Pour le calcul du champ dans un système asymétrique d'électrodes sphère –sphère (figure II.3) de même diamètre (une des électrodes connectée à la masse), on fait appelle à un autre facteur  $p$  :

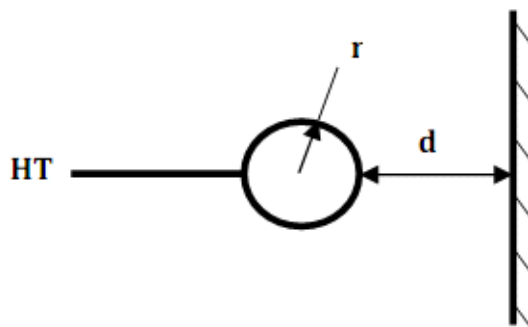
$$p = \frac{d+r}{r} \quad (II.3)$$



**Figure II.3 Electrode sphère - sphère**

La valeur de  $p$  nous permet de déterminer sur un abaque le coefficient d'utilisation du champ pour chaque distance.

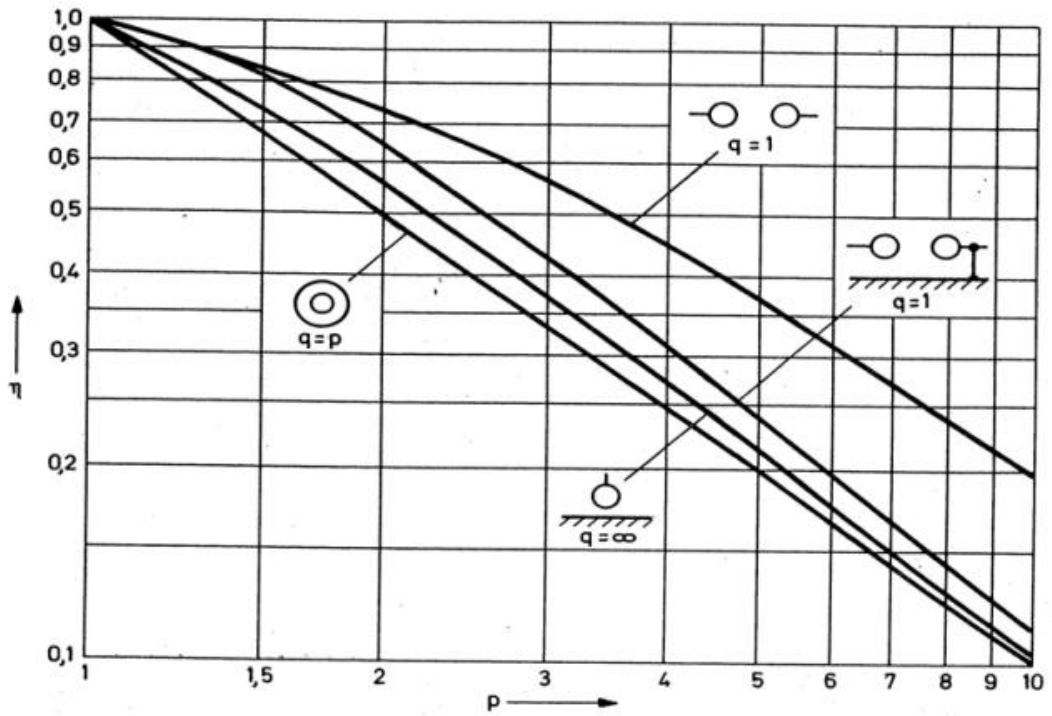
Dans un système d'électrodes sphère - plan (figure II.4), le calcul se fait de la même manière que cas d'électrodes sphère - sphère.



**Figure II.4 Electrode sphère - plan**

Les valeurs de  $\eta$  sont calculées à l'aide de graphes donnant le coefficient d'utilisation du champ en fonction des valeurs de  $p$ .

Pour les configurations sphère - sphère et sphère - plan, la figure II.5 [10] ci - dessous permet de déterminer les valeurs du facteur d'utilisation du champ à l'aide de  $p$ .



**Figure II.5 Courbes donnant le facteur d'utilisation pour différentes configurations en fonction de p et q [10]**

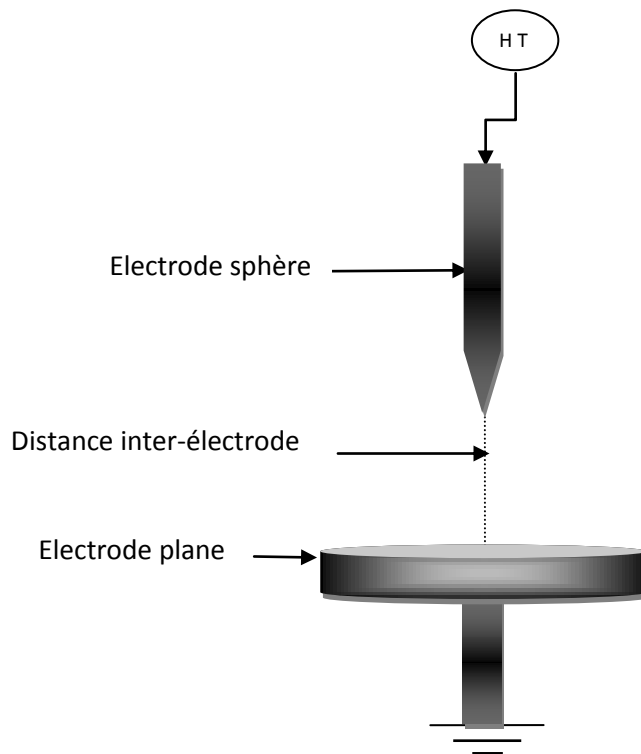
Dans le cas d'un système pointe - plan (figure II.6), le coefficient d'utilisation en approximation hyperboloïde est calculé à partir de la relation suivante:

$$\eta = \frac{\ln(\sqrt{p} + \sqrt{p-1})}{\sqrt{p(p-1)}} \quad (II.4)$$

**Figure II.6 Electrode pointe – plan**

$p$  se calcule de la même manière que dans les deux cas précédents.

Dans le dispositif utilisé pour l'étude de décharges de surfaces la cellule d'essais contenant un système d'électrode pointe - plan.



**Figure II. . Système d'électrode pointe – plan.**

## II.4. Choix du matériau isolant solide

### II.4.1. Introduction

La conception et le fonctionnement de l'équipement électrique dépend des matériaux disponibles. Ainsi, les propriétés des conducteurs et des isolants jouent un rôle crucial dans la construction des appareils électriques [11].

Tout matériel électrique ou électronique est constitué d'un agencement judicieux de matériaux conducteurs qui servent à transporter l'énergie électrique (ou l'information) là où elle doit être utilisée et de matériaux isolants qui permettent d'empêcher celle-ci de se perdre en empruntant le plus « court » chemin d'un potentiel à un autre. Outre leur fonction première qui est de s'opposer au passage du courant entre conducteurs, les isolants solides ont également le rôle de maintenir mécaniquement les conducteurs dans des conditions prédéterminées [11].

Dans cette partie nous examinons les propriétés des isolants solides, ces matériaux, ont pour la plupart été choisis pour leurs bonnes propriétés diélectriques. Parmi ceux-ci, les polymères isolants.

La grande diversité des polymères ainsi que leurs bonnes propriétés diélectriques mécaniques et thermiques en font un matériau de choix dans les isolations hautes tensions. Nous nous présenterons les propriétés principales des isolants solides plus particulièrement les polymères isolants [12].

## II.4. 2. Isolant solide

Les isolants solides sont des éléments de base des isolations à haute tension, ils comportent en plus du gaz la particularité d'assurer la rigidité mécanique des matériels électriques. [8]

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

- La permittivité relative  $\epsilon_r$
- Le facteur de pertes diélectriques  $\tan\delta$  en tension alternative.
- La rigidité diélectrique  $E_r$  (V/m)
- La décharge disruptive ou claquage  $E_d$  (v/m)
- la résistance en tension continue

### II.4.2.1. Types des isolants

On peut grouper les isolants dans deux grandes classes : les isolants organiques et les isolants inorganiques.

En général, les isolants organiques tels que le caoutchouc, le papier l'huile, le coton, les matériaux thermoplastiques, etc., sont composés de longues chaînes moléculaires de carbone et d'hydrogène. Ils ne peuvent pas supporter des températures élevées sans se désagréger.

par ailleurs, les isolants inorganiques tels que le mica, la porcelaine, l'air peuvent tolérer des températures dépassent parfois 1000°C.[11]

## II.4.2.2. Matériaux utilisés comme isolants solides [2], [12], [13]

### II.4.2.2.a. Produit naturel

Les premiers isolants solides utilisés ont été ramassés de la nature: bois sec, soufre, résines naturelles, ambre, caoutchouc, etc.

### II.4.2.2.b. Isolants solides fabriqués

A partir de 18<sup>e</sup> siècle, les nombreuses applications de l'électricité ont poussé les utilisateurs à fabriquer des isolants synthétiques: verre, porcelaine, papier, et de nombreux polymères, inventés et développés par les chimistes. Possédant des propriétés thermiques, électriques et mécaniques bien supérieures à celles des isolants naturels, ces isolants synthétiques ont grandement modifié la fabrication des fils, des câbles et des appareils électriques de toutes sortes [11].

Les matériaux diélectriques solides idéaux sont des matériaux qui ne sont pas conducteurs du courant électrique puisqu'ils ne contiennent pas de charges libres dans leurs structures, à moins qu'ils soient soumis à l'action des facteurs ionisants externes provoquant la perte de leurs propriétés diélectriques. Aussi, les charges de signes différents dans les atomes et les particules des diélectriques sont liées. Lorsque ces charges sont soumises aux forces induites par le champ électrique, certaines de ces liaisons ne se rompent pas mais seules de légers déplacements élastiques apparaissent. Toutes les charges positives se déplacent vers la direction conforme à celle du champ, et les charges négatives - dans la direction opposée, ce qui crée une polarisation du diélectrique. La polarisation et la conductivité (et dans le cas extrême des champs ionisants - également les décharges partielles), en un mot toute mobilité de porteurs de charge, induisent des pertes diélectriques. Tous les phénomènes dans les diélectriques soumis à un champ électrique dépendent de la fréquence du champ, de la température et de la structure du diélectrique.

Les matériaux diélectriques réels contiennent un certain volume de charges libres provenant des impuretés. Ainsi, dans les diélectriques, on peut également observer une très légère conduction, détectable surtout aux basses fréquences. Parmi ces matériaux, on peut

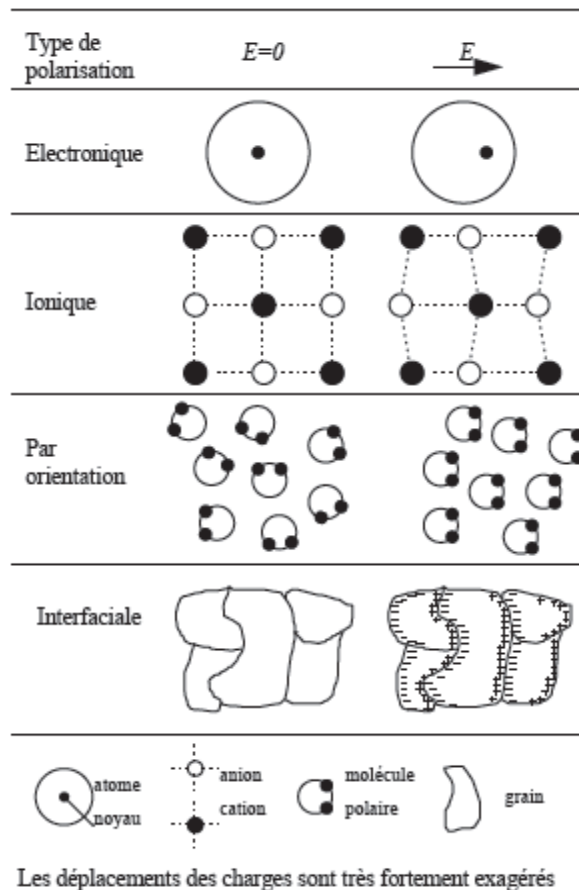
citer le verre, la céramique, le Téflon (PTFE - polytétrafluoroéthylène) utilisé pour certaines pièces des disjoncteurs haute tension, les résines (Epoxy) ainsi que de nombreux plastiques (polymères et composites, etc.).

