

## **Mémoire**

Présenté par

**Mademoiselle SAAD Djedjiga**

Pour l'obtention du diplôme de

## **Magister**

en Electrotechnique  
Option : Machines Electriques

Thème

# **Effet de la décharge couronne sur les surfaces isolantes et les surfaces métalliques**

Soutenu le 21 décembre 2011

Jury :

Mr MUFIDZADA	Nahid	Professeur, UMMTO	Président
Mme BITAM-MEGHERBI	Ferroudja	Maître de Conférences A, UMMTO	Rapporteur
Mr MOULAI	Hocine	Maître de Conférences A, USTHB	Examineur
Mr OTMANE CHERIF	Tahar	Maître de Conférences A, UMMTO	Examineur
Mr MOUDOUD	Mustapha	Maître de Conférences B, UMMTO	Examineur

## **REMERCIEMENTS**

J'adresse mes vifs remerciements à Madame Ferroudja BITAM-MEGHERBI, Maître de Conférences A à l'Université Mouloud Mammeri de Tizi-Ouzou, qui a bien voulu diriger ce travail et qui m'a toujours accompagnée tout au long de ce travail.

Le Professeur Nahid MUFIDZADA, a accepté de présider le jury de soutenance, qu'il trouve ici l'expression de mes sincères remerciements.

Monsieur Hocine MOULAI, Maître de Conférences A à l'Université des Sciences et de la Technologie de Bab Ezzouar a bien voulu consacrer du temps à examiner le présent travail en prenant part au jury. Qu'il reçoive ici mes remerciements les plus chaleureux.

Monsieur Tahar OTMANE CHERIF, Maître de Conférences A à l'Université Mouloud Mammeri de Tizi-Ouzou, a accepté de participer au jury de soutenance, je le remercie fortement pour cela.

Je remercie énormément Monsieur Mustapha MOUDOUD, Maître de Conférences B à l'Université Mouloud Mammeri de Tizi-Ouzou pour avoir accepté d'examiner ce travail.

Que tous ceux et toutes celles qui m'ont soutenue et aidée à mener à bien ce travail, trouvent également ici l'expression de mes remerciements.

---

Introduction générale	1
<b>Chapitre 1. Les isolants solides utilisés en électrotechnique</b>	
1.1 Introduction	5
1.2 Généralités	6
1.3 Vieillessement des isolants électriques	11
1.4 Différents matériaux isolants	13
1.5 Les polymères	13
1.6 Classification des polymères et leurs comportements	15
1.7 Quelques exemples d'isolants synthétiques (matières plastiques)	15
1.7.1 Polyéthylène (PE)	15
1.7.1.1 Différents types de polyéthylènes	15
1.7.1.2 Utilisation	16
1.7.2 Polychlorure de vinyle (PVC)	16
1.7.2.1 Fabrication du PVC	17
1.7.2.2 Propriétés du PVC	17
1.7.2.3 Utilisation du PVC	18
1.7.3 Polystyrène (PS)	18
1.7.4 Le polypropylène (PP)	21
1.7.4.1 Caractéristiques physiques	22
1.7.4.2 Utilisation du polypropylène	22
1.7.5 Le poly-méthacrylate de méthyle (PMMA)	23
1.7.5.1 Procédés de fabrications concurrentes	24
1.7.5.2 Caractéristiques du PMMA	24
1.7.5.3 Applications du PMMA	25
1.7.6 Le styrène acrylonitrile (SAN)	25
1.7.6.1 La matière première	25

---

1.7.6.2	Caractéristiques du (SAN)	25
1.7.7	Le polycarbonate	26
1.7.7.1	Caractéristiques du polycarbonate	26
1.7.7.2	Utilisation	26
1.7.8	Poly-tétra-fluor-éthylène (PTFE)	27
1.7.8.1	Caractéristiques	27
1.7.8.2	Utilisation	28
1.7.9	Polyisoprène	28
1.7.9.1	Caractéristiques du poly-isoprène	28
1.7.10	Caoutchoucs silicones	29
1.7.10.1	Caractéristiques	29
1.7.10.2	Utilisation	29
1.7.11	Polyesters non saturés	29
1.7.11.1	Caractéristiques	30
1.7.11.2	Utilisation	30
1.8	Les isolants solides organiques	30
1.8.1	Papiers	30
1.8.1.1	Composition du papier	31
1.8.1.2	Procédé de fabrication du papier	31
1.8.1.3	Propriétés du papier non imprégné	31
1.8.1.4	Applications du papier	32
1.8.2	Textiles	32
1.9	Les isolants solides minéraux inorganiques	32
1.9.1	Le verre	32
1.9.2	Les Céramiques	33
1.9.2.1	Classes des céramiques et leurs utilisations	33
1.9.2.2	Caractéristiques	34
1.9.3	Les micas et les produits micacés	34
1.9.3.1	Propriétés	34

1.10 Conclusion	35
-----------------	----

## **Chapitre 2. Théorie de la décharge couronne**

2.1 Historique	36
2.2 décharge couronne	38
2.3 Phénomènes de multiplications électroniques : Phénomènes de collision	38
2.4 Différents régimes de la décharge (caractéristique courant-tension)	40
2.4.1 Mécanisme de la décharge couronne	41
2.4.2 La décharge de Townsend et critère d'auto-entretien de la décharge	42
2.4.3. Limite du critère de Townsend	44
2.4.5 Loi de Paschen	45
2.4.6 Théorie des streamers	46
2.4.7 Critère de Meek et critère de Reather	48
2.5 Distribution du champ électrique sur un système pointe-plan et topographie de la décharge couronne	49
2.6 Seuil d'apparition de la décharge couronne	52
2.7 Effet de la polarité sur le processus de développement de la décharge couronne	54
2.7.1 Polarité négative	55
2.8 Les facteurs influençant la décharge couronne	57
2.8.1 Facteurs géométriques	57
2.8.2 La nature des électrodes	58
2.8.3 Les facteurs physico-chimiques	59
2.8.4 Facteurs électriques	61
2.9 Phénomènes induits par la décharge couronne	61
2.9.1 Effets électromagnétiques	61

2.9.2 Effet chimique	62
2.10 Conclusion	62

### **Chapitre 3. Décharges à barrière diélectrique (DBD)**

3.1 Introduction	63
3.2 Différentes configurations de la décharge à barrière diélectrique	63
3.3 Physico-chimie du matériau de la barrière diélectrique	64
3.4 Principe de la décharge à barrière diélectrique	65
3.5 Paramètres de régulation de la décharge à barrière diélectrique	65
3.5.1 Influence de la tension	67
3.5.2 Influence de la fréquence	68
3.5.3 L'influence de la distance inter-électrodes	68
3.6 Mesure de la résistance de la barrière isolante	69
3.6.1 Mesure de la résistivité de surface	69
3.6.1.a Mesure de la résistivité de surface entre deux électrodes parallèles	70
3.6.1.b Mesure de la résistivité de surface entre deux électrodes concentriques	71
3.6.2 Mesure de la résistivité transversale de la barrière	72
3.7 Les types de la décharge à barrière diélectrique	73
3.7.1 Décharge silencieuse	73
3.7.2 Décharge lumineuse homogène	74
3.8 Application des décharges à barrière diélectrique	74
3.9 Conclusion	78

### **Chapitre 4. Etude expérimentale**

4.1 Introduction	79
4.2 Evolution temporelle du courant avec des échantillons diélectriques	81
4.2.1 Résultats expérimentaux	81

---

4.2.1.1 Cas du PMMA	81
4.2.1.2 Cas du PS	82
4.2.1.3 Cas du SAN	83
4.2.1.4 Effet de la nature du matériau sur l'évolution	84
4.2.1.5 Tendance générale pour les trois matériaux	86
4.3. Comportement électrique des matériaux soumis à des séquences de charges et de décharges	86
4.3.1. Echantillons de PMMA	87
4.3.2. Echantillons de PS	89
4.3.3. Echantillons de SAN	91
4.4 Représentation de la première et de la deuxième charge pour les échantillons de PMMA, PS et le SAN avec une épaisseur fixée à 3 mm	93
4.5 Influence de l'exposition à la décharge couronne sur la première et la deuxième charge pour les échantillons PMMA, PS et le SAN	94
4.5.1 Cas du PMMA	94
4.5.2 Cas du SAN	95
4.5.3 Cas du PS	96
4.5.4 Cas des échantillons d'une épaisseur de 2mm	96
4.6 Influence de l'exposition à la décharge couronne sur les résistivités des échantillons de PMMA, de PS et de SAN	98
4.7 Influence de l'exposition à la décharge couronne sur la morphologie des échantillons de PMMA, de PS et de SAN	98
4.8 Action de la décharge sur une tôle d'acier pour transformateurs	104
4.9 Conclusion	108
Conclusion générale	109
Références bibliographiques	111

Dans le domaine du génie électrique, les matériaux isolants sont utilisés pour assurer une fonctionnalité optimale des équipements tout en garantissant la sécurité des biens et des personnes. Généralement, la durée de vie des isolants conditionne la durée de vie de l'appareillage. Cela explique les nombreuses études consacrées aux effets des contraintes électriques sur les polymères, ces matériaux qui, actuellement, prennent une place de plus en plus importante dans l'isolation [1]. En effet les polymères, de par leurs propriétés extraordinaires, ont toujours suscité un intérêt marqué dans beaucoup de domaines, aujourd'hui ils tendent à s'imposer de façon de plus en plus importante dans l'industrie électrotechnique. Cependant, ils ont des propriétés physiques et chimiques en volume pouvant être affectées durant leur fonctionnement [2]. Les polymères sont le fruit d'une recherche scientifique intensive entreprise au XXe siècle et c'est au milieu des années 1920 que les bases scientifiques nécessaires à leur développement furent élaborées. Dès 1926, l'intérêt des matériaux thermoplastiques apparaissait avec les travaux du chimiste allemand Staudinger. C'est celui-ci qui mit en évidence, au cours de ses investigations, la structure macromoléculaire de ces matériaux que l'on appela, de ce fait, les polymères. Les principaux thermoplastiques dérivés sont le polypropylène (PP), le polyéthylène (PE), le polystyrène (PS) et le poly (chlorure de vinyle) (PVC). D'une grande variété, ces matériaux ont rapidement occupé, de façon quasi exclusive, le domaine de l'isolation électrique. Les câbles et les gaines représentent environ 2% de la consommation mondiale annuelle en plastique. Une grande partie des matières plastiques a la capacité d'être recyclée diminuant ainsi leur impact sur l'environnement [3]. Quelques soient les avantages présentés par les polymères, il demeure qu'à l'instar d'autres matériaux ils sont sujets au vieillissement durant leur utilisation. Le phénomène de vieillissement est un processus général et souvent irréversible, il peut avoir pour cause la chaleur et nous parlons de vieillissement thermique comme il peut être d'origine chimique ou physique. Lorsque l'on s'intéresse à l'isolation électrique il y a lieu de ne point occulter une autre cause de vieillissement liée à l'application prolongée de diverses contraintes électriques à un matériau.

Les phénomènes de vieillissement électrique sont maintenant bien connus : la rupture diélectrique de l'isolant est l'aboutissement de la propagation et de la multiplication de canaux conducteurs microscopiques. Cette phase est généralement précédée par une période de croissance de défauts à l'échelle microscopique telle que la formation ou l'extension de cavités microscopiques. Bien que peu de matériels électrotechniques en fin de vie soient soumis à une expertise poussée visant à déterminer la cause de leur défaillance en service, il demeure important de connaître et de comprendre les mécanismes de vieillissement des matériaux isolants sous champ électrique afin d'essayer d'en déterminer avec une précision accrue la durée de vie et de leur garantir par la même occasion une bonne fiabilité sur une durée déterminée [1].

En génie électrique, le vieillissement électrique est défini comme tout changement des propriétés du matériau qui affecte ses fonctions d'isolation. Il peut donc s'agir d'une modification de nature chimique ou physique induisant une modification des propriétés électriques dans un sens défavorable pour la pérennité des fonctions isolantes. Généralement on accepte de façon intuitive, et l'expérience le montre souvent, que la durée de vie d'un matériau isolant dépend de l'intensité de la contrainte électrique subie par celui-ci mais également de la durée d'application de cette contrainte. L'exposition au champ électrique peut également agir sur l'isolant par le biais de décharges dans l'environnement gazeux de celui-ci. C'est ainsi que les isolants électriques sont affectés par les décharges électriques de type couronne du fait de la forte réactivité conférée aux gaz où elle se produit. Ce type de décharge survient à chaque fois que nous avons des champs électriques non homogènes dont l'intensité dépasse le seuil d'ionisation du milieu considéré. La complexité mais surtout l'interaction des décharges électriques avec les matériaux isolants nous amènent naturellement à nous intéresser à ces phénomènes.

Les premières décharges de type couronne ont été observées au bout d'une pointe vers le milieu du 17<sup>e</sup> siècle lorsque fut inventée la machine électrostatique destinée à générer des potentiels élevés par Otton Von Guericke [4]. En 1838, Faraday dans un ouvrage consacré aux décharges électriques, affirmait de manière implicite que le vent électrique induit durant une décharge électrique, est le résultat d'un transfert de quantité

de mouvement. Vers les années 1860 Andrews et Tait proposent le nom de la décharge silencieuse (silent discharge) [5]. En 1873, Maxwell donne une explication plus précise du phénomène engendrant le vent électrique [4]. Peek en 1929, a énoncé une loi empirique faisant appel à la notion de champ critique, cette loi a, par la suite, été adaptée par plusieurs chercheurs dont Zaleski en 1948, Robinson en 1968 et Cobine en 1975 [6].

Bien avant les résultats de ces deux chercheurs, dès 1930 des équipes de recherche observèrent l'existence de décharges lumineuses (glow discharge), pour des valeurs élevées du champ électrique réduit [7]. A la pression atmosphérique, la décharge lumineuse est un sujet abordé par plusieurs chercheurs [8]. Buss en 1932 découvrit le caractère filamentaire des décharges avec barrière diélectrique à la pression atmosphérique [6,9]. Robinson en 1961, propose le premier modèle du vent ionique créé par une décharge couronne. Par la suite, Velkoff et Ketcham en 1968 publient la première étude de l'effet des décharges couronne sur des écoulements et montrent la possibilité de retarder le lieu de transition d'un écoulement laminaire vers un écoulement turbulent [10].

Plusieurs modèles ont été proposés pour la description des mécanismes de la décharge couronne [11]. Ces modèles sont principalement qualitatifs et ne concernent que des phases singulières de la décharge, ils sont purement empiriques ou semi-empiriques [12]. La difficulté pour l'établissement d'un modèle réside dans la complexité des phénomènes survenant dans une décharge. Le but assigné aux recherches portant sur les décharges électriques demeure l'établissement d'un modèle incluant tous les paramètres mis en jeu. Parmi les modèles qui ont été proposés, le premier demeure sans conteste celui de Townsend. Ce modèle se révèle toutefois incorrect pour les pressions élevées, un modèle plus élaboré a été proposé par Raether en 1964. Celui-ci décrit les caractéristiques d'une avalanche se développant dans l'espace inter électrode. Par la suite, pour rendre compte de la rapidité des phénomènes on introduisit la théorie des Streamers (dards), suite aux travaux de Graggs, Raether et Loeb. Cette théorie stipule que le développement d'une avalanche se fait dans le champ Laplacien tant que sa taille reste inférieure à une certaine limite [13]. En 1988, Okazaki et son groupe ont démontré

qu'une décharge avec barrière diélectrique homogène pouvait être obtenue sous des conditions très spécifiques [6].

L'étude faite dans le présent mémoire se fixe pour objectif de comprendre l'effet de la décharge couronne en polarité négative sur les matériaux isolants électriques et sur les surfaces métalliques. Pour cela, notre mémoire est composée de quatre chapitres.

Le premier chapitre sera pour nous l'occasion de broser un tableau aussi exhaustif que possible des matériaux isolants solides mis en œuvre dans le domaine de l'ingénierie électrotechnique, notre intérêt sera spécialement orienté sur les matériaux polymères.

Dans le second chapitre nous exposerons une vue générale sur les mécanismes de formation d'une décharge électrique, en commençant par décrire les phénomènes de collisions qui conduisent à une telle décharge, ensuite on illustre les différents régimes de la décharge pour les interpréter selon le modèle de Townsend et le modèle des streamers. On décrit par la suite la formation de la décharge couronne négative en géométrie pointe-plan. A la fin du chapitre nous essayerons de nous étaler sur les paramètres influençant la décharge.

De nombreuses études théoriques, expérimentales et numériques ont été menées au cours des dernières décennies permettant une meilleure compréhension des nombreux phénomènes physiques et chimiques intervenant dans une décharge à barrière diélectrique. C'est cela qui nous a amenés à dédier le troisième chapitre à un exposé sur la décharge avec barrière diélectrique désignée par le sigle DBD. Nous parlerons du principe de la DBD, des paramètres de régulation de la décharge ainsi que des applications courantes de ce type de décharge.

Le quatrième chapitre, quant à lui sera consacré à l'étude expérimentale. Nous étudierons l'effet de la décharge couronne en polarité négative sur certains polymères et sur des surfaces métalliques consistant en des échantillons de tôles utilisées dans la construction des transformateurs de puissance.

Nous finirons notre travail par une conclusion générale où seront rassemblés nos divers résultats. Nous y donnerons également les perspectives ouvertes par ce travail.

## 1.1 Introduction

Les matériaux, dans leur acception la plus large, ont joué un rôle prépondérant dans les progrès accomplis dans la mise au point des matériels électriques. L'évolution des qualités de ces matériaux s'est étalée sur plus d'un siècle. Bien que cette évolution soit lente mais en terme de qualité elle a été considérable. En guise d'introduction à cette partie de notre travail nous donnons ici un aperçu général sur les matériaux isolants solides utilisés dans le domaine de l'industrie électrotechnique. Ces matériaux occupent une place importante dans les applications électriques puisque pouvant jouer un rôle de support mécanique en plus de leur fonction principale d'isolation. Nous les retrouvons pratiquement partout où il y a des conducteurs électriques, même dans le cas des réseaux de transport ou de distribution où l'isolant principal est l'air, la liaison mécanique avec le pylône est assurée par un isolateur solide. Dans ce cas précis nous avons l'illustration de la double fonction généralement dévolue aux isolants solides. Les matériaux isolants solides se retrouvent également dans les condensateurs, dans ce cas le matériau le plus utilisé demeure le papier que l'on rencontre souvent sous forme imprégnée. Le polyéthylène et le polypropylène sont également utilisés à la même fin. Les isolants solides sont aussi largement utilisés dans la confection des câbles, dans la majorité des transformateurs de puissance mais aussi dans les machines électriques tournantes. Du fait de leurs nombreuses qualités, les matériaux isolants sont vite devenus le point central dans la conception de beaucoup de catégories de matériels électriques puisque la fiabilité des dispositifs est largement déterminée par la pérennité des propriétés de ces isolants. Il est, en effet, vérifié que les défaillances du matériel électrique sont souvent associées à des phénomènes de rupture de leur isolation. Les phénomènes de rupture peuvent survenir même pour des champs électriques nettement inférieurs aux champs de rupture estimés. Ce genre de rupture est associé à une évolution temporelle des matériaux, c'est le processus de vieillissement. Il est donc nécessaire d'appréhender de la manière la plus précise les limites d'utilisation des isolants employés par la connaissance de leur évolution à long terme.

## 1.2 Généralités

Lorsque l'on observe les matériaux sous l'angle de leur réponse à une sollicitation électrique on est appelé à parler soit de diélectrique soit d'isolant. Afin d'éviter toute incompréhension nous donnons les définitions suivantes :

- **Un isolant** est un matériau qui ne conduit pas l'électricité. Sa destination première est d'empêcher tout contact entre des pièces métalliques portées à des potentiels différents [14]. Une façon plus simple de définir un matériau isolant est de dire qu'il est caractérisé par une résistivité électrique très élevée. A l'opposé de celle des métaux, la résistivité de ces matériaux décroît lorsque leur température augmente [15].

- **Un diélectrique** est un matériau plus ou moins isolant (résistivité élevée, bande d'énergie interdite de quelques eV), polarisable, c'est-à-dire dans lequel des dipôles électrostatiques existent (diélectrique polaire) ou se forment sous l'effet d'un champ électrique (dipôles induits) [14]. En d'autres termes un diélectrique peut être défini comme un milieu matériel dans lequel la bande de conduction est séparée de la bande de valence par une énergie supérieure à 5 eV [16]. Dans la pratique technologique la différence entre isolant et diélectrique ne découle pas de propriétés différentes mais de l'angle sous lequel est vu le problème. C'est ainsi que lorsque le souci d'empêcher un contact galvanique est important nous parlerons d'isolant, par contre lorsque notre intérêt est focalisé sur les propriétés découlant de la polarisation ou de la permittivité plus ou moins accentuée nous invoquons le terme diélectrique.

Enfin, compte tenu de ce qui vient d'être dit, les mots isolant et diélectrique peuvent être considérés comme étant des synonymes [17].

Les matériaux isolants sont caractérisés par :

### a) Leur résistivité :

Celle-ci s'exprime en ohm.mètre [ $\Omega \cdot m$ ] dans le système international d'unités. Sur la figure 1.1 nous donnons à titre d'information l'échelle des résistivités pour quelques

matériaux d'usage courant en électrotechnique. Sur cette figure les matériaux isolants correspondent à la région grise.

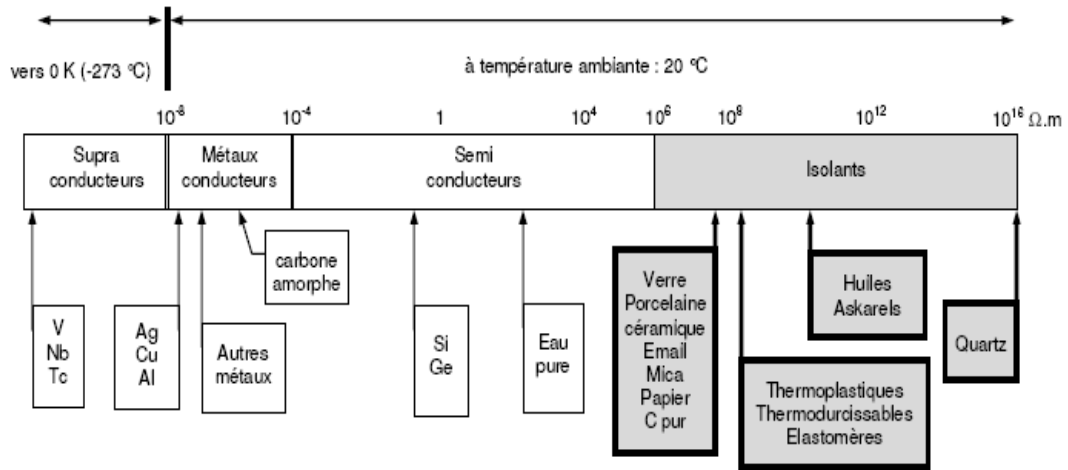


Figure 1.1. Echelle des résistivités de quelques matériaux utilisés en électrotechnique.