### II.4. 3. Phénomènes de polarisation des isolants solides

Les pertes diélectriques sont dues aux mouvements des porteurs de charges. L'effet de ces mouvements est appelé polarisation induite. On distingue plusieurs types de polarisation : électronique, ionique, par orientation et inter faciale (Figure II.9); celles-ci peuvent co-exister ou apparaître séparément. La polarisation totale est la somme des différents types de polarisation [14], [2].

- La polarisation électronique est présente dans tous les diélectriques, sans exception. Elle résulte des déplacements des orbites électroniques externes par rapport au noyau de l'atome. Elle est indépendante de la fréquence jusqu'à l'ultraviolet. La déformation de l'orbite qui l'accompagne est élastique, c'est à dire que le travail nécessaire à son apparition n'est pas converti en chaleur mais stocké dans le champ électrique.

- La polarisation ionique (ou atomique) résulte du déplacement des atomes liés par des liaisons ioniques. Dans le cas des liaisons ioniques, les électrons de valence parcourent les orbites partagées avec d'autres atomes. On rencontre les liaisons ioniques dans la plupart des diélectriques solides non-organiques avec une structure cristalline (cristaux ioniques). La polarisation ionique ne provoque pas de pertes d'énergie et disparaît avec la suppression du champ appliqué. Elle existe jusqu'aux fréquences correspondant à l'infrarouge et est propre à la plupart des matériaux céramiques.



**Fig. II.9. Illustration de différents types de polarisation**

- La polarisation d'orientation consiste en l'orientation, sous l'action du champ électrique, des molécules polaires, c'est à dire celles qui possèdent un moment dipolaire permanent. Le caractère dipolaire est généralement propre aux molécules des composés chimiques ayant des liaisons ioniques, mais également aux composés ayant des liaisons covalentes qui ont une structure asymétrique (par exemple H<sub>2</sub>O).

- La polarisation interfaciale [15] apparaît dans les diélectriques non-homogènes dont les permittivités et les conductivités des matériaux constituants 1 et 2 sont telles que:

$$\epsilon_1 / \epsilon_2 \neq \sigma_1 / \sigma_2$$

$\epsilon_1$  et  $\epsilon_2$  sont les permittivités respectives du milieu 1 et 2.  $\sigma_1$  et  $\sigma_2$  sont les conductivités respectives des milieux 1 et 2.

Elle résulte d'une accumulation de charges à la frontière des deux milieux. Elle s'affaiblit généralement au voisinage des fréquences supérieures aux fréquences acoustiques.

#### II.4.4. Mécanisme de claquage des isolants solides

Le claquage (ou contournement) est l'aboutissement d'une série de processus complexes et interactifs. A la différence des gaz et des liquides, le claquage des isolants solides entraîne la destruction du matériau, et par conséquent, l'arrêt de fonctionnement du composant ou système dont il fait partie. Le claquage d'un matériau résulte de phénomènes complexes apparaissant lors de la phase de préclaquage rendant difficile l'énoncé d'une théorie unifiée pour expliquer le mécanisme de claquage. Cependant, c'est selon les processus de préclaquage, qu'on classe les mécanismes de claquage des diélectriques solides. Cette classification diffère selon les auteurs et n'est que conventionnelle. En général, on distingue trois types de mécanismes de claquage des isolants solides [16] [2] :

- le claquage "électrique",
- le claquage "thermique",
- le claquage "électromécanique".

A ceux-ci, il faut ajouter d'autres phénomènes secondaires liés à des défauts de jeunesse introduits lors de la fabrication, à des défauts apparaissant dans le temps (vieillesse) dans le volume (cavités gazeuses ou impuretés) ou à la surface du matériau, au mode opératoire et aux conditions expérimentales. Dans ces cas, on parle de claquage par ionisation (décharges partielles) et de claquage par vieillissement qui est le but de ce projet.

#### II.4.5. Claquage du à d'autres phénomènes

Dans la pratique, le claquage diélectrique des isolants solides survient le plus souvent à des valeurs de champ électrique inférieures à celles prévues par les théories précédentes.

Ceci est dû à la présence de défauts comme les cavités gazeuses où des décharges partielles peuvent prendre naissance, les inclusions conductrices et la charge d'espace pouvant conduire à des renforcements locaux du champ électrique.

### **II.4.5.1. Décharges partielles**

Il est connu depuis de nombreuses années que les décharges partielles affectent gravement les isolants solides. Elles prennent naissance aux bords des électrodes ou dans des inclusions ou cavités gazeuses que peut renfermer le matériau dès que la tension appliquée atteint la tension seuil correspondant au minimum de Paschen du gaz en présence (air ou autres). Leur action peut conduire à des transformations chimiques radicales (scission de la liaison moléculaire sous l'effet du bombardement électronique et ionique, échauffement local, création de radicaux,...) entraînant la dégradation du matériau voire sa défaillance, à la suite de l'un des processus suivants:

- Propagation à travers le matériau de canaux microscopiques (arborescence)
- Echauffement cumulatif par les décharges
- Cheminement superficiel ou contournement.

### **II.4.5.2 Charge d'espace**

La charge d'espace dans le diélectrique peut être due à différents facteurs lors de l'évolution du claquage. L'une des causes peut être par exemple l'apparition dans le diélectrique, lors de l'évolution de l'avalanche, de trous (charges positives) dont la densité est importante si l'avalanche est suffisamment grande. La charge d'espace peut également apparaître suite au piégeage d'électrons fournis au diélectrique par la cathode. Les théories considérant l'influence de la charge d'espace sont nombreuses et très complexes.

### **II.4.6. Les polymères isolants**

Lors d'une réaction chimique, dite de polymérisations, certaines molécules simples peuvent s'unir de façon à former une grosse molécule contenant plusieurs fois la molécule

initial .on dit alors que la nouvelle substance ainsi formée est un polymère. Tous les isolants synthétiques sont des polymères. Le caoutchouc naturel, les résines, les vernis et la bakélite sont des polymères [11].

Les polymères isolants sont largement utilisés, ils occupent une place de plus en plus importante dans notre société de plus en plus utilisés, ils sont présents dans notre vie de tous les jours, composent quasiment la totalité des emballages commerciaux et dans les équipements électriques, pour les avantages qu'ils présentent: rigidité électrique élevée, faibles pertes diélectriques, faible poids, esthétiques, hydrophobicité élevée et bonne propriété mécanique, et sont d'une manière générale très utilisés dans toute pièce industrielle. .

#### II.4.6.1.Définition

Les polymères sont des matériaux constitués de longues chaînes macromoléculaires formées par les répétitions d'une ou plusieurs unités de base (monomères). Les atomes sont liées entre eux par des liaisons de types van der waals. Le degré de polymérisation est défini par le nombre moyen de monomères qui constituent la macromolécule [12].

Selon leurs composition et leurs parties constituantes, les polymères peuvent être subdivisés en grandes classes comme les polyvinylyles, les polyuréthanes, les polyesters, les polyamides, ....etc. [11]

#### II.4.6.2 Polymérisation [17]

Procédé de transformation d'un monomère en un polymère (polymérisation) ou d'un mélange de deux (ou plus) monomères en un copolymère (copolymérisation).

La réaction qui conduit à la formation des polymères est la polymérisation. Il existe de multiples types de polymérisation. Nous nous contenterons d'expliquer deux sortes importantes.

- **Polymérisation en chaîne:** Les monomères s'associent sans réaction d'élimination simultanée. C'est le procédé le plus utilisé dans l'industrie: le polyéthylène, le polypropylène,

le polystyrène, l'alcool polyvinylique et polytétrafluoroéthylène (Téflon) sont des exemples de polymères obtenus par polymérisation en chaîne. Comme toute réaction en chaîne, cette polymérisation comporte les étapes suivantes [17]:

- ✓ **l'amorçage** (formation des centres actifs à partir du monomère);
- ✓ **la propagation** (croissance des chaînes de polymère par additions successives);
- ✓ **la terminaison** (destruction du centre actif et interruption de la croissance des chaînes).

La polymérisation peut être radicalaire, cationique ou anionique selon la nature de l'espèce active.

- **Polymérisation par condensation**

Au cours de la polycondensation, les monomères s'associent avec élimination simultanée d'atomes ou de groupes d'atomes. Les polyamides, les polyesters et certains polyuréthanes sont des exemples typiques de polymères obtenus par polycondensation.

Dans ce cas, les réactions qui démarrent la polymérisation, appelées réactions d'initiation, sont de type ionique. Par un choix judicieux du groupement ionique initiateur, on peut dans certains cas obtenir une réaction stéréospécifique, c'est-à-dire que la disposition des monomères dans le polymère n'est pas aléatoire, mais au contraire orientée. C'est la seule façon d'obtenir des polymères semi-cristallins aux propriétés mécaniques particulières, et qui ont, par exemple, donné lieu à des applications dans le domaine des élastomères de synthèse [17].

Alors que dans la polymérisation par addition, tous les atomes des monomères se retrouvaient dans le polymère, la polymérisation par condensation entraîne des réactions chimiques qui produisent la formation de sous-produits. Les réactions de polycondensation sont des réactions par étapes. Les deux monomères en présence donnent naissance à une molécule intermédiaire, laquelle constitue l'élément fondamental qui se répète dans la macromolécule [17].

- Les Grandes Familles de polymères (selon la polymérisation)

- **Thermoplastiques** (par addition) : Matière plastique retrouvant sa plasticité à chaud et durcissant lors du refroidissement.

Exemples de thermoplastes :

Le polychlorure de vinyle (PVC)

-Les résines acryliques (PMMA - plexiglas)

-Les polyéthylènes

-Les polyamides

-Les polycarbonates

- **Thermodurcissables** (par condensation) Se dit d'une matière plastique qui perd définitivement son élasticité sous l'action de la chaleur.

Exemples de Thermodurcissables

-Les époxydes (Araldit)

-Les polyesters non linéaires (CR 39)

-Les phénoplastes (Bakélite)

**Elastomères** (par réticulation) Polymère synthétique possédant les propriétés du caoutchouc naturel, telles qu'une grande capacité d'extensibilité et de reprise élastique.

Exemples d'élastomères

- Le polychloropène (néoprène)

- Le caoutchouc

### II.4.6.3 Quelques caractéristiques des polymères

Les performances des polymères vont dépendre de leurs caractéristiques: leur masse molaire, leur charge ionique, leur degré de dissociation, leur flexibilité et de leur conformation et de la balance hydrophile/hydrophobe .

### II.4.6.4. Les propriétés des polymères:

#### II.4.6.4.1. Résistivité

En tension continue la résistivité d'un diélectrique  $\rho_{ccs}$  et le quotient du gradient de potentiel en surface par le courant par unité de largeur :  $P_{ccs} = PR_S/g$

Où :  $P = \pi D_0$  est le périmètre moyen entre l'électrode et la contre-électrode.

Avec :  $D_0 = (D_1 + D_2)$  ;  $g = (D_2 - D_1)/2$  ;  $R_S$  la résistance superficielle en tension continue [8].

Pour que les polymères puissent être utilisés comme isolants ils doivent avoir une résistivité élevée, supérieure à  $10^9 \Omega \cdot \text{cm}$ .

#### II.4.6.4.2. Rigidité électrique

La rigidité électrique c'est la valeur maximale du champ électrique que l'on peut appliquer à un isolant sans que se produise un claquage [8].

Dans le cas de champ uniforme la rigidité est donnée par  $E_d = U/d$

$U$  : tension maximale appliquée

$d$  : épaisseur d'isolant

La rigidité intrinsèque du polymère peut atteindre plusieurs centaines de kV/mm, mais leur rigidité pratique est souvent limitée, elle varie pour les polymères les plus utilisés de 10 à 24kV/mm.

Divers paramètres ont une influence sur la rigidité diélectrique tels que la forme de la tension appliquée, la température et l'épaisseur du solide isolant, ainsi que les caractéristiques électriques et thermique du milieu ambiant :

- Des décharges superficielles qui peuvent se produire dans l'air.
- La permittivité et la résistivité du milieu ambiant modifiant la répartition du champ électrique.