### b) Leur permittivité.

Cette grandeur s'exprime en farad par mètre [F/m] dans le système international d'unités. Cette grandeur est également désignée parfois par le terme pouvoir inducteur spécifique ou constante diélectrique. Toutefois dans la pratique on utilise de façon quasi exclusive la permittivité relative  $\epsilon_r$  représentant le rapport de la permittivité absolue à la permittivité du vide  $\epsilon_0$ .

La permittivité relative représente aussi le rapport de la capacité d'un condensateur ayant le matériau comme diélectrique à la capacité du même condensateur, mais avec le vide à la place du diélectrique. Ceci est donné par la formule (1.1).

$$\epsilon_r = \frac{C}{C_0} \quad (1.1)$$

### c) Leur facteur des pertes diélectriques

Ce facteur revêt une grande importance puisqu'il rend compte de la puissance dissipée dans le matériau lorsqu'un champ électrique variable lui est appliqué. Il est donné par la tangente de l'angle  $\delta$  appelé angle de pertes. En fait l'angle de pertes

représente l'écart à la quadrature entre le courant et la tension d'un condensateur ayant le matériau considéré comme diélectrique. Il est utile de noter à ce niveau que l'importance du facteur de pertes n'est pas tellement liée à la perte de puissance en termes de coût bien que cela ne soit pas toujours négligeable. L'intérêt accordé à ce facteur réside plutôt dans le fait que la puissance est perdue dans un milieu diélectrique très mauvais conducteur de la chaleur. C'est pour cela que les pertes diélectriques peuvent conduire à des échauffements prohibitifs des matériels. Lorsqu'un dispositif constituant un condensateur réel (avec pertes) est représenté par le schéma équivalent parallèle tel que représenté sur la figure 1.2 le facteur des pertes est donné par :

$$\tan\delta = \frac{1}{\omega C_p R_p} \quad (1.2)$$

Dans cette expression :

$\omega = 2\pi f$  , représente la pulsation de la tension appliquée.

$C_p$  est la capacité du circuit équivalent parallèle pour l'isolant considéré.

$R_p$  est la résistance du circuit équivalent parallèle pour l'isolant considéré.

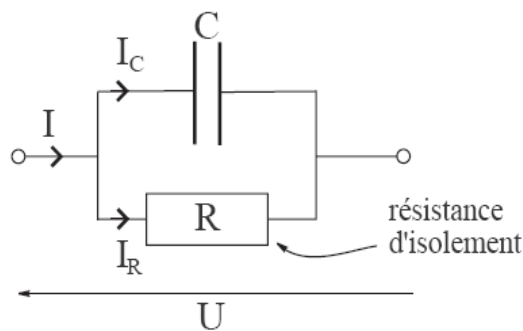


Figure 1.2. Circuit équivalent parallèle représentant un diélectrique

Le diagramme de Fresnel correspondant est donné sur la figure 1.3.

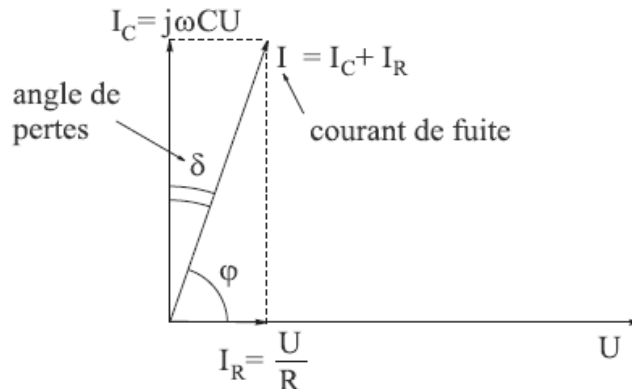


Figure 1.3. Diagramme de Fresnel correspondant au schéma équivalent parallèle [18].

Le schéma équivalent série d'un condensateur est donné sur la figure 1.4.

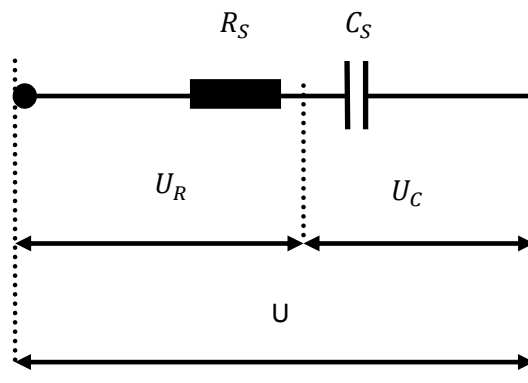


Figure 1.4. Circuit équivalent série représentant un diélectrique.

Dans ce cas, le diagramme de Fresnel est représenté sur la figure 1.5.

Avec :

$$\tan\delta = \omega R_S C_S \quad (1.3)$$

La valeur «  $\tan\delta$  » est appelée facteur de dissipation diélectrique. On définit également l'indice de pertes diélectriques par la relation :

$$\varepsilon_r'' = \varepsilon_r \tan\delta \quad (1.4)$$

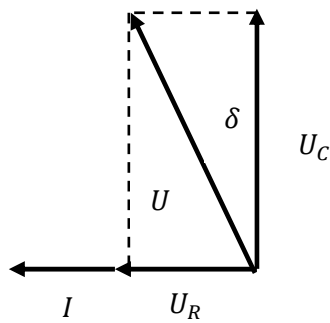


Figure 1.5. Diagramme de Fresnel correspondant au schéma équivalent série.

#### d) Leur rigidité diélectrique

Elle représente l'une des caractéristiques importantes d'un isolant puisqu'elle traduit son aptitude à résister à une contrainte électrique sans se détériorer. Elle s'exprime habituellement en kilovolts par millimètre [ $\text{kV}\cdot\text{mm}^{-1}$ ]. La rigidité diélectrique d'un matériau, dépend de la fréquence mais aussi de la durée d'application de la tension ainsi que de la façon avec laquelle la contrainte est appliquée (rampe, créneau, choc).

La rigidité diélectrique  $G$  d'un matériau est définie par le rapport de la tension  $U$  pour laquelle se produit le claquage à la distance  $L$  séparant des électrodes normalisées auxquelles est appliquée la tension :

$$G = \frac{U}{L} \quad (1.5)$$

#### e) Leur résistance à l'arc

C'est la durée maximale d'application d'une tension supérieure à la tension de claquage d'un isolant avant l'apparition d'un arc électrique. Elle se mesure en secondes.

#### f) Leur température admissible

C'est un paramètre significatif pour tous les matériaux isolants et il détermine leur classification. En termes techniques nous parlons de classe d'isolement laquelle est représentée par une lettre. Au-delà de cette température caractéristique de la classe, il est fortement déconseillé de travailler sous peine de réduire de façon sévère la durée de vie de l'équipement. Il est avéré que dans tous les cas, les matériaux isolants voient leurs

propriétés se détériorer très vite aux températures élevées et la détérioration peut atteindre un niveau tel que l'isolation cesse de jouer convenablement son rôle. Ce processus est désigné sous le terme de vieillissement thermique [15].

### 1.3 Vieillissement des isolants électriques

Le terme vieillissement traduit l'évolution négative avec le temps des propriétés d'un isolant. Il arrive, mais cela est rare, que l'évolution soit positive et nous parlons alors de conditionnement. Pour bien interpréter le problème de vieillissement, nous pouvons nous référer à la figure 1.6 qui donne schématiquement l'enchaînement de mécanismes pouvant survenir à partir de la mise en service d'un isolant organique jusqu'au stade ultime qui est la rupture.

L'isolant organique en début de service (temps  $t = 0$  sur la figure) peut avoir ou ne pas avoir de défaut initial (cavités, particules étrangères...), sous l'action d'une tension, il peut y avoir création de vacuoles au sein de l'isolant ou augmentation de volume de celles déjà présentes ( $t = t_1$  jusqu'à  $t_2$ ). Ce phénomène n'est autre que le vieillissement électrique qui pourra conduire à la dégradation de l'isolant si des décharges prennent naissance dans une vacuole ( $t = t_3$ ) et si une arborescence se développe ( $t = t_4$ ). Cette dégradation est susceptible à son tour de conduire l'isolant à la fin de sa vie c'est-à-dire à une rupture ( $t = t_5$ ).

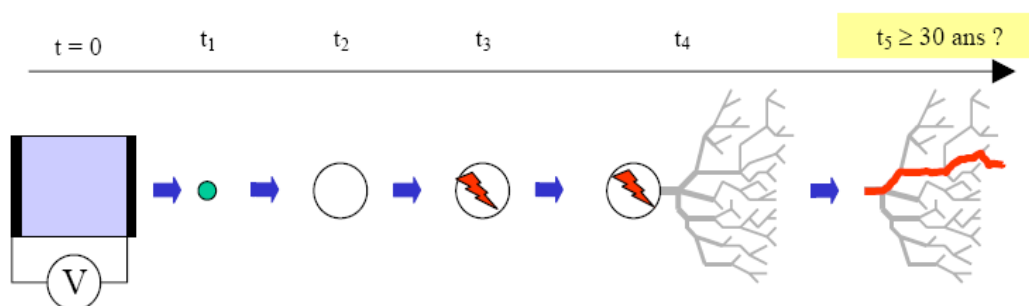


Figure 1.6. Schéma représentant le scénario standard du vieillissement [1,3]

Trois mécanismes fondamentaux décrivent l'endommagement global d'un isolant organique sous l'action d'un champ électrique : le vieillissement électrique, la dégradation et finalement la rupture diélectrique. Ces mécanismes sont illustrés sur la figure 1.7 selon le temps et le champ électrique auxquels ils peuvent avoir lieu.

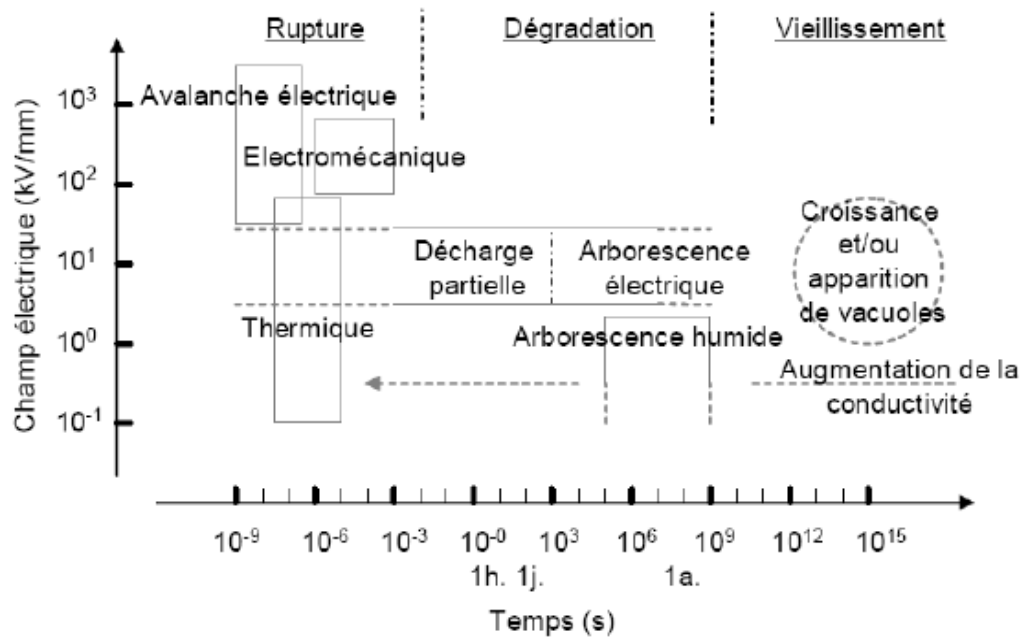


Figure 1.7. Vieillessement, dégradation et rupture d'un isolant en fonction des temps et des champs électriques auxquels ces mécanismes ont lieu [3].

#### 1.4 Différents matériaux isolants

D'après leur état physique, les isolants électriques sont classés en trois grandes catégories : les isolants solides, liquides et gazeux. Selon leur origine on en distingue deux types, les isolants naturels et les isolants synthétiques. Le premier type concerne les isolants minéraux et certains isolants organiques naturels, le second type concerne les matières plastiques et les composites. Les matières plastiques occupent une place importante et tendent à remplacer les matériaux traditionnels comme le bois ou le papier. Elles présentent de nombreux avantages puisque légères, durables et avec les formes souhaitées.

## 1.5 Les polymères

Les polymères sont constitués de longues chaînes appelées macromolécules, elles mêmes constituées d'entités élémentaires appelées monomères. Le nombre de cellules élémentaires ou degré de polymérisation est souvent compris entre 1000 et 10000. Dans la plupart des cas, la masse du polymère présente une structure amorphe mais il arrive qu'il y est une certaine périodicité on parlera alors de cristallinité [19].

Les polymères peuvent être linéaires (les chaînes), ramifiés ou tridimensionnels. La structure du motif et la taille de la chaîne sont deux éléments clés qui permettent de définir la structure chimique d'un polymère [20].

## 1.6 Classification des polymères et leurs comportements

Le développement extrêmement rapide de l'industrie des matières plastiques et la prolifération des composés macromoléculaires ne permettent pas une classification nette et précise de ces matériaux. La classification fondée sur la distinction entre résines thermoplastiques et résines thermo-rigides, communément appelées thermodurcissables, semble correspondre assez bien aux réalités industrielles, du fait que leurs propriétés et les méthodes de mise en œuvre qui les concernent sont différentes [21].

Le comportement des polymères est principalement dicté par le type de liaisons existant entre les chaînes. Les thermoplastiques sont composés de chaînes qui ne sont pas liées entre elles ou qui le sont très faiblement. Ces polymères se ramollissent sous l'effet de la chaleur et durcissent quand ils sont refroidis. L'image classique dite du "plat de spaghetti" est représenté sur la figure 1.8.a. Lorsque le polymère est chauffé à un certain point, les chaînes "glissent" entre elles. La plupart des thermoplastiques sont solubles dans des solvants spécifiques. Les thermodurcissables représentent une autre classe de polymères, ils sont réticulés, c'est-à-dire qu'ils présentent des liaisons covalentes entre les chaînes et une telle configuration est donnée sur la figure 1.8.b. Ces matériaux doivent donc être mis en forme avant la réticulation sous l'action conjuguée d'un initiateur et de la température ou de la lumière par exemple. Les résines époxy ou le caoutchouc après vulcanisation sont des thermodurcissables. Les thermoplastiques élastomères présentent

des liaisons intermoléculaires de nature ionique. Le réseau tridimensionnel peut donc être cassé en chauffant et reconstruit en refroidissant. Ces polymères sont particulièrement intéressants dans le cadre du recyclage [19].

Il existe deux températures caractéristiques importantes pour la mise en forme des polymères : la température de transition vitreuse et la température de fusion. Lorsque la température d'une masse polymère est au dessus de son  $T_g$ , elle est dans un état caoutchouteux. Suivant la réponse à l'application d'une force, on parlera alors de plastique (cas des polymères non réticulés) ou d'élastomère (cas des polymères réticulés). Lorsqu'on arrête d'appliquer cette force, les matériaux élastiques retrouvent leur forme d'origine tandis que les matériaux plastiques conservent leur nouvelle forme.

Si la masse polymère est refroidie au dessous d'une température déterminée, le matériau passe dans un état vitreux, c'est-à-dire dur et cassant comme du verre. C'est cette température particulière que l'on appelle température de transition vitreuse notée  $T_g$ . Les effets des deux types de transition sur le volume spécifique sont montrés sur la figure 1.8.c [19].

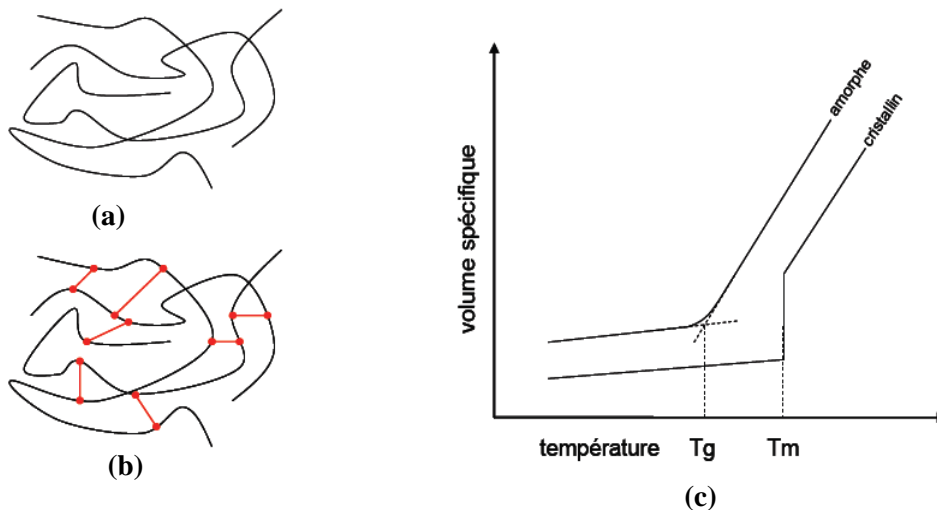


Figure 1.8. (a) représentation d'une masse de polymère non réticulé ;  
 (b) réticulée  
 (c) comportement du volume spécifique d'un polymère en fonction de la température [19].

## 1.7 Quelques exemples d'isolants synthétiques (matières plastiques)

Cette catégorie d'isolants occupe une place intéressante dans l'isolation du matériel électrique et dans notre vie quotidienne.

### 1.7.1 Polyéthylène (PE)

Le polyéthylène est un polymère thermoplastique formé chimiquement par la polymérisation de l'éthylène  $C_2H_4$ . La molécule de polyéthylène se présente sous forme d'une chaîne d'atomes de carbone comme schématisé sur la figure 1.9. Les valences libres des atomes de carbone sont occupées par des atomes d'hydrogène. Cette chaîne contient de 1000 à 20000 monomères [22]. La densité du polyéthylène à l'état amorphe est de  $0.855 \text{ g/cm}^3$  et à l'état cristallin est égale à  $1 \text{ g/cm}^3$ . Sa température de transition vitreuse est de  $8 \text{ }^\circ\text{C}$  [23].

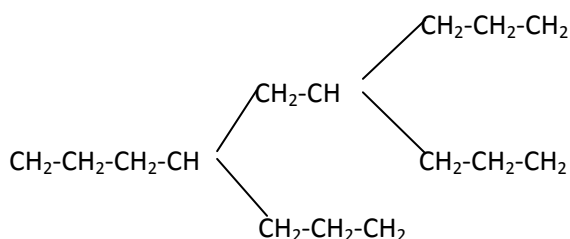


Figure 1.9. Molécule de polyéthylène ramifiée.

Cette matière plastique représente à elle seule, environ le tiers de la production totale des matières synthétiques et constitue la moitié des emballages plastiques. Le polyéthylène est translucide, inerte, facile à manier et résistant au froid. Le polyéthylène présente en général, une bonne rigidité diélectrique, il est assez inerte chimiquement, léger et se prête facilement au moulage.

#### 1.7.1.1 Différents types de polyéthylènes

Il existe différents polyéthylènes classés en fonction de leur densité. Celle-ci dépend du nombre et de la longueur des ramifications présentes dans le matériau. On

distingue deux familles principales : le Polyéthylène Basse Densité (PEBD) et le Polyéthylène Haute Densité (PEHD).

- **Le PEBD** : Il est obtenu par polymérisation radicalaire à température et pression élevées (150 à 300 °C sous une pression allant de 1200 à 2500 bars). Ce mode d'élaboration lui confère une structure irrégulière et ramifiée. Il est souple, même à très basse température (- 50 °C) et il est doux au toucher. Il est utilisé dans des domaines très divers. Sa densité est inférieure à celle de l'eau. Il présente une bonne résistance chimique. Il est transparent et il peut être facilement transformé, de plus il se prête très bien au soudage. Sa durée de vie est très longue à cause de sa grande stabilité mais il se recycle bien.

- **Le PEHD** : De même formule théorique que le PEBD, il est obtenu par polymérisation radicalaire à température modérée sous faible pression (50 à 100 °C sous une pression allant de 20 à 50 bars). Sa structure est plus régulière que celle du PEBD, il est plus rigide et plus résistant à la chaleur (jusqu'à 120 °C).

#### 1.7.1.2 Utilisation

Le polyéthylène est utilisé comme isolant dans les câbles à haute fréquence (coaxiaux) et les câbles à haute tension jusqu'à 200 kV [22]. Le PEHD est également utilisé pour la fabrication d'objets plastiques rigides.

#### 1.7.2 Polychlorure de vinyle (PVC)

Le PVC est un polymère thermoplastique élaboré à partir du chlorure de vinyle dont la forme chimique est donnée sur la figure 1.10. Le PVC est essentiellement amorphe et sa teneur en chlore est de 56.7%. Il est obtenu à partir du chlorure de vinyle monomère par polymérisation en dispersion, en masse ou en émulsion [21].

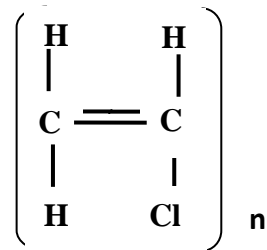


Figure 1.10. Chlorure de vinyle.

Le polychlorure de vinyle (PVC) seul est un plastique très instable et il se brise facilement. Depuis 1930, des additifs tels des plastifiants, des lubrifiants et des stabilisateurs thermiques y sont ajoutés afin de donner certaines caractéristiques aux plastiques comme la flexibilité, la résistance à la chaleur et la durabilité.

On distingue deux types de PVC : Le PVC rigide, sans plastifiant et le PVC plastifié.

- **Le PVC rigide (sans plastifiant) :** Il est très solide à température ordinaire, mais se fragilise à froid et perd de sa rigidité au dessus de 70°C. Grâce à sa forte teneur en chlore, il brûle difficilement et a une tenue chimique remarquable. Il se met en œuvre par extrusion ou calandrage et aussi par injection avec des formulations spécifiques.