#### II.4.6.4.3. Pertes diélectriques [8]

Les diélectriques réels présentent toujours des pertes diélectriques dues à la conduction ohmique, même très faible dans la plupart des isolants, mais surtout la relaxation qui peut être importante en tension alternative. En effet, le retard de la polarisation du diélectrique provoque des pertes diélectriques représentées par le facteur de dissipation  $tg\delta$

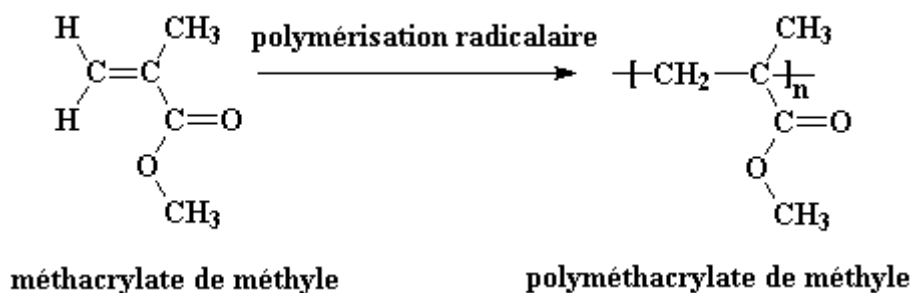
$$tg\delta = \frac{\epsilon_r''}{\epsilon_r'}$$

Avec :  $\delta$  angle de pertes, c'est l'angle complémentaire du déphasage entre la tension appliquée au diélectrique et le courant qui en résulte.

Dans ce projet, le polymère qui a été utilisé est le : PMMA, SAN et PS.

#### II.4.7. Le PMMA

Le polyméthacrylate de méthyle (PMMA) appelé Plexiglas par la compagnie chimique Rohm and Haas est un polymère thermoplastique. Le PMMA est obtenu par polymérisation radicalaire. La cohésion est assurée par des enchevêtrements de chaînes ainsi que des liaisons faibles de type hydrogène et Van der Waals. La température de transition vitreuse du PMMA se situe entre 105 et 130°C, et la transition  $b$  se situe vers les 200°C. Le PMMA est un matériau qui présente une excellente transparence. Le PMMA est un polymère très répandu qui a fait l'objet de nombreuses études ce qui en fait un polymère modèle [17].



#### II.4.8. Caractéristiques principales du PMMA

- Transparence exceptionnelle (supérieure au verre)

- Facilité de coloration, décoration, métallisation
- Formage, usinage et collage facile
- Bonne tenue aux UV et au vieillissement,
- Brillant
- Rigidité de 5 à 20 Kv\ mm.
- Bonne isolation électrique
- Apte à l'usage alimentaire
- Bonne qualité mécanique
- Excellence propriété optique

- Malgré tout le PMMA est assez fragile et brûle facilement. Il a une faible résistance aux solvants, particulièrement aux carburants.

- Le PMMA a une assez faible résistance à l'abrasion.

- Le PMMA ne peut pas être utilisé pour fermer des machines industrielles, il est nécessaire d'utiliser du polycarbonate qui ne présente pas de danger lorsqu'il se brise.

## **II. 5. Grandeurs mesurées et appareils de mesures**

L'étude générale d'un dispositif électrique a montré la nécessité de l'utilisation d'appareils divers, ces appareils sont désignés sous la rubrique « appareillage électrique ». L'appareillage représente l'ensemble des appareils de commande, de protection, de sécurité et de contrôle.

Dans les installations haute tension où la tension atteint des valeurs élevées, en utilisant des appareils qui tout en ayant la même constitution générale que celle des appareils BT, différent sensiblement de ceux-ci.

Les différences essentielles concernent les conditions d'isolement, les moyens mis en œuvre pour lutter contre les effets de l'arc lors des coupures et les dispositions prises pour augmenter la sécurité du personnel.

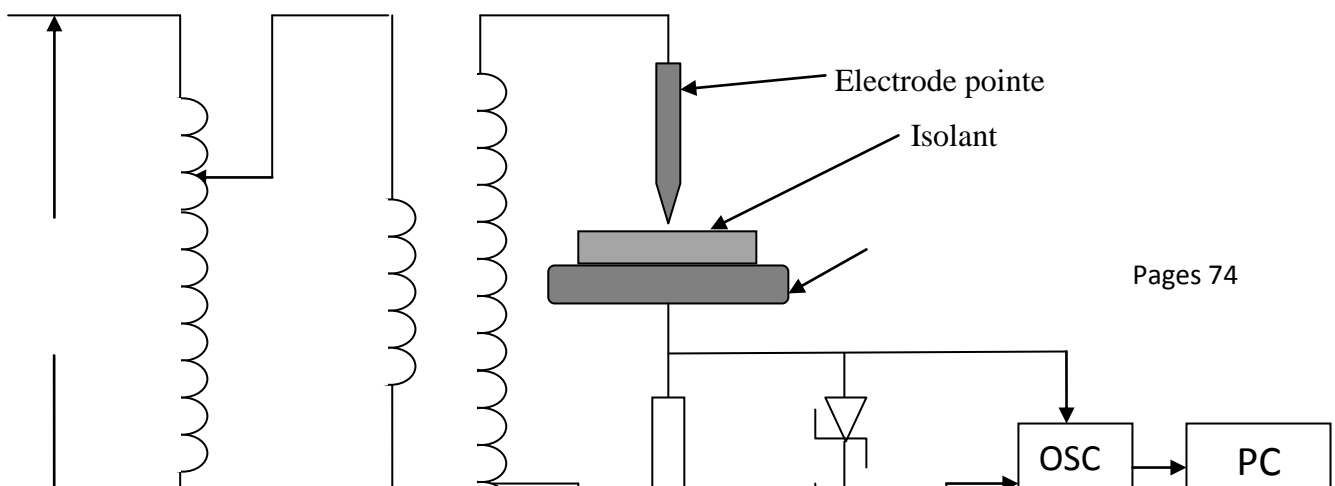
Afin d'étudier les courants de décharges de surface, on utilise l'oscilloscope numérique à mémoire à bande passante grande.

### II.5.1. L'oscilloscope à mémoire

L'oscilloscope n'est pas un appareil destiné pour la mesure en HT, mais il permet d'enregistrer en mémoire les tensions très brèves comme les ondes de choc. Ils sont généralement utilisés dans les expériences brusques et brèves, telles que le contournement ou le claquage. Ils offrent l'avantage de visualiser l'allure de la tension et donnent la valeur crête de la tension, il nous permet l'examen de certains phénomènes électriques : étude de la sinusoïde du courant alternatif ; étude de déphasage, étude de la forme des signaux d'impulsion et mesure du temps de monté [18].

### II.6. Montage expérimentale

Le dispositif expérimental utilisé dans notre étude pour analyser les caractéristiques électriques des décharges développant dans les interfaces solides\ air considérés, est schématisé sur la fig. II.9 :



380 V  
50 Hz

Electrode plane

V R Z

Autotransformateur

Transformateur  
100 kV-10 k VA 50Hz

Z : diode Zener  
R : résistance de mesure  
OSC : oscilloscope  
V : mesure de la tension

### Fig. II.9. Schéma du dispositif expérimental

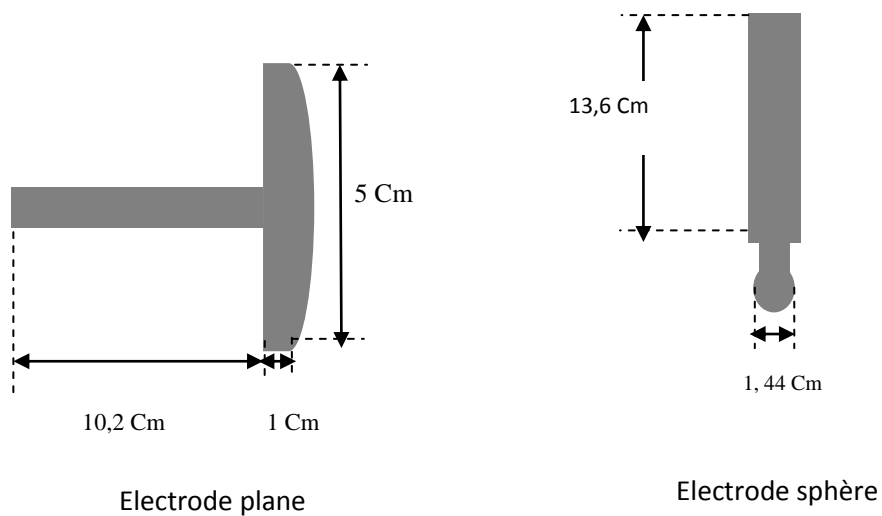
- Les décharges glissantes sont obtenues à l'aide de deux électrodes, l'une pointue et l'autre plane. L'électrode pointue a été reliée à la borne haute tension du transformateur d'essai, et l'électrode plane à la masse. L'ensemble est placé dans l'air.

L'électrode plane a la forme d'un disque plan dont les bords sont profilés selon Rogowski.

Pour un tel système, le champ n'est pas uniforme au niveau des bords des électrodes. Le champ électrique y est plus intense. Pour supprimer l'effet des bords, on les arrondit en leur donnant un rayon de courbure bien déterminé.

Ce disque a un diamètre de 5 cm, une épaisseur de 1cm avec un bord de rayon de courbure de 0,5 cm.

- Pour éviter l'apparition de décharges partielles entre l'électrode plane et l'échantillon PMMA on colle sur sa face postérieure une feuille d'aluminium de 7 cm de diamètre avec l'huile de borak qui aura le rôle d'une électrode plane.



**Fig.2.10. Système d'électrode pointe - plane**

- Les échantillons que nous avons utilisés sont de forme carrée (10 cm×10cm) en PMMA. Pour chaque essai, nous utiliseront un échantillon différent.
- Avant chaque essai, l'échantillon doit être bien nettoyé avec de l'accol, puis séché.
- Pour étudier le courant de décharge de surface, on a utilisé un oscilloscope numérique à mémoire HAMEG 1507 qu'on a branché aux bornes d'une résistance R dont la valeur est de 940  $\Omega$ .

- L'oscilloscope à mémoire offre l'avantage de faciliter l'acquisition de signaux de fréquence élevée. Sa bande passante est de 150MHz de sorte qu'il puisse enregistrer des signaux qui ont un temps très court, une impédance d'entrée de  $10M\Omega$ , et un taux d'échantillonnage de 200 MS /s, ce qui facilite l'interprétation des signaux acquis.
- Les informations obtenues et enregistrées par l'oscilloscope sont transmises via une interface RS232 à un ordinateur pour pouvoir traiter les différents résultats.

-Pour assurer la protection de l'oscilloscope contre une éventuelle surtension, nous avons placé des diodes Zener qui court-circuiteront la résistance de mesure R dès que la tension atteindra une valeur limite qui a été fixée à ses bornes.

L'oscilloscope est utilisé en mode dual pour visualiser simultanément la tension appliqué à l'échantillon et le courant de décharge et en mode single pour enregistrer la forme des impulsions de courant.

## **II.7. Essais préliminaires**

Une fois le montage expérimental est prêt, nous devons alors faire quelques essais préliminaires dans un montage simple, pour cela nous avons mesuré la tension de la source d'alimentation fournie par le réseau (220V), afin de se familiariser avec le logiciel fournis avec l'oscilloscope ainsi que les différentes fonction de l'oscilloscope.

Les essais préliminaires sont nécessaires pour la mise en forme des essais expérimentaux, nous permettent de prendre une marge sécuritaire pour le matériel afin d'éviter le contournement de l'isolation solide qui risque d'endommager l'oscilloscope.

Les principales instructions qui aident à l'utilisation de ce logiciel nous les avons rassemblées dans l'annexe I.

Lors des essais préliminaires, nous avons constaté la présence de parasites qui peuvent influencer les mesures, donc les fausser. Pour atténuer leur influence, à défaut de les éliminer complètement, nous avons mis à la même terre toutes les masses et nous avons utilisé des câbles coaxiaux.

## **Conclusion**

Nous avons décrit dans ce chapitre les différentes installations et équipements utilisés dans nos investigations expérimentales, pour étudier les décharges surfaciques à l'interface solide\ air. Le système d'enregistrement des phénomènes d'apparition des courants de décharge un des éléments essentiels des équipements utilisés est aussi présenté.