- **Le PVC plastifié :** Il est plus ou moins souple selon la proportion de plastifiant. Il est souvent transparent et se met en œuvre facilement par tous les procédés de transformation et se soude aisément.

### 1.7.2.1 Fabrication du PVC

Le PVC est fabriqué à la fois à partir d'éthylène issu du pétrole et de chlore récupéré de l'électrolyse du sel (Na Cl). Un sous produit est créé lors de la réaction entre le chlore et l'éthylène : l'acide chlorhydrique. Cette réaction donne naissance au monomère de chlorure de vinyle. La polymérisation s'effectue systématiquement en autoclave. On obtient du PVC de deux façons principales :

- **La polymérisation en suspension** : (la plus utilisée) consiste à mélanger le PVC avec de l'eau en présence d'additifs et d'un initiateur. La poudre de PVC issue de cette centrifugation est séchée et tamisée.
- **La polymérisation en émulsion** : c'est un principe assez similaire mais permet l'obtention d'une poudre de PVC plus fine.

### 1.7.2.2 Propriétés du PVC

Le PVC est très polyvalent. A l'état brut, le PVC est sensible à l'action du rayonnement ultra violet (Vieillissement accéléré). Les fabricants ajoutent au mélange des photo-stabilisants très efficaces. Le PVC a une excellente rigidité diélectrique, une bonne résistance aux acides et bases et une bonne résistance aux hydrocarbures aliphatiques. Il présente toutefois une mauvaise résistance aux hydrocarbures aromatiques et chlorés ainsi qu'aux cétones et esters.

Le PVC pur est instable à la chaleur et à la lumière. Sa température de transition vitreuse  $T_g$  est élevée entre 75 °C et 80 °C, ce qui le rend impropre à de nombreuses applications. Placé dans une flamme, le PVC se brule mais ne propage pas lui-même la flamme.

### 1.7.2.3 Utilisation du PVC

Il est utilisé comme gainage et isolant de câbles d'énergie électrique jusqu'à 10KV environ et des câbles de télécommunications basse fréquence [22].

### 1.7.3 Polystyrène (PS)

Le polystyrène (PS) a été découvert en 1930. Le polystyrène est un plastique dur, cassant et transparent. C'est un produit industriel courant largement diffusé, offrant de très nombreux usages. On le reconnaît facilement à un blanchissement sur les zones de

contraintes avant la rupture ou à sa fumée noire et à son odeur caractéristique lors de sa combustion.

Le polystyrène est un composé aromatique. Sa molécule se présente comme une molécule d'éthylène dans laquelle un atome hydrogène est remplacé par un anneau benzénique (figure 1.11). La polymérisation en masse du styrène liquide à température ambiante, donne le polystyrène possédant les meilleures propriétés électriques [22].

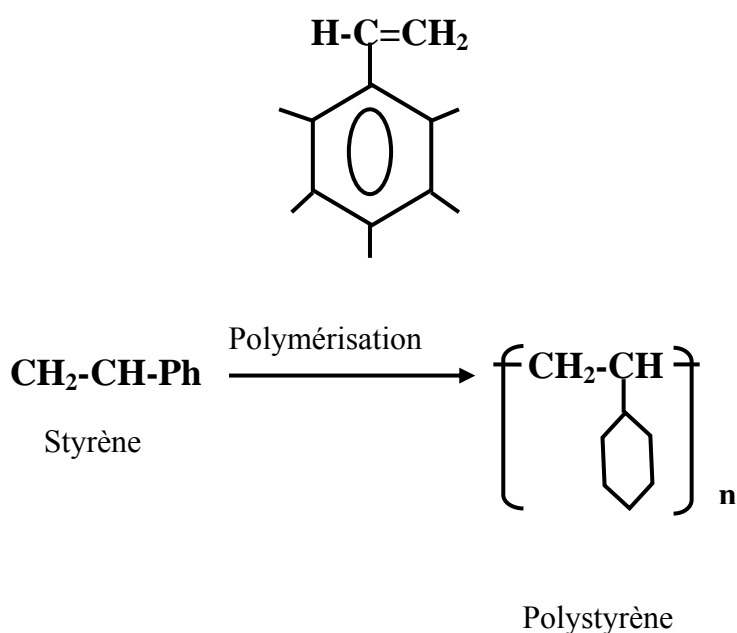


Figure 1.11. Polymérisation du styrène.

Le polystyrène se présente sous deux formes selon le positionnement des groupes phényles :

- la forme syndiotactique, illustrée sur la figure 1.12.a, dans laquelle les groupes phényles se situent alternativement d'un côté et de l'autre de la chaîne.
- la forme atactique donnée sur la figure 1.12.b, dans laquelle les groupes phényles sont attachés de façon aléatoire d'un côté ou de l'autre de la chaîne.

Le polystyrène syndiotactique, de structure régulière, est cristallin, par contre le polystyrène atactique, irrégulier est amorphe [20].

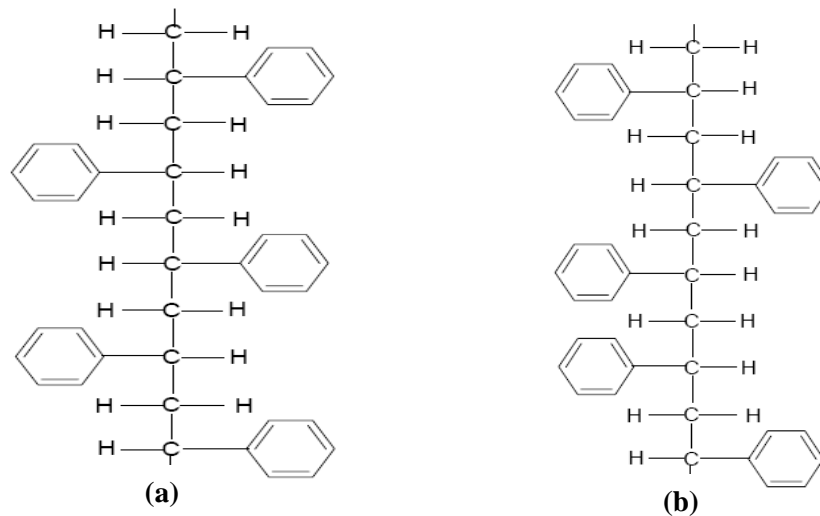


Figure 1.12. Représentation des deux formes de polystyrène

(a) : Le polystyrène syndiotactique  
 (b) Le polystyrène atactique [20].

On distingue trois types de polystyrènes :

- **Le polystyrène cristal ou dense** : Celui-ci regroupe par exemple les ustensiles ou les barquettes en plastique. Le polystyrène "cristal" n'a pas une structure cristalline mais porte ce nom en raison de son aspect transparent [21]. Il polymérise sous forme de perles à haute température en présence d'un adjuvant plastifiant. C'est un plastique dur et cassant. Utilisé pour de nombreux types de boîtes..
- **Le polystyrène choc ou haut impact** : Celui-ci est utilisé le plus souvent dans le domaine de l'industrie. Il s'agit d'ajouter, lors de la fabrication du polystyrène, un agent spécial permettant d'augmenter sa résistance aux chocs. Le polystyrène "choc" ou HIPS (High-impact polystyrène) ou acrylonitrile butadiène styrène (ABS) est un copolymère formé par du styrène et du polybutadiène. C'est le plus commun de la famille des plastiques styréniques car il est résistant et capable de supporter des impacts plus forts que le polystyrène normal. Cet ABS est employé par l'industrie pour des produits rigides,

légers et moulés (bacs à douche). Le polybutadiène a été un des premiers élastomères synthétiques à être inventé car il est très similaire au caoutchouc naturel.

• **Le polystyrène expansé ou PSE** : Celui-ci peut être également appelé le styromousse. Il s'agit de polystyrène dans lequel a été ajouté un agent pour l'expansion lors de sa fabrication. Cela en fait une matière légère constituée de plus de 80% d'air. Ce polystyrène est solide à la température de 20 °C, pâteux à 120 °C et fondant à 160 °C. C'est une sorte de mousse blanche compacte inflammable et combustible. Il existe deux types de PSE : le polystyrène expansé moulé (PSE-M) obtenu à partir d'un polystyrène "expansible" et le polystyrène expansé extrudé (PSE-E). Une première expansion est opérée à la vapeur d'eau puis une période de repos permet aux perles de PS pré-expansées de perdre leur excédent d'eau. Enfin, on procède à l'expansion et on les moule à la vapeur dans la forme voulue. Le polystyrène expansé extrudé est utilisé sous forme de feuilles minces dans les condensateurs, où sa haute résistivité et ses faibles pertes diélectriques sont mieux exploitées.

#### 1.7.4 Le polypropylène (PP)

La molécule de polypropylène représentée sur la figure 1.13 a la forme de celle de l'éthylène dans laquelle un atome hydrogène est remplacé par un groupement méthyl  $\text{CH}_3$ . Le PP qui est produit par polymérisation en chaîne [20] a été découvert en 1957. Ce produit connaît toujours une très forte croissance et il présente de nombreux points forts comme :

- une rigidité élevée ;
- une bonne résistance à la fissuration ;
- une bonne transparence ;
- un brillant de surface.

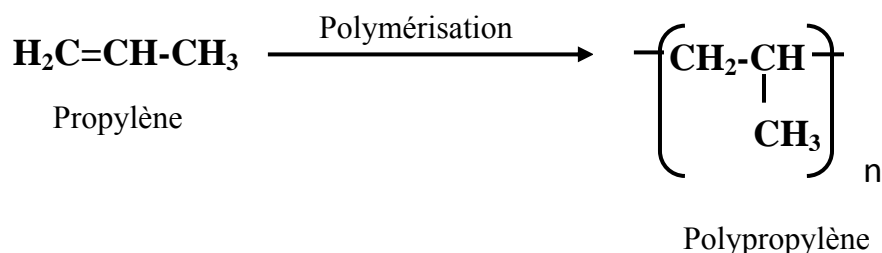


Figure 1.13. Polymérisation du propylène.

Le PP est aussi un polymère semi-cristallin [20], il est très polyvalent et sert à la fois comme thermoplastique et comme fibre. Il est très facile à colorier et n'absorbe pas d'eau.

Le PP film est l'un des plastiques usuels les plus difficiles à recycler, surtout s'il est imprimé. Le contrôle de la polymérisation par catalyse permet de jouer sur la structure afin de produire du polypropylène élastomère.

Le PP est un solide qui fond à des températures de 160 à 170 °C . Ses propriétés essentielles sont sa bonne résistance à la chaleur et à la plupart des agents chimiques. Il est totalement insoluble à froid mais à une température de l'ordre de 80 °C, il commence à se dissoudre dans les hydrocarbures aromatiques et chlorés [21].

#### 1.7.4.1 Caractéristiques physiques

Il a une structure extrêmement régulière et un caractère semi-cristallin. Il est brillant, présente une très grande résistance à la pliure, mais une résistance moyenne au choc.

#### 1.7.4.2 Utilisation du polypropylène

En raison de ses bonnes propriétés électriques et mécaniques, le polypropylène est largement utilisé en particulier dans les domaines suivants : isolateur d'antennes, manchons de raccordement pour les câbles, boîtiers divers, ailettes de refroidissement dans les moteurs. Le polypropylène est utile en combinaison avec le papier dans les condensateurs de puissance servant comme compensateurs d'énergie réactive [22].