---

# **Chapitre III**

## **Résultats expérimentaux**

### **et interprétation**

---

### **III.1. Introduction**

Le courant de décharge électrique est l'un des facteurs majeurs responsables de la dégradation des isolants électriques.

Dans ce chapitre nous présentons les résultats expérimentaux obtenus avec les modestes moyens du laboratoire de haute tension, on s'intéresse à l'étude des courants de décharge pour les échantillons de PMMA, nous analyserons les courbes enregistrées à l'aide d'un oscilloscope à mémoire. Nous discuterons leur forme : temps de montée, temps de descente et amplitude. Nous étudierons l'influence de la tension appliquée, l'épaisseur de l'isolant, et l'insertion de la couche d'air de différentes distances, et le vieillissement sur le courant de décharge maximum.

Les mesures des courants associés ont été simultanément effectuées avec l'enregistrement de la décharge en polarité positive et négative à l'aide d'un oscilloscope à mémoire connecté à la cellule. La procédure expérimentale a été décrite dans le chapitre II.

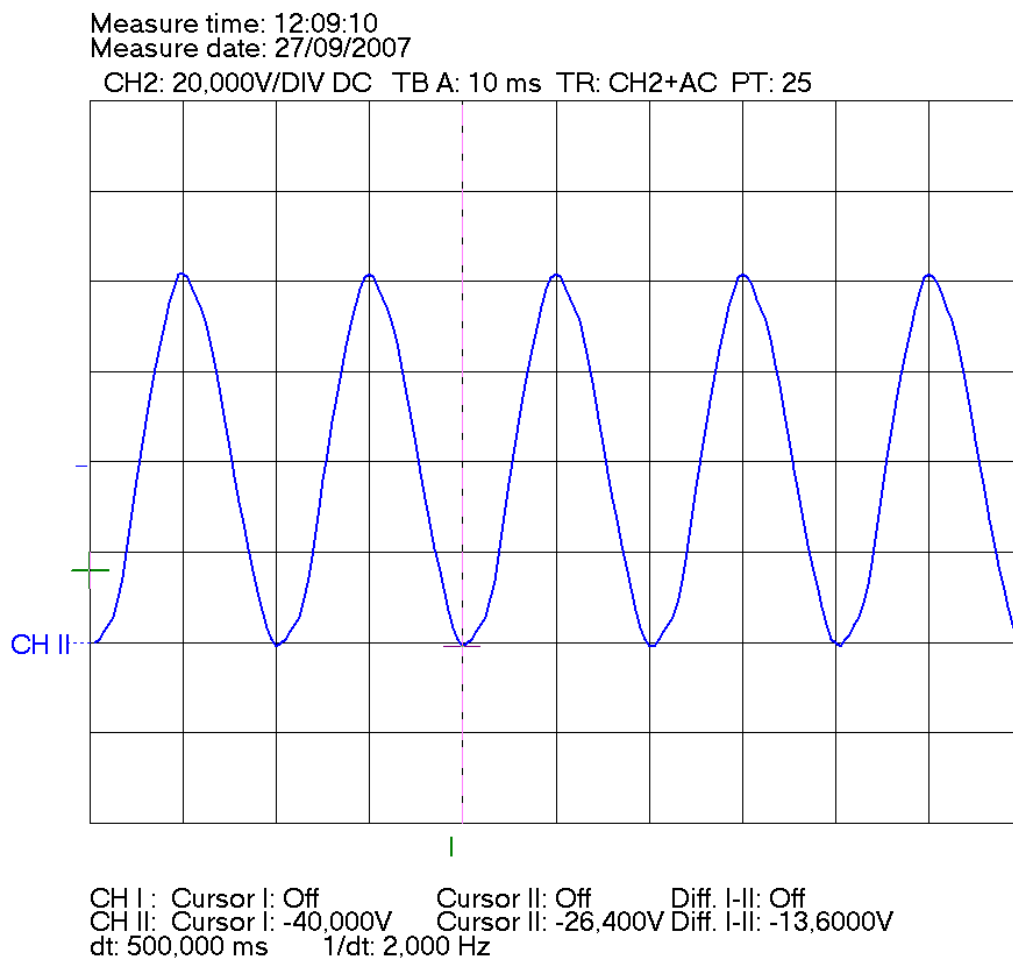
### **III.2. formes des impulsions du courant de décharge**

#### **a) Essai préliminaire**

Nous avons réalisé un essai préliminaire sur la tension du réseau de SONELGAZ (220 V) afin d'apprendre l'utilisation du logiciel SP107 de l'oscilloscope ainsi les options et la fonctionnalité de chaque bouton de l'oscilloscope, le signal obtenu durant cette essai est représenté sur la figure III.1.

#### **b) Forme du courant**

Le courant de décharge est sous forme d'impulsions positives et négatives de courte durée et de différentes amplitudes qui ont été mesurés à l'aide d'un oscilloscope a mémoire, la forme de ces courants est représenté sur la figure III.2 et III.3.



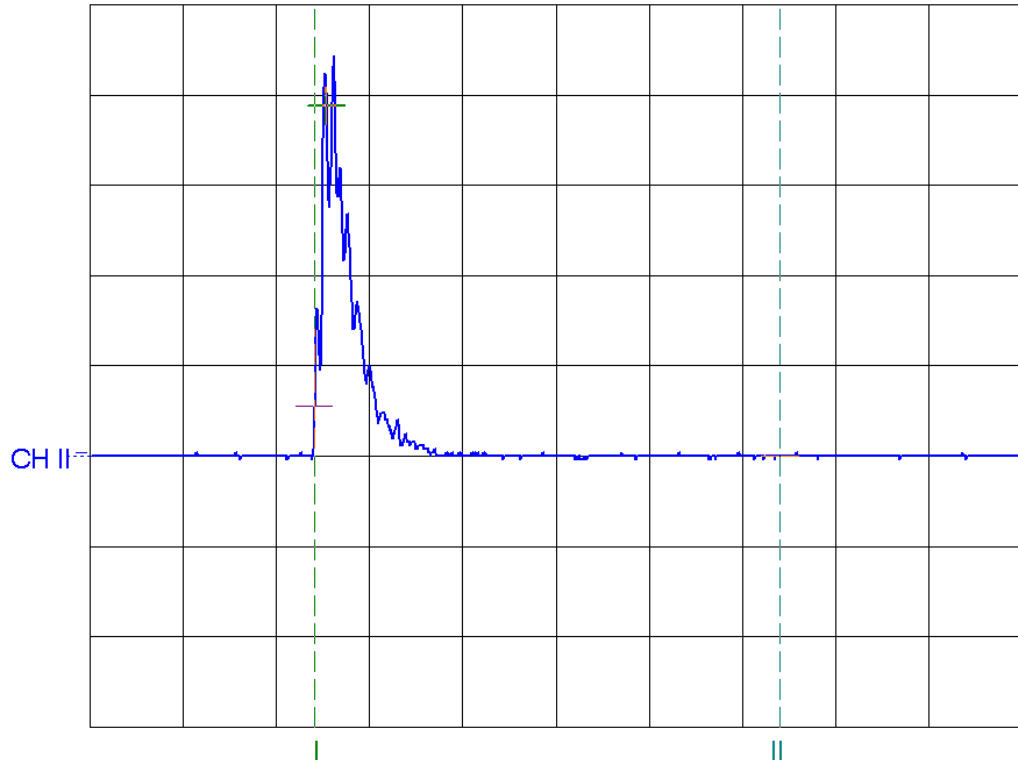
**Figure III.1 : courbe de la tension d'essai préliminaire**

### III.2.1. Forme du courant associé en polarité positive

En polarité positive, le courant associé à la décharge mesuré sur un échantillon de PMMA de 3 mm d'épaisseur est constitué de plusieurs pics discrets dont l'amplitude maximale dépend de la tension appliquée. Les impulsions ont une amplitude importante au début de l'enregistrement et une durée brève correspondant au front de montée de la tension.

Measure time: 13:10:57  
Measure date: 28/09/2007

CH2: 5.000V/DIV AC TB A: 500 ns TR: CH2+AC PT: 25

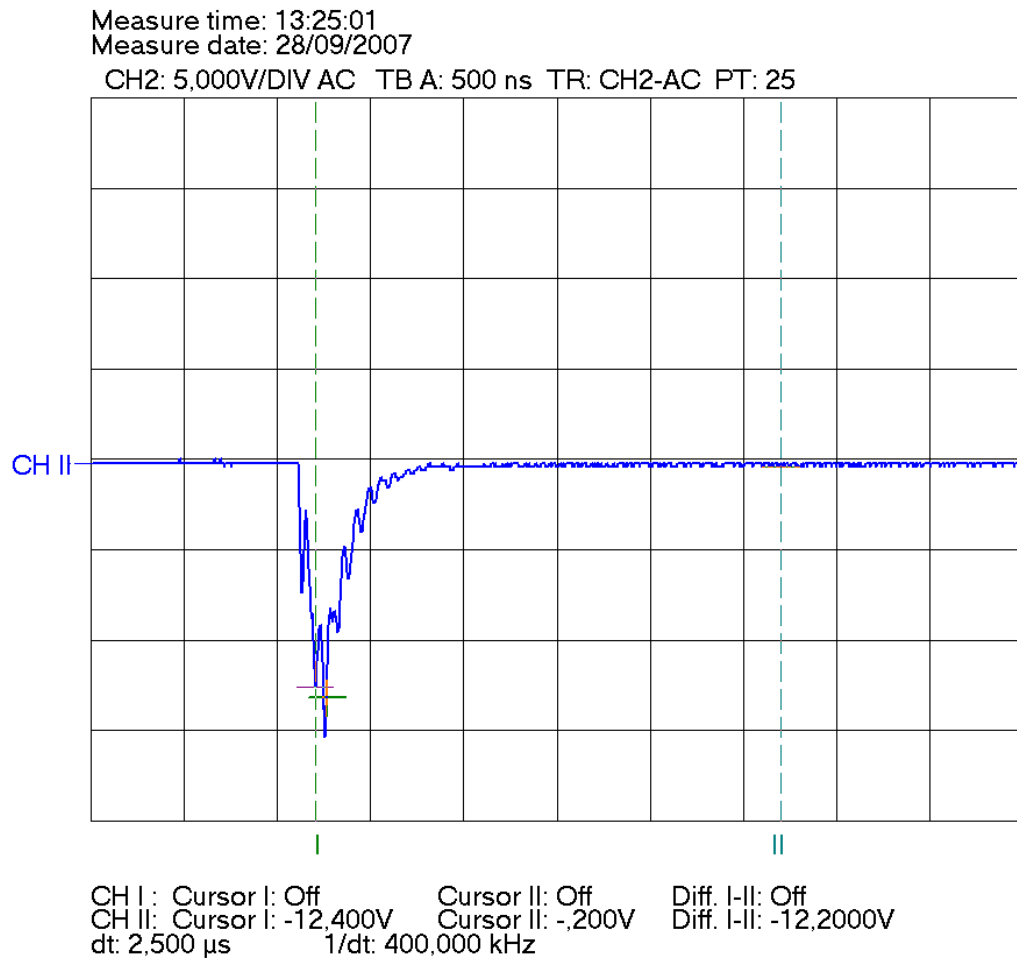


CH I : Cursor I: Off      Cursor II: Off      Diff. I-II: Off  
CH II: Cursor I: 2,600V      Cursor II: -,200V      Diff. I-II: 2,8000V  
dt: 2,500  $\mu$ s      1/dt: 400,000 kHz

**Figure III.2 impulsion positif sous tension 12 kV**

### III.2.2. Forme du courant associé en polarité négative

Les enregistrements de courants de décharges mesurés en polarité négative sont illustrés par la figure III.3, ils ont également été obtenus avec le même matériau et dans les mêmes conditions expérimentales que dans le cas de la polarité positive.



**Figure III.3 impulsion de courant négative sous 12 kV**

### III.2.3. Interprétation des résultats

Le courant est constitué de plusieurs impulsions discrètes (figures III.2 et III.3) dont l'amplitude croît avec la tension appliquée. Le courant apparaît juste après l'application de la tension. En augmentant la tension, on remarque que les impulsions des courants associés en

alternances positive et négative augmentent en nombre et en amplitude, cela signifie que l'énergie des décharges augmente avec la tension

Lors de nos essais, nous avons remarqué que :

- Les impulsions négatives sont plus nombreuses que celles de positives, par contre l'amplitude des impulsions est plus importante en polarité positive qu'en polarité négative.
- Il n'est pas toujours facile de repérer pour une impulsion, l'origine de temps de montée qui est souvent brouillée par des oscillations parasites. De plus, la crête de l'onde était souvent déformée, l'instant où l'impulsion atteint le maximum ne peut pas être repéré avec précision.
- Le temps de montée est dans toutes les impulsions toujours inférieur au temps de descente, ceci peut être expliqué par le fait que le temps de montée des impulsions correspond à la mobilité des électrons qui est beaucoup plus grande que celle des ions positifs qui sont à l'origine du temps de descente.
- Le temps de montée des impulsions de courant positives est plus grand que celui des impulsions négatives, et une légère différence en ce qui concerne le temps de descente.
- Sur une base de temps relativement large, les enregistrements de courants associés aux décharges révèlent l'existence d'une décharge secondaire qui se manifeste approximativement autour de 50 à 60  $\mu$ s après l'apparition de la décharge principale. Le courant correspondant à la décharge secondaire est d'amplitude moindre et de signe opposé à celui de la tension appliquée. En d'autres termes, il est positif pour une tension négative et vice versa avec une amplitude plus faible. Ce phénomène a été observé pour les deux polarités.

Cela pourrait s'expliquer par l'accumulation de charges surfaciques à la surface du diélectrique solide. Notons que le temps d'apparition des décharges secondaires pourrait varier en fonction du caractère aléatoire des charges surfaciques.

### **III.3. Influence du vieillissement sur le courant de décharge**

L'étude du courant de décharge s'effectue sur chaque échantillon du PMMA de 3mm en fonction de l'épaisseur de la couche d'air « g » et du temps d'application de la tension « t »,

Les résultats obtenus sont représentés sur les tableaux ci-dessous III.1, III.2, III.3, III.4 et III.5 :

**Tableau III.1 : La couche d'air « g » est 3 mm pour une tension de 12kV**

<b>temps</b>	<b>0 min</b>	<b>30 min</b>	<b>1h</b>	<b>1h30min</b>	<b>2h</b>
<b><math>I_{\max}^+</math> (mA)</b>	<b>451</b>	<b>336</b>	<b>381</b>	<b>323</b>	<b>297</b>
<b><math>I_{\max}^-</math> (mA)</b>	<b>169</b>	<b>184</b>	<b>187</b>	<b>146</b>	<b>139</b>

**Tableau III.2 : La couche d'air « g » est 4 mm**

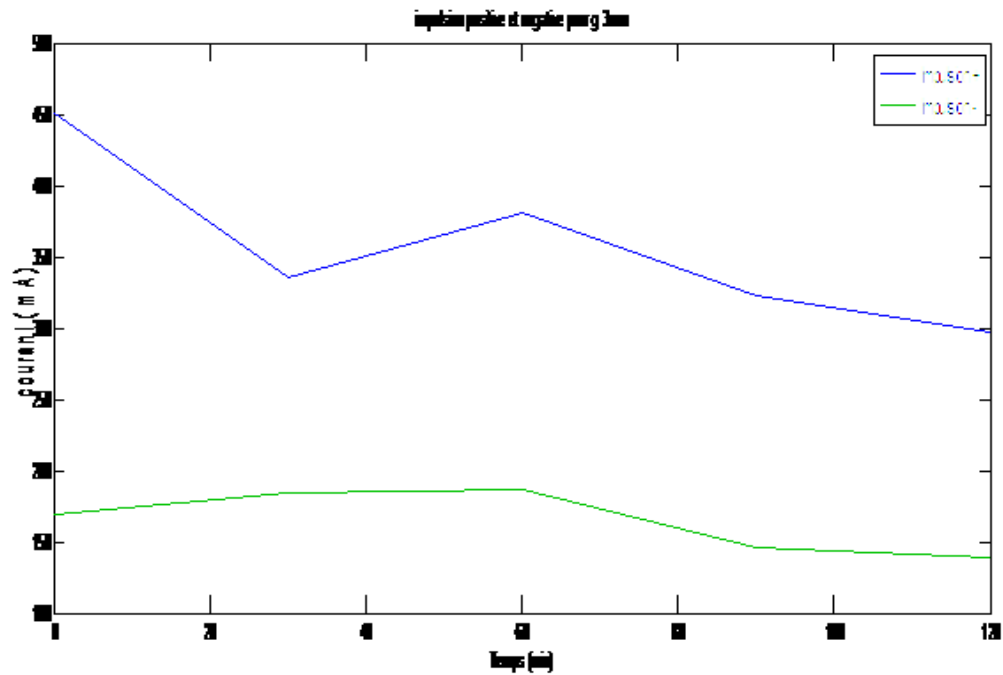
<b>temps</b>	<b>0 min</b>	<b>30 min</b>	<b>1h</b>	<b>1h30min</b>	<b>2h</b>
<b><math>I_{\max}^+</math> (mA)</b>	<b>294</b>	<b>321</b>	<b>714</b>	<b>663</b>	<b>629</b>
<b><math>I_{\max}^-</math> (mA)</b>	<b>113</b>	<b>105</b>	<b>159</b>	<b>169</b>	<b>172</b>

**Tableau III.3 : La couche d'air « g » est 8 mm**

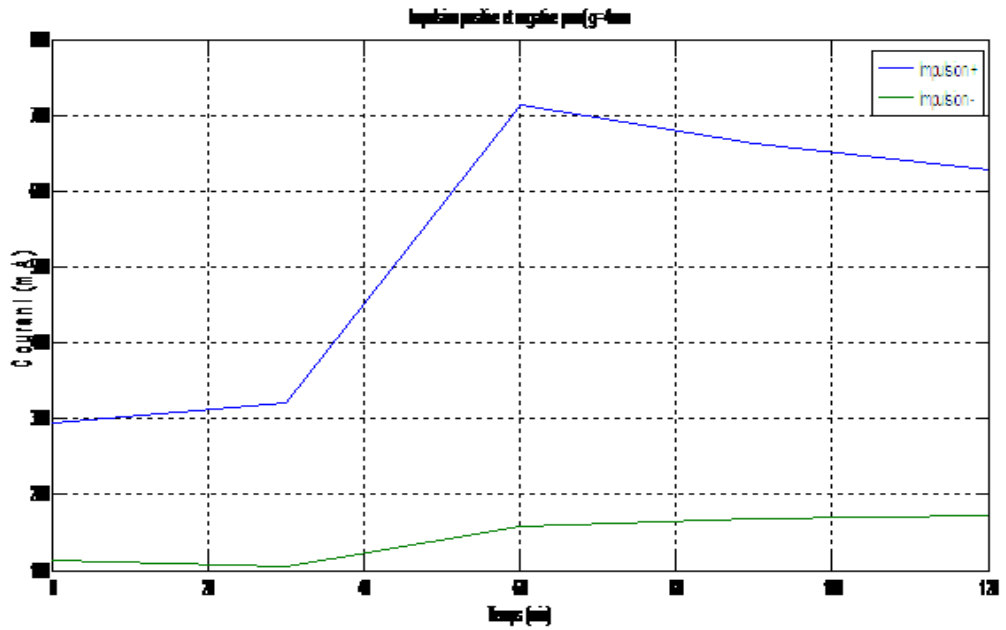
<b>temps</b>	<b>0 min</b>	<b>30 min</b>	<b>1h</b>	<b>1h30min</b>	<b>2h</b>
<b><math>I_{\max}^+</math>(mA)</b>	<b>111</b>	<b>73,6</b>	<b>61,7</b>		
<b><math>I_{\max}^-</math>(mA)</b>	<b>79,6</b>	<b>89,6</b>	<b>113</b>		

La variation de l'amplitude du courant maximum de décharge de surface en fonction du temps de vieillissement pour une épaisseur de la couche d'air de 3 à 4 mm sous tension fixe de 12kV en polarité positive et négative est représentée par les graphes des figures III.4 et III.5 respectivement.

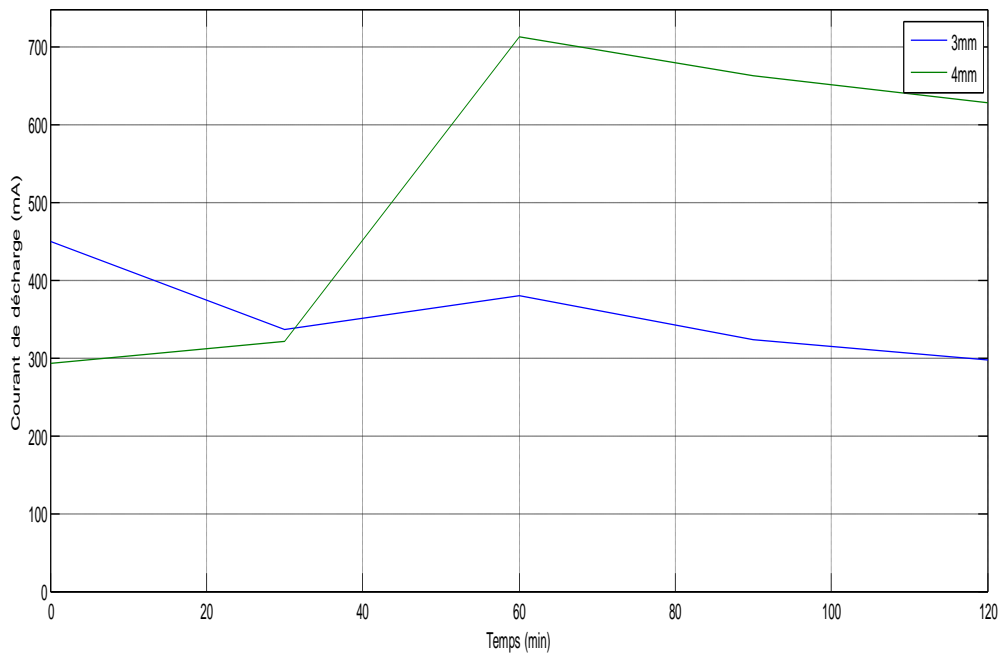
Les figures III.6 et III.7 montrent la variation du courant en fonction du temps de vieillissement.



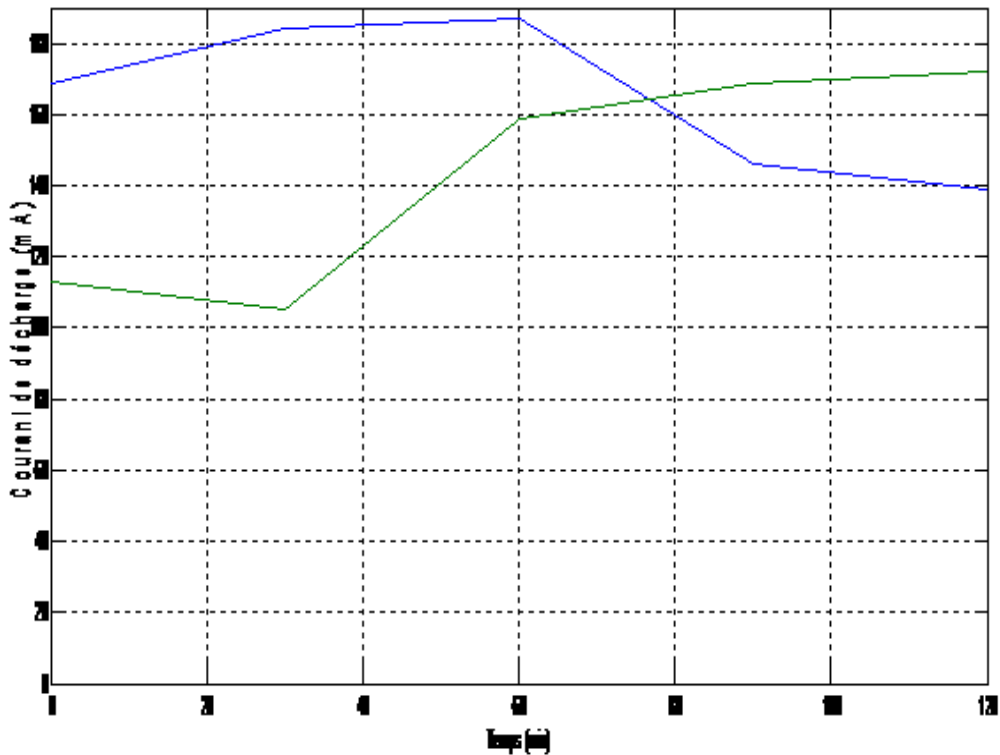
**Figure III.4 : variation du courant de décharge en fonction du vieillissement pour une épaisseur de la couche d'air de 3mm**



**Figure III.5 : variation du courant de décharge en fonction du vieillissement pour une épaisseur de la couche d'air de 4mm**



**Figure III.6 Influence du vieillissement sur les impulsions positives du courant de décharge pour différentes distances inter-électrode**



**Figure III.7 Influence du vieillissement sur les impulsions négatives du courant de décharge pour différentes distance inter-électrode**

La figure III.4 montre que l'amplitude des impulsions diminue en fonction du temps de vieillissement.