### 1.7.5 Le poly-méthacrylate de méthyle (PMMA)

Découverte en 1927, cette matière, plus connue sous les marques de plexiglas, possède une transparence exceptionnelle. Le PMMA est essentiellement produit par le méthyle, grâce aux réactions de polymérisation. Le poly-méthacrylate de méthyle (PMMA) est un thermoplastique amorphe. Il se polymérise à l'aide de radicaux libres qui amorcent une polymérisation radicalaire en chaîne. La cohésion est assurée par des enchevêtrements de chaînes ainsi que des liaisons faibles de type Van der Waals [24].

La figure (1.14) représente le polymère de PMMA.

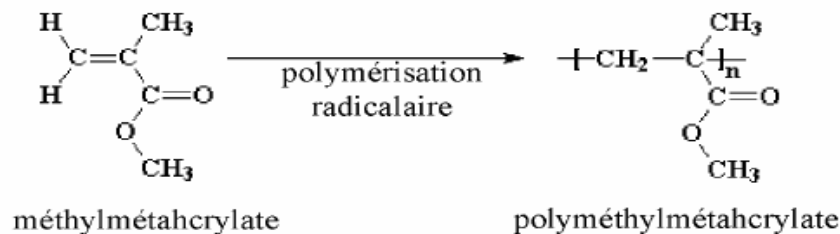


Figure 1.14. Le poly-méthacrylate de méthyle (PMMA)

La polymérisation se fait en trois procédés classiques [25] :

- **Polymérisation en masse** : elle permet d'obtenir des plaques d'épaisseur forte avec un état de surface parfait, isotrope et de qualités optiques excellentes.
- **Polymérisation en solution** : on place simplement le monomère dans une enceinte sous pression avec des températures élevées et en présence de catalyseurs. Le polymère ainsi obtenu présente une pureté élevée.

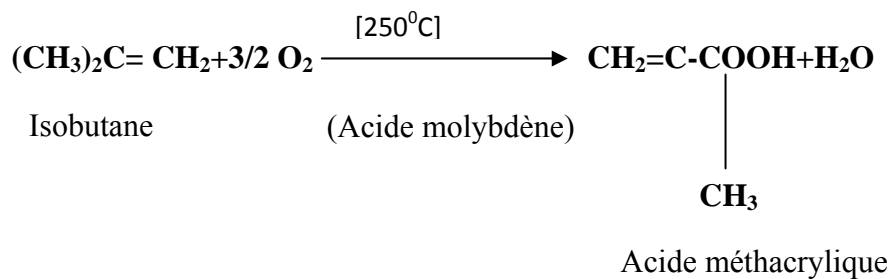
Ces deux procédés conduisent à la fabrication de granulés et plaques extrudées.

- **La polymérisation en émulsion :** ce procédé est caractérisé par le fait que les substances en présence pour la réaction forment deux phases non visibles. Le polymère se forme soit dans l'une des phases soit à la surface de séparation des phases.

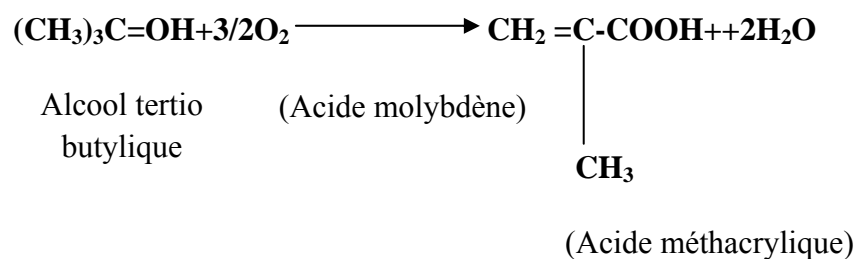
### 1.7.5.1 Procédés de fabrications concurrentes

La fabrication du PMMA se fait en trois étapes essentielles.

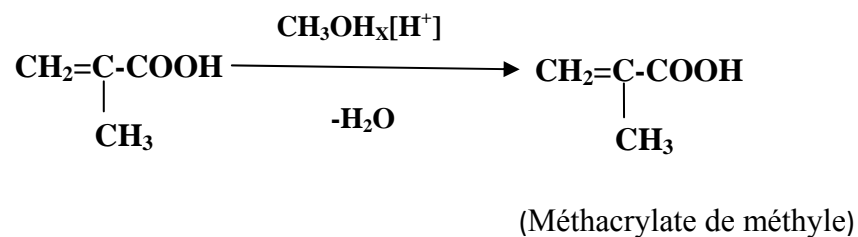
1)



2)



3)



### 1.7.5.2 Caractéristiques du PMMA

Le PMMA est une matière plastique légère et transparente, il offre d'excellentes caractéristiques de résistance mécanique. Il ne jaunit pas et ne se fragilise pas [26]. Le PMMA dans son état amorphe a une densité de  $1.9 \text{ g/cm}^3$  [23], sa température de transition vitreuse  $T_g$  est voisine de  $120^\circ\text{C}$

### 1.7.5.3 Applications du PMMA

Le PMMA trouve également ses applications dans les optiques des voitures, les boîtiers d'emballage, les lentilles, les vitres et les adhésifs [24]. Le PMMA est aussi utilisé dans les interconnexions ou interlignes pour les circuits intégrés [27]

### 1.7.6 Le styrène acrylonitrile (SAN)

Le styrène acrylonitrile (SAN) est un copolymère de styrène et d'acrylonitrile. Le SAN est un plastique styrénique transparent ou blanc. Il est rigide et offre une forte résistance aux agents chimiques.

#### 1.7.6.1 La matière première

Le polystyrène est synthétisé par polymérisation d'un monomère appelé styrène. Le styrène est liquide alors que le polystyrène à température ambiante est un solide vitreux. La figure 1.15 représente le styrène et le polystyrène.

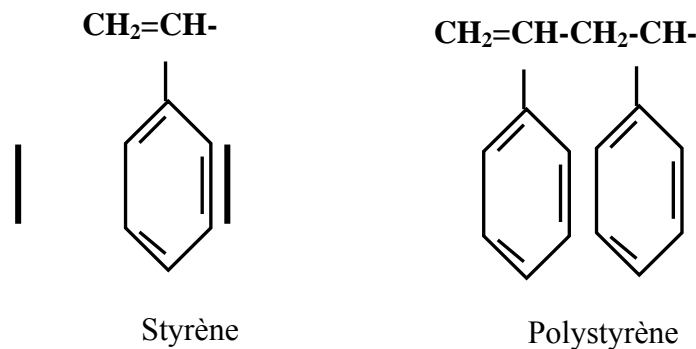


Figure 1.15. Styrène et polystyrène.

#### 1.7.6.2 Caractéristiques du (SAN)

Les propriétés essentielles du SAN sont les suivantes :

- excellente transparence,
- rigidité élevée,
- bonne résistance aux UV pour les formules stabilisées.

La température de transition vitreuse du SAN est de 106 °C et sa densité à l'état amorphe est de 1.08 g/cm<sup>3</sup> [23].

### 1.7.7 Le polycarbonate

Le polycarbonate (figure 1.16) possède un poids moléculaire de 150000 μm environ [22].

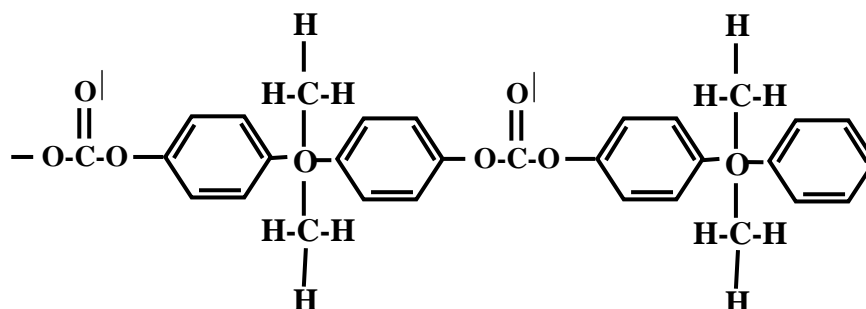


Figure 1.16. Le polycarbonate

#### 1.7.7.1 Caractéristiques du polycarbonate

Son importance en électrotechnique est croissante. Il résiste bien aux chocs et il supporte des températures relativement élevées de l'ordre de 120°C. Ses propriétés électriques sont moyennes [22]. Sa densité est de 1.2 g/cm<sup>3</sup> et sa température de transition vitreuse est de 141°C [23].

#### 1.7.7.2 Utilisation

Les rubans de polycarbonate thermo rétractable sont fréquemment utilisés pour isoler les bobinages. Des feuilles très minces, jusqu'à 2 micromètres d'épaisseur constante et se prêtant bien à la métallisation peuvent être obtenues, d'où l'intérêt du polycarbonate pour les condensateurs de dimensions réduites [22].

### 1.7.8 Poly-tétra-fluor-éthylène (PTFE)

Si on remplace les quatre atomes d'hydrogène de la molécule d'éthylène par quatre atomes de fluor, on obtient le Tétra-fluor-éthylène, dont la polymérisation donne le poly-Tétra-fluor-éthylène (figures 1.17 et 1.18). Ils sont Largement connus sous le nom de téflon. La symétrie de la macromolécule fait du poly-tétra-fluor-éthylène un matériau non polaire [22].

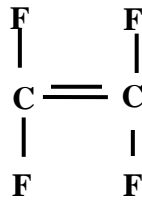


Figure 1.17. Tétrafluoréthylène

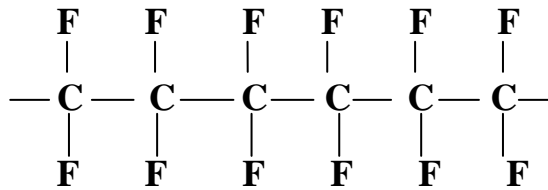


Figure 1.18. Poly-tétra-fluor-éthylène

#### 1.7.8.1 Caractéristiques

Les principales caractéristiques du poly tétra fluor éthylène sont :

- une permittivité quasi constante jusqu'à  $10^{10}$ Hz,
- une résistivité élevée et insensible à l'humidité ;
- une absence de dégradation sous l'effet de décharges (effluves, ...etc) dans la limite du champ électrique admissible.

### 1.7.8.2 Utilisation

Le PTFE est couramment utilisé dans les connecteurs à haute fréquence. Chargé de fibres de verre, on peut en faire des isolateurs de suspension sur lesquels la neige ne s'accumule pas. Il sert également à la confection d'espaceurs dans les câbles cryogéniques. D'une façon générale, son usage est indiqué dans les conditions thermiques extrêmes [22].