Alors que la figure III.5 nous montre que l'amplitude des impulsions de courant augmentent avec le vieillissement pour les deux polarités, il croît avec le temps jusqu'à environ 60 min puis diminue légèrement jusqu'à ce qu'il se stabilise après un vieillissement de 80mn.

On ne peut pas tirer de conclusion fiable de ces résultats, car le temps de vieillissement est insuffisant pour pouvoir interpréter les courbes convenablement.

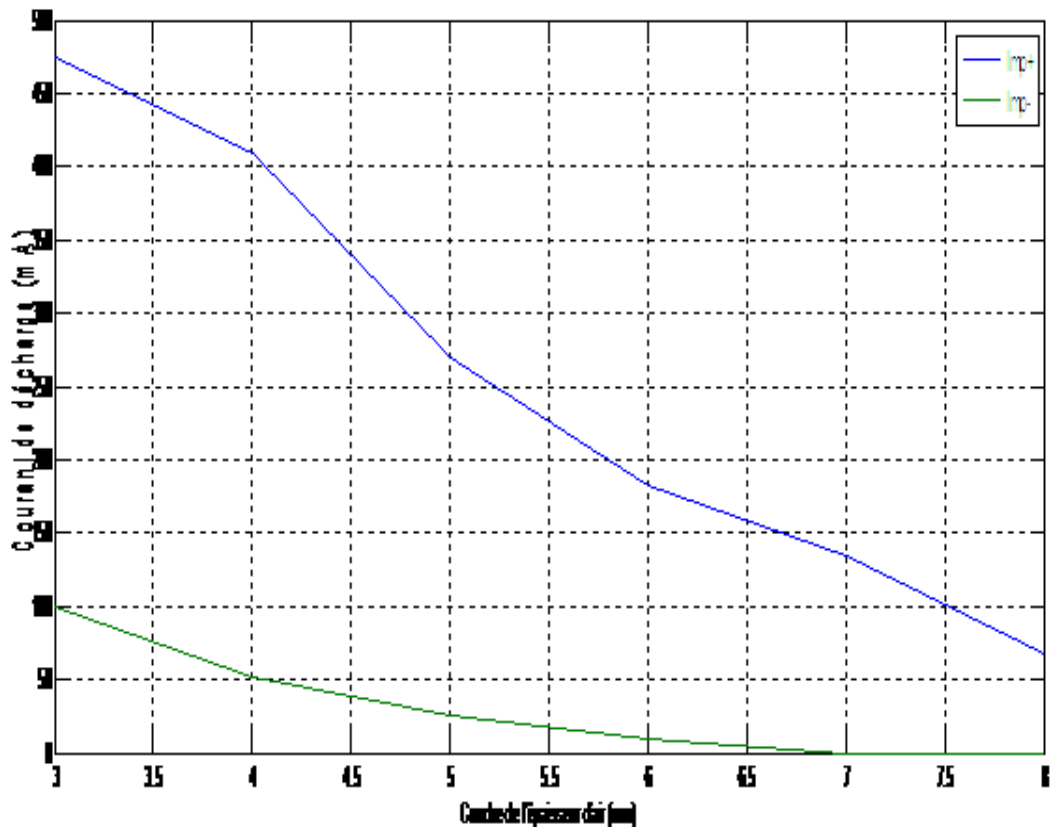
### III.4. Influence de l'épaisseur de la couche d'air sur le courant maximum de décharge

Nous avons fait varier l'épaisseur de la couche d'air entre la pointe de l'électrode haute tension et l'isolant solide de 3mm d'épaisseur de telle sorte que la décharge se produit dans le volume d'air avant d'atteindre la surface de l'isolant solide.

Le graphe de la figure III.8 représente les impulsions positives et négatives maximale en fonction de la distance de l'électrode « g ». la tension appliquée est de 12 kV.

**Tableau III.4 variation du courant en fonction de la couche d'air**

Distance (mm)	3	4	5	6	7	8
$I_{\max}^+$ (mA)	473.86	409.56	269.56	182.6	134.78	67.39
$I_{\max}^-$ (mA)	100	52.1	26	9	0	0



**Figure III.8: Influence de l'épaisseur de la couche d'air sur les impulsions positive et négatives du courant de décharge**

Il est clair que l'amplitude des impulsions de courant de décharge diminue avec l'augmentation de l'épaisseur de la couche d'air pour les deux polarités, ce qui est évident puisque le champ électrique diminue avec l'augmentation de la distance inter – électrodes.

L'amplitude des impulsions positive est supérieure à celle négative quel que soit la couche d'air

### III.4.1. Interprétation du résultat

L'épaisseur de la couche d'air influe énormément sur la décharge surfacique. Plus le matériau est mince, plus les courants de décharge sont importants et vis - versa

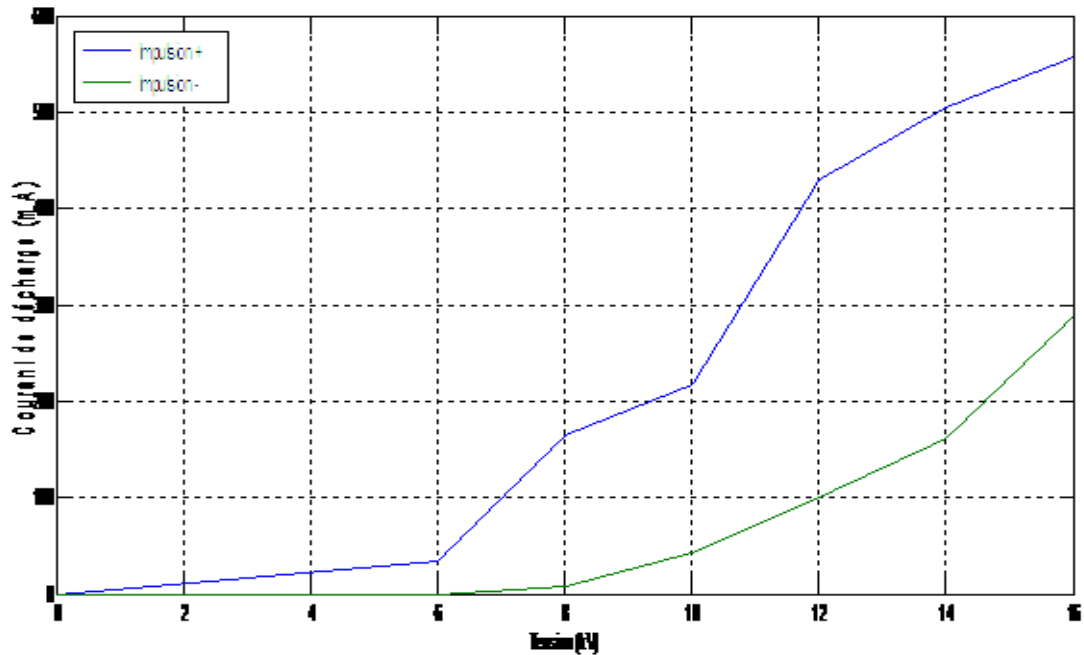
On peut expliquer cela par le fait que l'activité électronique de la décharge diminue avec l'augmentation de l'intervalle d'air, puisque plus la distance est grande plus le champ diminuera, ce qui explique la diminution de la décharge, donc l'activité de la décharge, c.à.d. le processus d'ionisation.

### III.5. Influence de la tension appliquée sur le courant maximum de décharge

Le graphe de la figure III.9 représente la variation de l'amplitude maximum des impulsions de courant en polarités positive et négative en fonction la tension  $U$  appliquée aux bornes des électrodes pour une épaisseur de 3mm.

**Tableau III.5. Variation du courant en fonction de la tension appliquée.**

U(kV)	6	8	10	12	14	16
$I_{\max}^+$ (mA)	34.78	165.21	217.39	430.43	504.34	557.6
$I_{\max}^-$ (mA)	0	8.6	43.47	100	161	289.13



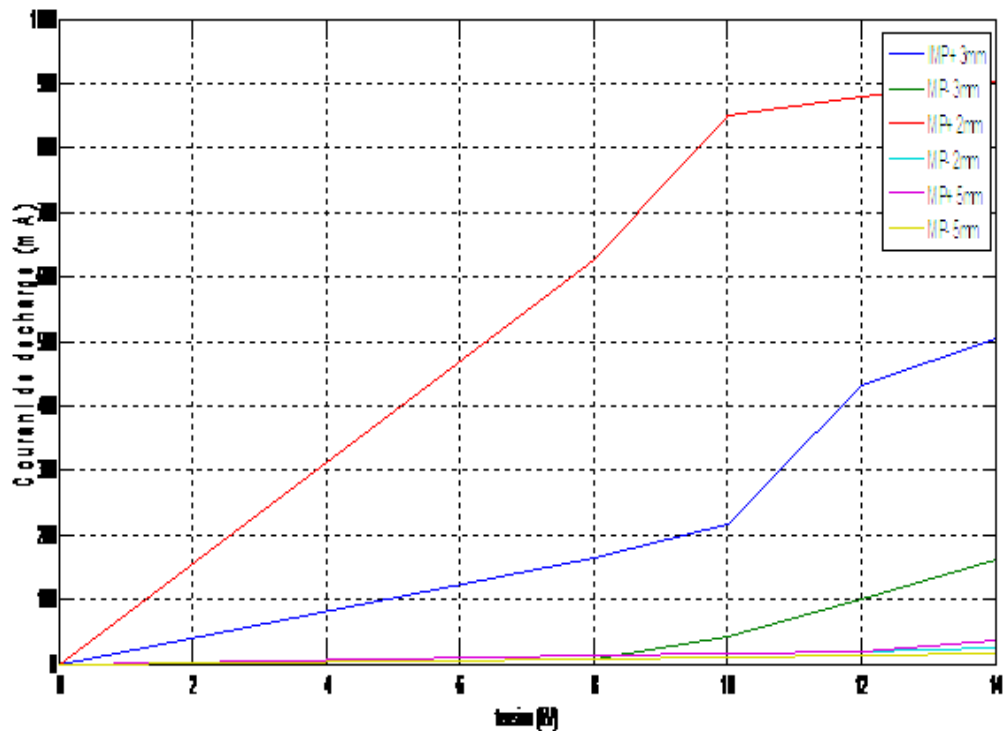
**Figure III.9 : Influence de la tension sur l’amplitude des impulsions du courant de décharge**

Nous constatons que l’amplitude de courant augmente avec la tension appliquée pour les deux polarités. L’amplitude des impulsions positives est 3 à 4 fois plus grande que celle des impulsions négatives. Cela pourrait s’expliquer par ce qu’on a vu dans l’étude bibliographique que les streamers positifs se développent sur les distances plus longues que celles des streamers négatifs.

### **III.6. Influence de l’épaisseur et de la tension appliquée de l’isolant sur le courant maximum de décharge**

Dans cet essai, nous avons fait varier l’épaisseur de l’isolant solide (2mm, 3mm, et 5mm) pour chacune des deux épaisseurs de la couche d’air (3mm et 6mm) et la tension (de 6kV à 16kV) de décharge afin de mieux focaliser notre étude.

La figure III.10 montre que l’amplitude des impulsions augmente avec la tension appliquée quel que soit l’épaisseur de solide isolant.



**Figure III.10 : Influence de la tension sur l'amplitude des impulsions du courant de décharge pour différentes épaisseurs du PMMA**

La figure III.11 nous montre que l'amplitude des impulsions de courant diminue avec l'augmentation de l'épaisseur du solide isolant pour les deux polarités, comme on remarque que l'amplitude de courant maximum de décharge augmente avec la tension appliquée et diminue pour une même tension appliquée, quand l'épaisseur d'isolant solide augmente.