### 1.7.9 Polyisoprène

Le poly-isoprène appartient à la famille des élastomères amorphes [20] : c'est le caoutchouc naturel représenté sur la figure 1.19. Ce polymère s'obtient également par voie de synthèse. La vulcanisation est produite par le soufre qui établit des liaisons entre chaînes voisines en faisant éclater les doubles liaisons. [22]

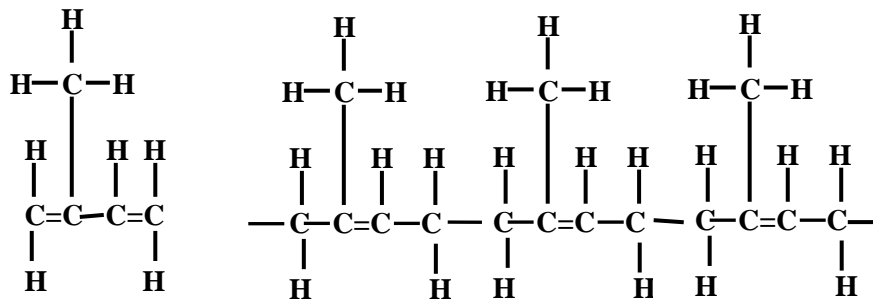


Figure 1.19. Le poly-isoprène (le caoutchouc naturel)

#### 1.7.9.1 Caractéristiques du poly-isoprène

Les caractéristiques principales du poly-isoprène sont les suivantes : il a une résistivité électrique élevée mais il résiste mal aux courants superficiels. La présence du soufre le rend légèrement polaire et la température maximum admissible en permanence n'est que de 60°C.

### 1.7.10 Caoutchoucs silicones

Les caoutchoucs silicones sont des polymères de poids moléculaire élevé. Ils se distinguent par la présence de silicium dans la chaîne principale de la molécule. Leur degré de réticulation peut être facilement dosé, de sorte que ces matériaux soient susceptibles de se présenter aussi bien comme des élastomères que comme des thermodurcissables [22].

#### 1.7.10.1 Caractéristiques

Leurs caractéristiques spécifiques consistent en une excellente tenue à la température provenant de la stabilité de la liaison Si-O constituant la chaîne principale. Ils résistent bien aux courants superficiels et leur résistivité varie peu en fonction de la température.

#### 1.7.10.2 Utilisation

Les caoutchoucs silicones sont utilisés pour l'isolation des conducteurs et des câbles. Ils servent à isoler divers composants haute tension et sont utilisés en électronique.

### 1.7.11 Polyesters non saturés

Ils font partie de la famille des plastiques thermodurcissables. Les diverses familles d'esters sont représentées sur la figure 1.20. Ces esters sont dits non saturés car le groupement carboxyle est non saturé.

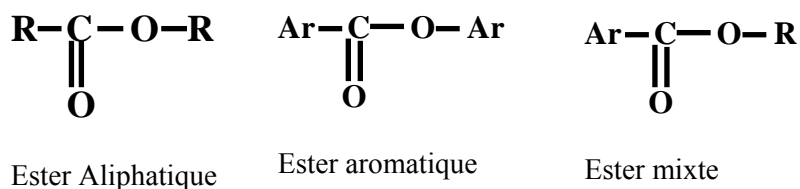


Figure 1.20. Différentes familles d'esters.

Le polyester ou styrène est fréquemment utilisé en électrotechnique. Sa résine est formée d'un polyester non saturé, de haut poids moléculaire, en suspension dans du styrène. Ce dernier étant lui-même non saturé, les liens de valence nécessaires à la réticulation sont fournis par les deux constituants de la résine. La réticulation prend normalement plusieurs heures.

#### **1.7.11.1 Caractéristiques**

La permittivité et les pertes diélectriques de ce matériau dépendent fortement de la nature des charges et des conditions de réticulation. Leur résistance aux courants superficiels est bonne. Hautement réticulé, le polyester est cassant. Il brûle en dégageant une suie et une odeur particulière caractéristique du styrène. Il est hygroscopique et possède une bonne stabilité chimique [22].

#### **1.7.11.2 Utilisation**

Le polyester est utilisé dans la fabrication de grosses pièces isolantes : mats d'antennes légères, protection d'antennes, armoires de commutation et de distribution de câbles.

### **1.8 Les isolants solides organiques**

#### **1.8.1 Papiers**

Depuis de très nombreuses années, le papier représente un matériau de choix pour l'isolation électrique. Non seulement c'est un matériau bon marché mais, de plus sa structure lui permet de s'imprégner facilement et son association avec un imprégnant bien choisi lui confère des propriétés remarquables [28]. Nous rencontrons une grande variété de qualités de papier obtenues selon divers processus de fabrication permettant de répondre au mieux aux contraintes imposées par la mise en œuvre et la tenue en service des isolations auxquelles ils sont destinés.

### 1.8.1.1 Composition du papier

Le papier se compose de :

**a. cellulose** : le papier est constitué principalement de la cellulose, qui se présente sous formes de longues chaînes (100 nm environ) qui sont la répétition d'un nombre plus ou moins important d'anneaux de glucose.

**b. hémicellulose** : elle est composée de chaînes de même type que celles de la cellulose, mais plus courtes et ramifiées, ce qui lui confère une structure amorphe.

**c. lignine** : sa composition exacte n'est pas encore connue, elle possède une structure amorphe et c'est elle qui, dans le bois, soude les fibres entre elles.

### 1.8.1.2 Procédé de fabrication du papier

La fabrication du papier passe par plusieurs phases dont certaines permettent de donner aux papiers les propriétés qui améliorent leur tenue dans les applications industrielles. Ceci se réalise en procédant par la dissociation des structures cellulosiques cimentées par lignine et la séparation des fibres en état individuel. Pour la fabrication du papier kraft à partir du bois, cette transformation se fait essentiellement par un procédé chimique qui permet d'éliminer la lignine et l'hémicellulose. On obtient ainsi la pâte à papier.

### 1.8.1.3 Propriétés du papier non imprégné

#### 1. Son épaisseur

- L'épaisseur du papier utilisé dans les condensateurs est de 5 à 25  $\mu\text{m}$  ;
- Le papier utilisé entre les couches du transformateur : 75 à 200  $\mu\text{m}$  ;
- Le papier de guipage des conducteurs constituant les enroulements des transformateurs ne dépasse pas 75 $\mu\text{m}$ .

#### 2. Masse volumique

- Celle du papier des condensateurs est comprise entre 1.1 jusqu'à 1.3  $\text{g}/\text{cm}^3$  ;
- Celle du papier de transformateurs et les câbles est comprise entre 0.7 à 1  $\text{g}/\text{cm}^3$ .

### 3. Rigidité diélectrique

Pour le papier sec, elle est comprise entre 50 à 80 kV/mm , pour le papier imprégné d'huile elle atteint 100 kV/mm.

### 4. Permittivité relative

Elle est comprise entre 4 à 6 .

#### 1.8.1.4 Applications du papier

Le papier presspahn trouve ses applications comme isolant entre spires et entre enroulements des transformateurs de haute et moyenne tension. Il est utilisé aussi comme cales de fermeture des moteurs, joints et pièces diverses [28].

#### 1.8.2 Textiles

Leurs constitutions est du Coton, de la soie naturelle ou des fibres artificielles. Ils sont utilisés sous forme de rubans pour l'isolation de conducteurs de faible diamètre ou de bobines, et pour le guipage de câbles. La température maximale admissible est comprise entre 90 et 120 °C. Ils ont une rigidité de 5 à 10 kV/mm.

## 1.9 Les isolants solides minéraux inorganiques

### 1.9.1 Le verre

Le verre est solide, fragile et généralement transparent, préparé par fusion d'un mélange complexe contenant de la silice. Le verre est une substance amorphe (non cristalline) composé principalement de silice fondue à haute température, à laquelle on ajoute des silicates et des borates. Le verre est refroidi jusqu'à devenir rigide sans qu'il y ait cristallisation. Les molécules sont disposées de manière désordonnée, mais néanmoins avec suffisamment de cohésion pour offrir les propriétés d'un solide. Si on le chauffe suffisamment, il peut reprendre une forme liquide. En général transparent, le verre peut également être translucide ou opaque. Sa couleur varie selon sa composition et sa température maximale est comprise entre 400 et 500°C. Le facteur de pertes diélectriques

du verre varie entre 0.02 et 0.04 . Les verres sont surtout utilisés dans les isolateurs des pylônes.

## **1.9.2 Les Céramiques**

Les céramiques sont des substances dures et souvent cassantes, présentant généralement une juxtaposition de phase cristalline et amorphe. Elles sont fabriquées à partir de silicate d'alumine, de silicate de magnésium, de quartz, d'alumine, de dioxyde, de titane, ...etc.

### **1.9.2.1 Classes des céramiques et leurs utilisations**

En fonction de leur composition, les céramiques sont classées en quatre grandes familles [22].

- avec une proportion de 40 à 50% de silicate d'alumine, 30 à 40% de quartz et 20 à 30% de feldspath (silicate double d'aluminium et de potassium, ou d'un autre métal alcalin) on obtient une porcelaine formée de cristaux de quartz et de silicate d'aluminium enrobés d'une masse amorphe. Cette céramique est utilisée pour les isolateurs de grande dimension.

-Avec 70 à 90% de silicate de magnésium, 5 à 10% de silicate d'alumine et 5 à 10% de feldspath on obtient une céramique formée de silicate de magnésium cristallisé enrobé d'une masse amorphe. Elle est utilisée en haute fréquence et comme support pour les résistances à films ou bobinées.

En ajoutant aux silicates d'alumine et de magnésium, des composés de titane tels que le dioxyde de titane, le titanate de magnésium ou de baryum, on obtient des céramiques à permittivité très élevée utilisées pour la fabrication des condensateurs de petites dimensions.

Les céramiques à haute teneur en alumine (50 à 80%) sont employées comme substrats pour la confection de circuits intégrés hybrides à couches épaisses, car les dépôts métalliques y adhèrent convenablement.

### 1.9.2.2 Caractéristiques

Les céramiques résistent aux courants superficiels et aux arcs électriques. Elles conservent leurs bonnes propriétés électriques jusqu'à des températures de l'ordre de 1000°C. Les céramiques ne vieillissent pas et sont très résistantes aux agents chimiques. Leur rigidité diélectrique varie entre 10 et 20 kV/mm. Leur permittivité relative varie de 10 à 3000 alors que leur facteur de pertes diélectriques varie entre  $5 \cdot 10^{-4}$  à  $1,2 \cdot 10^{-2}$  [22].

### 1.9.3 Les micas et les produits micacés

Les matériaux basés sur le mica, un minéral qui se rencontre dans la nature, jouent un rôle central dans la conception et la fabrication des machines tournantes haute tension. A l'origine, le matériau se présentait sous forme de lames de mica mais à présent l'industrie utilise de façon prédominante des papiers au mica. Le papier au mica, quand il est soutenu par un verre tissé ou un film de renfort et imprégné avec une résine époxy ou similaire, est utilisé pour isoler les barres de cuivre qui constituent l'enroulement statorique d'une machine. Les micas sont également utilisés dans l'isolation de base de l'enroulement qui apparaît sur la section d'une encoche du stator [15].

Les micas et les produits micacés sont en général utilisés pour l'isolation à haute température des radiateurs et des composants de puissance (feuilles de mica).

#### 1.9.3.1 Propriétés

Les propriétés des micas et des produits micacés sont :

- Une température maximale comprise entre 500 et 1000 °C ;
- Un facteur de pertes diélectriques compris entre  $3 \cdot 10^{-4}$  et  $26 \cdot 10^{-4}$  ;
- Une rigidité diélectrique comprise entre 210 et 240 kV/mm ;

- Une excellente résistance à la décharge couronne ;
- Une permittivité relative comprise entre 6 et 7.