L'augmentation du courant avec la tension est dû au fait que l'augmentation de cette dernière favorise le phénomène d'ionisation.

- **La figure III.11.** montre l'influence de l'épaisseur du PMMA sur le courant de décharge pour une tension de 12kV et une couche d'air de 3mm

On voit que le courant maximum augmente avec la diminution de l'épaisseur de l'isolant solide.

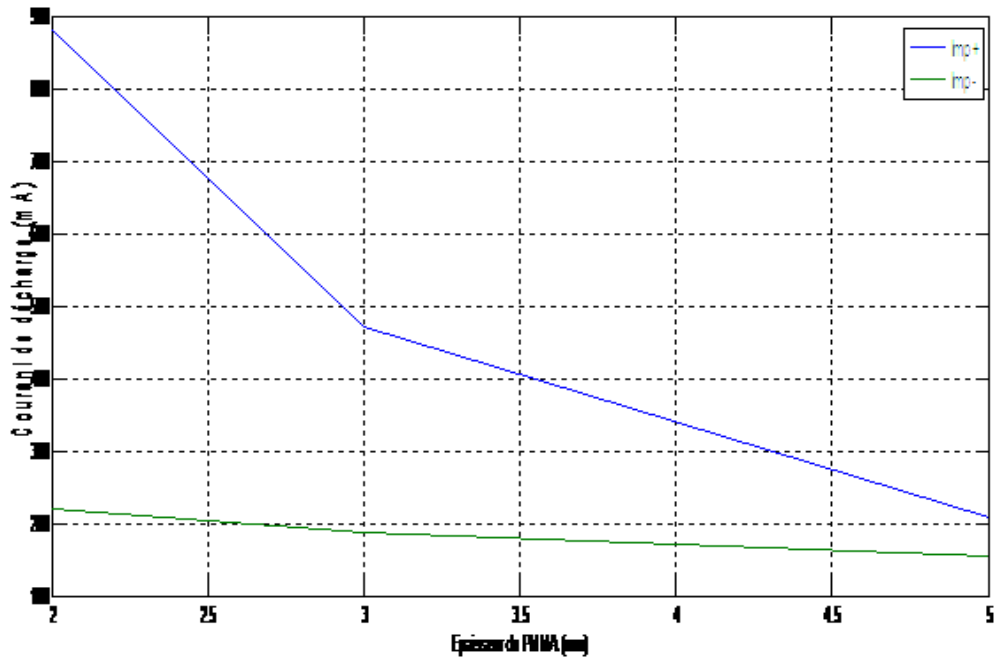


Figure 3.11 variation du courant de décharge en fonction l'épaisseur du PMMA

### III.7. Influence de l'épaisseur d'air et l'épaisseur du PMMA sur le courant de décharge

Pour la même tension de 12kV, on fait varier l'épaisseur de la couche d'air pour différentes épaisseurs de PMMA et nous avons tracé toutes les courbes associées aux courants de décharge.

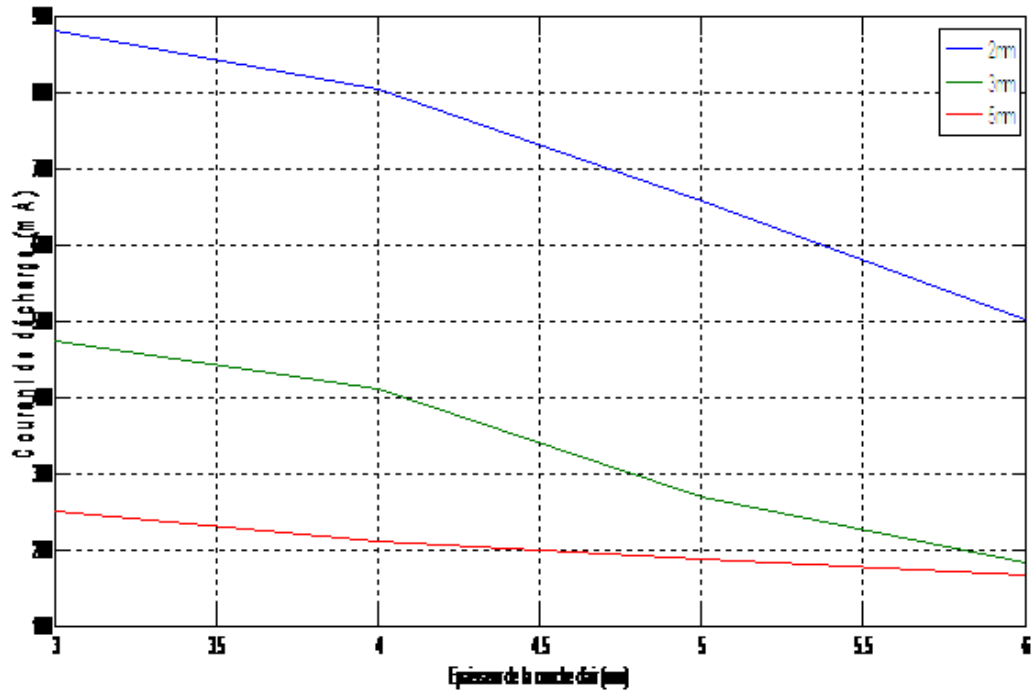
Le tableau suivant présente les différentes amplitudes du courant de décharge pour une tension de 12kV, avec D l'épaisseur de l'isolant solide PMMA et g celle de l'air, le courant en Ma

**Tableau III.6. Variation du courant de décharge en fonction des épaisseurs de l'air et du PMMA**

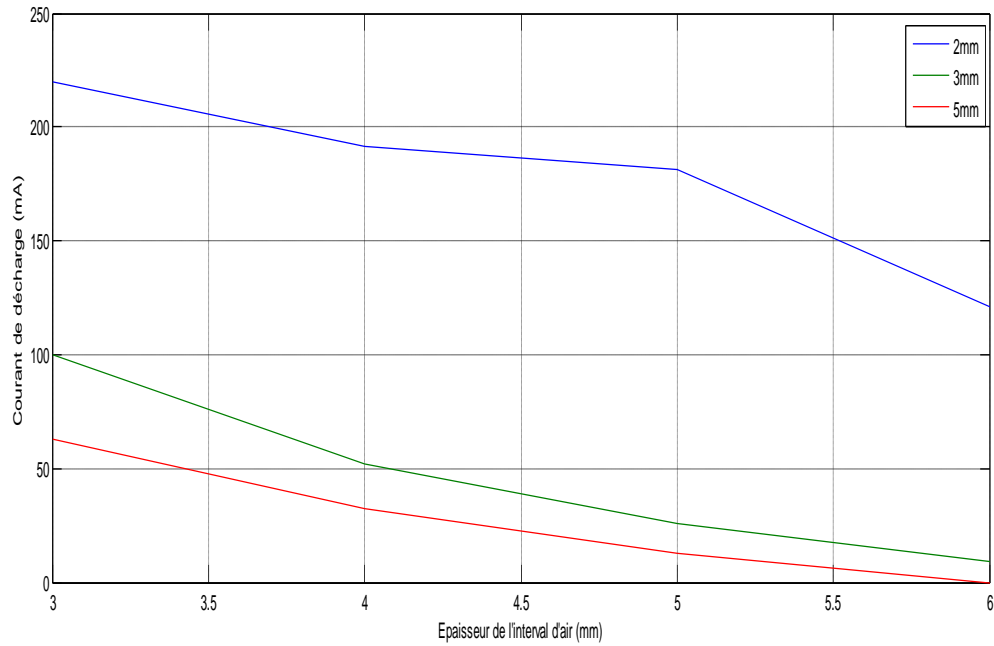
D= 2mm		g=3mm	g=4mm	g=5mm	g=6mm
	$I_{max}^+$ (mA)	880.43	804.14	657.6	501.1
	$I_{max}$ (mA)	219.56	191.3	181.52	120.65
D=3mm					
	$I_{max}^+$ (mA)	473.86	409.56	269.56	182.6
	$I_{max}$ (mA)	100	52.1	26	9

D=5mm	$I_{\max}^+$ (mA)	251	209.7	188	166.3
	$I_{\max}^-$ (mA)	63.2	32.1	12.4	0

Afin de bien voir les résultats nous avons séparé les courbe de la polarité positive et celle de polarité négative, les courbes sont représenté si après :



**Figure III.12. Impacte de l'épaisseur de la couche d'air et celle du PMMA sur les l'amplitude des impulsions positives du courant de décharge**



**Figure III.13. Effet de l'épaisseur de la couche d'air et celle du PMMA sur l'amplitude des impulsions négatives du courant de décharge**

Ces courbes nous confirment ce que nous avons constaté dans les paragraphes III.4 et III.6

### III.8. Conclusion

Les résultats des essais expérimentaux que nous avons obtenus montrent qu'il existe plusieurs paramètres qui peuvent influencer le courant de décharge tel que l'épaisseur de la couche d'air, la tension appliquée, le vieillissement ainsi que l'épaisseur de l'isolant.

---

# Conclusion générale

---

## Conclusion générale

Ce travail que nous avons réalisé nous a permis d'analyser les caractéristiques des impulsions de courant associées aux décharges glissantes, se propageant dans une isolation mixte solide /air, ce qui conduit à une meilleure compréhension du solide, le processus de dégradation sous l'action des décharges électriques. Le choix de ce matériau (PMMA) a été motivé par leur utilisation courante dans les matériels électrique.

Nous avons montré que l'amplitude, la forme et la polarité de la tension, l'insertion de la couche d'air, l'épaisseur du diélectrique solide, et le vieillissement jouent un rôle important dans la génération et la propagation des décharges.

Les impulsions des courants associés aux décharges augmentent en nombre et en amplitude avec la tension. Leur nombre est plus important en alternance négative qu'en alternance positive. Cependant leur amplitude est plus grande en polarité positive. Des résultats similaires ont été obtenus par Nishi *et al* [19]. Notons, cependant, que pour les mêmes valeurs (crête) de tension, l'amplitude des courants de décharge sont plus importantes en polarité positive qu'en polarité négative. Ainsi, les pics de courants associés aux décharges diminuent avec l'augmentation du temps de propagation de la décharge quelle que soit la polarité de la tension.

Le temps de montée moyen des impulsions de courant positives est plus grand que celui des impulsions négatives, le temps moyen de descente est pratiquement le même pour les deux impulsions quelle que soit leur polarité.

Le courant maximum associé à la décharge diminue avec l'augmentation de la couche d'air.

L'isolant solide exerce une influence sur les caractéristiques de la décharge par son épaisseur telle que l'amplitude de courant qui augmente avec la diminution de ce dernier.

L'enregistrement des courants associés aux décharges glissantes nous ont permis de mettre en évidence l'existence d'une décharge secondaire de signe opposé à celui de la

décharge principale et de la tension appliquée. Cela pourrait être dû à l'accumulation de charges surfaciques à la surface du solide diélectrique. Aussi, les matériaux pour lesquels les décharges glissantes sont plus courtes accumulent moins de charges surfaciques et les courants correspondants à la décharge secondaires sont moins importants.

Nous tenons à souligner le fait que lors de la réalisation de ce projet, nous avons rencontrés différentes difficultés que se soit dans la partie théorique pour l'acquisition de documentation ou dans la partie expérimentale pour l'acquisition du matériel. Nous avons peiné pour trouver un minimum du matériel au laboratoire haute tension, ajouté à la difficulté de l'étude des impulsions, vu leur sensibilité au milieu ambiant ainsi que les parasites qui ont rendu leur visualisation ardu.

Enfin, on ose espérer que notre travail puisse servir de support aux promotions à venir pour pousser plus loin cette étude et que les moyens nécessaires leurs seront fournis.

# Bibliographies

---

- [1] E. Kuffel and M. Abdullah, "High voltage engineering", Library of Congress Catalog Card N° 72-85501, first edition 1970.
- [2] M.A.Handala "Note de cours de 4<sup>ème</sup> année ingénieur : Module de haute tension ", Non éditer, UMMTO, 2009-2010.
- [3] Y. P. Raizer, "Gas discharge physics", edition Springer-Verlag, 1991.
- [4] L. B. Loeb and J. M. Meek, "The Mechanism of the Electric Spark", Stanford University press, 1940.
- [5] R.S. Sigmond and M. Goldman, "Corona discharge physics and applications", Electrical Breakdown in Gases, NATO ASI Series B: Physics vol. 89b p. 1-64, edited by E. E. Kunhardt and L. H. Luessen, Plenum Press, New York and London, 1983.
- [6] SEFELEK, « tests diélectriques étude des facteurs d'influencer » notes d'informations techniques édition 2002, fichier PDF.
- [7] M. Christoph GHIRLLERMIN « vieillissement électrique et thermique d'un composite résine époxyde de silice, étude des charge d'espace et de la conduction », thèse doctorat, université J.FOURIER de Grenoble I, 2010.
- [8] Michel Aguet et Michel Ianoz, « haute tension », volume XXII, presse polytechnique et université Romandes, 2004.
- [9] M. Mamadou Lamine COLYBALY « caractéristiques des décharges électriques se propageant aux interfaces solide / gaz - relation entre matériaux et dimension fractale » septembre 2009. L'école central de Lyon.

[10] D. Kind and H. Kräner, "Voltage Insulation Technology", Text book for electric Engineers, 1985.

[11] T.WILDI et G.SYBILLE. « Electrotechnique 4<sup>ème</sup> édition. » ; édition de Boek ; 2005

[12] M. M.A HANDALA « Etude de la décharge de la surface sous tension alternative 50 Hz », thèse doctorat d'état, UMMTO 2007

[13] Philippe Rober « Matériaux d'ETH » volume II, Edition Dunod ,2002.

[14] J. Juchniewicz and J. Lisiecki, "Systèmes d'isolation haute tension" Université Technologique de Wroclaw, WPW, Wroclaw, 1980.

[15] J.C. Maxwell, "A Treatise on Electricity and Magnetism", Third ed., Volume I, Chap 9, Art 310-314, Clarendon Press, Oxford, p 435, 1891.

[16] cours A.Tilmatine « claquage des isolants solides » chapitre 3, Université Djilali liabes de Sidi Bel Abbas , [www.univ-sba.dz](http://www.univ-sba.dz) , 25/9/2011

[17] Department of Polymer Science (University of Southern Mississippi), <http://www.pslc.ws/french/index.htm> consulté le 18/09/2011

[18] Cours A.Tilmatine « Technique de mesure en haute tension », Chapitre 4, Université Djilali liabes de Sidi Bel Abbas , [www.univ-sba.dz](http://www.univ-sba.dz) , 25/9/2011

[19] T. Nishi, R. Hanaoka, S. Takata and T. Miyamoto, "Characteristics of Creeping Discharge along Aerial Insulated Wire under Impulse Voltages with Various Wave Front Durations", Electrical Engineering in Japan, Vol. 158, No. 3, 2007.

---

# Annexe

---

Dans cette partie nous allons essayer de présenter les commande principale du logiciel de l'oscilloscope.

## 1. Présentation du logiciel

Nous possédons la version 2.19 du logiciel appelé SP107E, qui sert à importer et analyser (décomposition du signal en série de fourrier) les mesures de l'oscilloscope dans un ordinateur.

La figure 1 présente une vue général de ce logiciel.

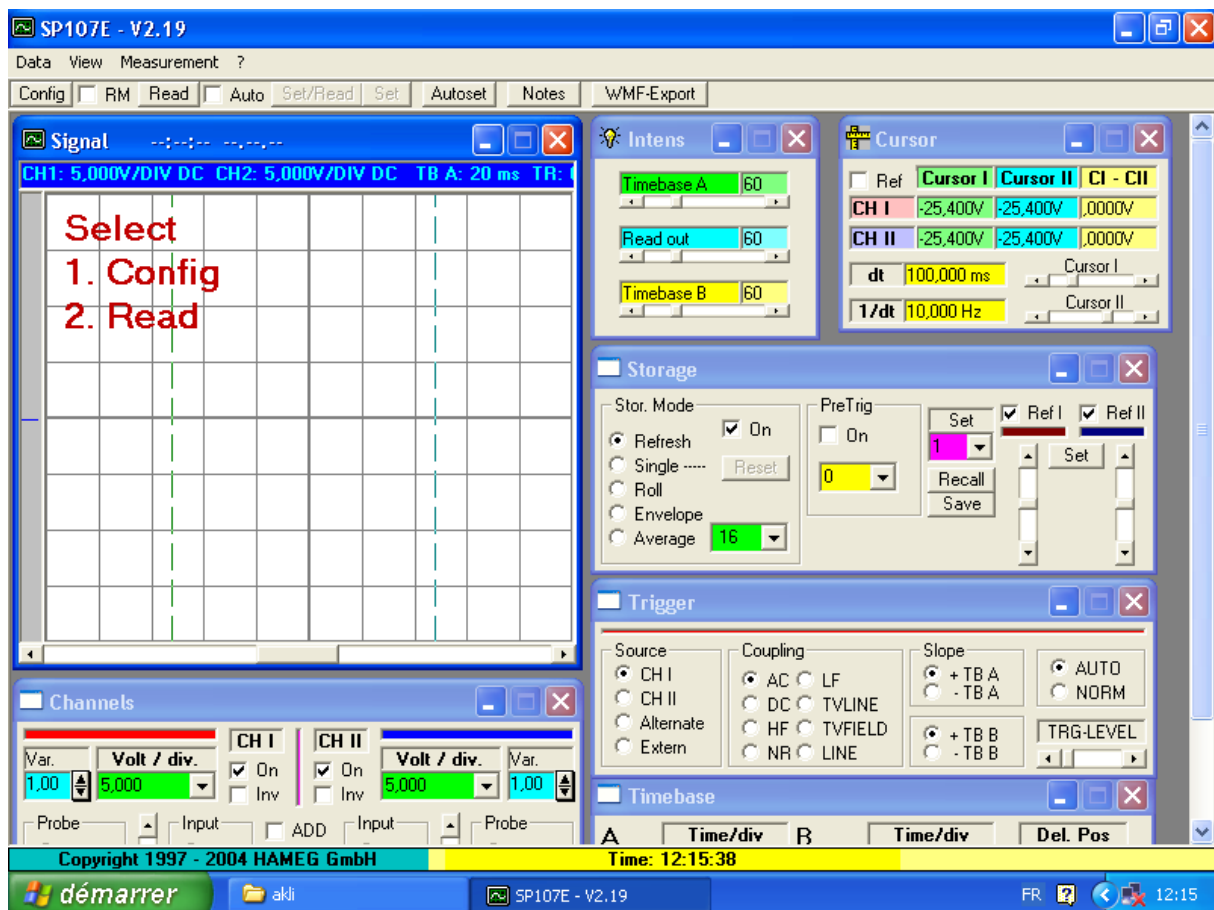


Figure 1 : vue d'accueil du logiciel

Comme vous le constatez le programme dispose de 7 fenêtres qui sont :

### **I.1.Signal**

Sur cette fenêtre on visualise le signal mesuré tel qu'il est vue sur l'oscilloscope

### **I.2Channels**

Cette fenêtre indique les canaux importés et leurs calibres lors de la lecture

### **I.3.Cursor**

Cette fenêtre indique la tension a chaque point du graphe lorsque vous passez le curseur de la souris par celui-ci

### **I.4. Intensity**

Cette fenêtre indique l'intensité de la luminosité de la courbe.

### **I.6. Storage**

Indique quelques options d'enregistrement des données (nous n'allons pas utiliser cette fenêtre pour enregistrer nos résultats

### **I.7. Trigger**

Indique les options de base de l'oscilloscope choisies lors de l'enregistrement des résultats

### **I.8. Time base**

Cette fenêtre indique les calibres de temps pris par chaque canal.

### **I.9. Importation et lecture des données**

Pour importer les données de l'oscilloscope procédez comme suit :

- «Cliquez sur le bouton " config", la boîte de dialogue de la figure suivante s'affiche

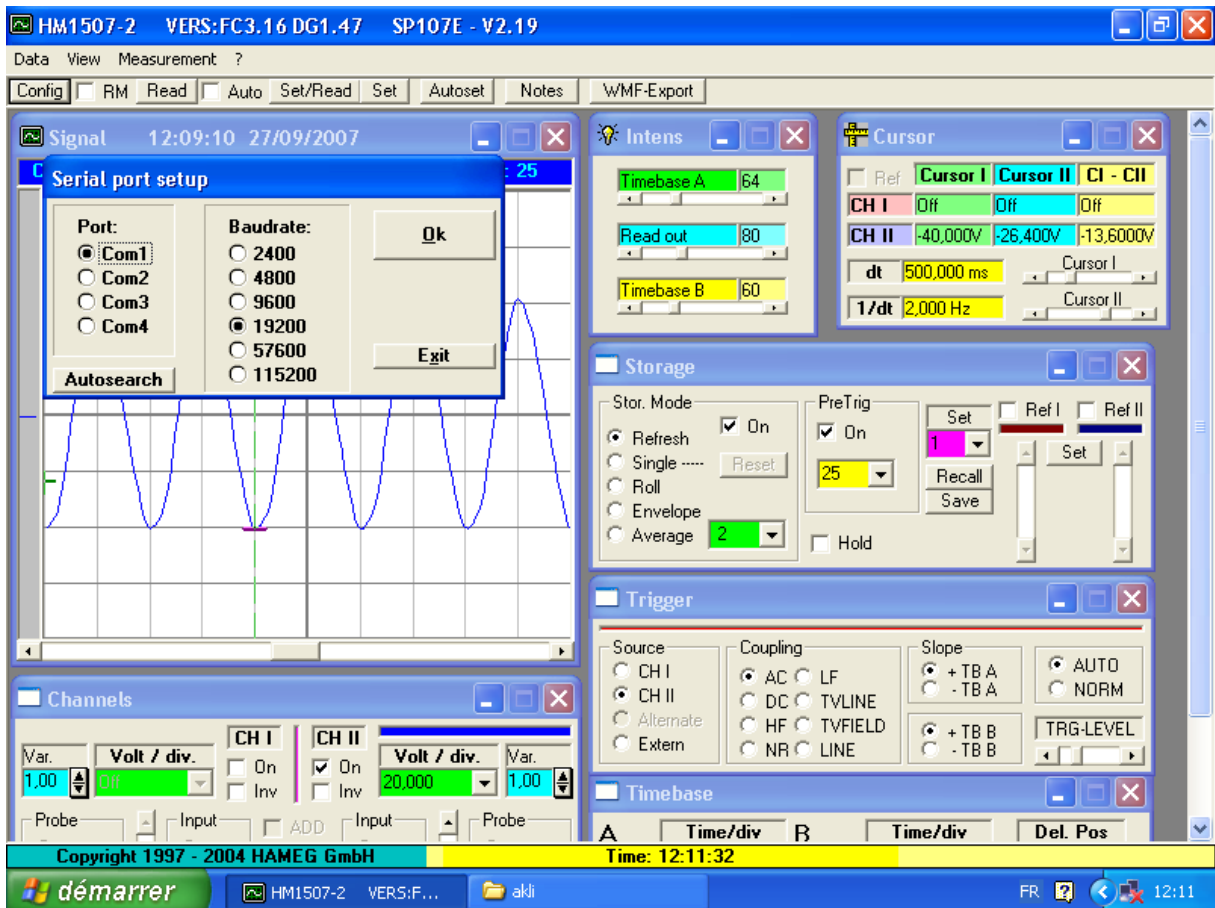


Figure 2 : Boite de dialogue affichée une fois cliquer sur « config »

- Cliquez OK si le port « COM1 » et la vitesse de bande est sur « 19200 ».
- Une fois connecté cliquez le bouton « Read », et votre graphe sera importer

## I.10. Enregistrer les courbes et les résultats

Pour enregistrer la courbe uniquement comme image cliquez « WMF export », dans la boite de dialogue qui s'affiche vous avez deux choix :

- ❖ « Copy to clipboard » pour copier l'image au presse papier et puis cliquer le 2ème bouton de la souris et collez la ou vous voulez.
- ❖ « Save as WMF format » pour enregistrer en format WMF

D'autres formats d'enregistrement sont disponibles si vous choisissez fichier → Save (fichier portant toutes les données de toutes les fenêtres, tableaux ....)