### **1.10 Conclusion**

Nous avons donné dans ce chapitre quelques généralités sur les matériaux isolants solides utilisés dans le génie électrique pour les besoins des dispositifs électriques. Les isolants solides, notamment les polymères sont très demandés dans le domaine industriel eu égard à leurs excellentes propriétés électriques, thermiques et mécaniques mais surtout pour leurs coûts raisonnables. La fiabilité des matériaux isolants reste toujours un des soucis majeurs de l'électrotechnicien, surtout que ces matériaux sont constamment soumis à des contraintes électriques sévères.

## 2.1 Historique

Les phénomènes de décharge électrique ont fait l'objet de plusieurs études et cela depuis plus d'un siècle [21,29]. Les premières études décrivant leur évolution et proposant des mécanismes datent du début du XX<sup>ème</sup> siècle [30]. En effet, les premières publications sur l'effet couronne datent de 1911[31]. Une des conséquences du transport de l'énergie électrique à de hauts niveaux de tension est l'apparition de l'effet de couronne autour des lignes de transport [32]. C'est ainsi que les premières expériences sur les fils conducteurs minces portés à des tensions suffisamment élevées ont montré qu'il se forme autour d'eux une gaine lumineuse, de couleur bleu-violet, dont l'épaisseur augmente avec la tension. C'est la présence de cette lueur qui a donné naissance à l'expression, universellement employée de décharge couronne ou corona effect [6]. Plusieurs études ont été menées pour expliquer les différents mécanismes mis en jeu lors de la formation, du développement et de la propagation de cette décharge. Townsend donna une théorie pour l'obtention d'une décharge auto-entretenu. Cette théorie se retrouve limitée pour les hautes pressions [33].

Le pionnier de l'étude scientifique de l'effet couronne est un chercheur américain, R.W. Peek, qui, vers 1920 établit une loi empirique exprimant le seuil d'apparition de la décharge couronne, en terme de champ électrique superficiel. Cette loi célèbre est toujours d'usage aujourd'hui. Par la suite on trouve de nombreuses théories qui ont été élaborées pour expliquer la formation des pertes par effet couronne. On peut citer les travaux de Ryan et Henline (1924), de Hesselmeyer et Kostko (1925), de Holm (1927) [34]. Cependant, leur étude en laboratoire n'a véritablement commencé qu'au cours du siècle passé avec les progrès effectués dans le domaine de l'électricité. Les premiers essais en laboratoire datent de 1932 [32]. Le développement des systèmes de haute tension a donné une grande impulsion à la recherche sur les décharges couronne pour différents intervalles d'air. Vers les années 1940, Loeb, Meek et Raether, proposent un nouveau modèle de propagation de l'avalanche électronique lors de la décharge [33].

De nombreux ouvrages traitent de l'effet de couronne. Vers les années 1950, les très hautes tensions utilisées pour le transport d'énergie électrique ont amené les

concepteurs à considérer un autre phénomène. En effet, en présence de pluie, de brouillard ou de neige mouillée, on observe des vibrations mécaniques induites par effet couronne sur les conducteurs portés à la haute tension.

Les phénomènes de décharges électriques, font toujours l'objet de recherche active auprès des scientifiques. On pourrait s'étonner de cet état de fait mais on comprendrait vite que cela n'est dû qu'à la très grande complexité du phénomène et des mécanismes qui le constituent. Cependant de grandes avancées ont été faites ces dernières décennies dans l'amélioration des moyens de diagnostic des premiers instants de la décharge et donc dans l'étude des mécanismes d'initiation. Cela a permis d'accroître les connaissances sur le phénomène et d'avancer dans les applications qui ont d'ailleurs connu de bien plus larges expansions [35]. Les travaux de Clements et al en 1987 font une analyse complète sur la physico-chimie de la décharge électrique de type «pulsed streamer corona» ou «corona-like» avec deux électrodes immergées dans l'eau, avec et sans bulles d'air au travers de l'électrode haute tension. Avec le type de décharge électrique de géométrie pointe-plan, la spectroscopie d'émission est employée pour montrer la production de quantité significative des radicaux d'hydrogène dans la phase liquide [36].

Depuis le milieu des années 1990 [37], l'intérêt des constructeurs automobiles vis à vis des technologies liées aux plasmas froids produits par décharge couronne, pour la problématique NO<sub>x</sub>-Particules des moteurs Diesel n'ont cessé de croître. Cependant le côté utile de la décharge couronne ne doit pas éluder un autre côté nuisible de cette décharge [38], comme les pertes de puissance au niveau des lignes de transport d'énergie haute tension et la détérioration d'isolation dans les matériels électriques utilisant la haute tension.

Les propriétés physico-chimiques des décharges couronne ont rapidement suscité un intérêt important dans différents domaines et les applications actuelles dans l'industrie sont nombreuses, des néons aux écrans plasma en passant par les ozoneurs [30]. De nombreux travaux ont été orientés dans la direction de l'analyse des différents paramètres caractérisant cette décharge. Tous ces travaux plus ou moins récents sur la décharge

couronne montrent que la théorie de la décharge couronne n'est pas établie de manière indiscutable [28,38].

## 2.2 décharge couronne

Toutes les décharges pré-disruptives apparaissant sous la forme de lueurs diverses qui prennent naissance au voisinage d'une électrode à faible rayon de courbure ou dans un champ non uniforme se qualifient de décharges couronne [31]. La décharge couronne est liée à l'apparition de l'avalanche électronique qui se développe dans un intervalle gazeux séparant deux électrodes asymétriques soumises à un champ électrique hétérogène à des pressions de quelques torrs à quelques atmosphères. La décharge couronne se manifeste dans les conditions naturelles. Elle apparaît lorsque la valeur maximale du champ électrique atteint celle du champ d'ionisation du gaz «air» et se manifeste sur toute la gamme de fréquences de la tension. La décharge couronne se caractérise par des phénomènes de nature optique, acoustique et électrique [6].

L'étude de ce phénomène est basée expérimentalement sur la configuration plan-plan sous tension continue. Cependant la bonne compréhension des phénomènes agissant dans cette configuration permet la maîtrise des phénomènes apparaissant dans les autres géométries d'électrodes (pointe-plan). L'avantage de la décharge couronne est de pouvoir fonctionner avec tous les types d'alimentation électrique, par contre la difficulté principale rencontrée avec ce type de décharge est la transition à l'arc [33].

Dans ce chapitre, nous allons décrire brièvement les caractéristiques et le mécanisme de la décharge couronne, et en particulier la décharge couronne négative en géométrie pointe-plans.

## 2.3 Phénomènes de multiplications électroniques : Phénomènes de collision

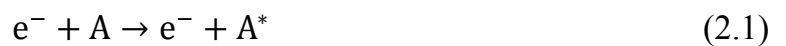
L'application d'un champ électrique suffisamment intense conduit à l'ionisation du gaz. Cette dernière se fait par le transfert de l'énergie cinétique des électrons aux molécules neutres du gaz, et dans ce cadre il existe deux types de collisions entre ces éléments [33.39.40.41].

**1. Choc élastique :** dans ce cas les atomes conservent la même structure interne, seule leur vitesse est accrue. L'énergie du système reste inchangée.

**2. Choc inélastique :** dans ce cas l'énergie interne des particules change. Les chocs inélastiques sont la source d'un nombre important de réactions physico-chimiques qui vont alors modifier les propriétés macroscopiques du gaz.

**a) Excitation atomique :** un atome neutre peut être excité par collision avec un électron ou bien par absorption d'un photon.

- Excitation par collision avec un électron



- Excitation par absorption d'un photon



Avec :

$h$  : Constante de Planck «  $h = 6.62 \cdot 10^{-34} \text{J} \cdot \text{s}$  »,

$\nu$  : Fréquence du photon « Hz »,

$h\nu$  : Énergie du photon « J »,

Lorsque l'atome excité revient à son état initial, un photon est émis, c'est ce processus qui intervient dans l'effet couronne et qui est responsable des effets lumineux :



**b) Ionisation par choc électrique :** ce phénomène est régi par l'équation (2.4).



**c) photon suffisamment énergétique.**



**d) Recombinaison et attachement :** les processus conduisant à la diminution du nombre d'électrons libres dans un gaz ionisé peuvent être de deux types : attachement ou recombinaison.

- L'attachement :



- La recombinaison :



## 2.4 Différents régimes de la décharge (caractéristique courant-tension)

La figure 2.1 décrit le comportement du courant en fonction de la valeur de la tension appliquée. La courbe permet de distinguer quatre régimes régissant la décharge couronne [4,16,28,40,41,42,43,45].

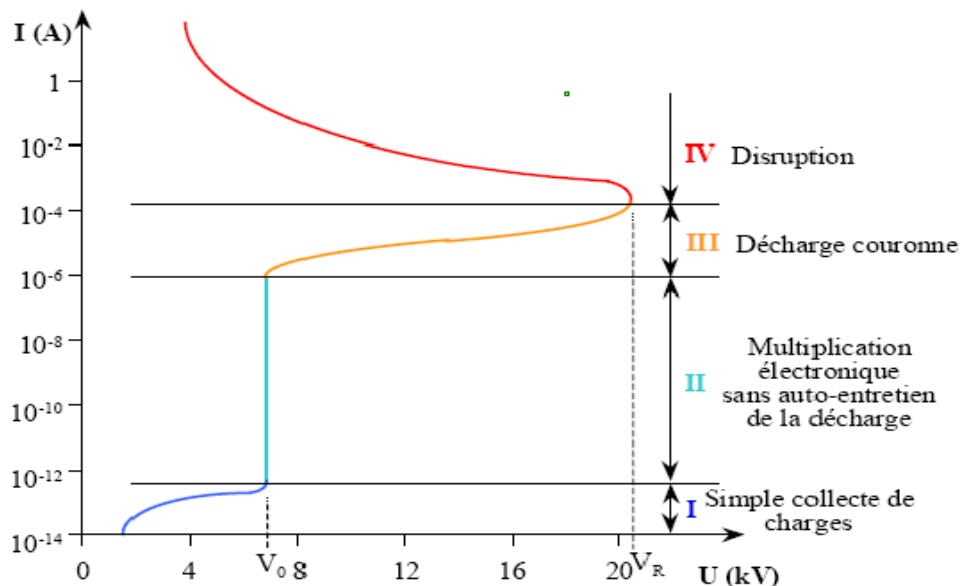


Figure 2.1. Caractéristique courant-tension d'une décharge couronne dans l'air à pression atmosphérique (configuration pointe-plan) [1,26,42,46].

- ✓ le premier régime : consiste en la collecte des espèces chargées présentes naturellement dans le milieu. Ces espèces sont produites par l'impact de rayons cosmiques ou de particules issues de la désintégration spontanée de certains atomes (radioactivité naturelle) sur le gaz présent dans l'espace inter électrodes.
- ✓ Le second régime : qui se produit à partir d'une tension seuil «  $V_0$  », traduit le déclenchement de l'avalanche électronique de Townsend mais ne répond pas encore au critère d'auto-entretien de la décharge, la décharge est qualifiée de non autonome car elle dépend de processus d'ionisation externes pour donner naissance aux électrons germes. le courant augmente très fortement pour une très faible variation de la tension appliquée.
- ✓ Le troisième régime : l'ionisation du gaz par la décharge est suffisante pour ne plus nécessiter de phénomènes d'ionisation extérieurs : la décharge est autoentretenu. C'est le régime de la décharge couronne, où apparaissent les dards, appelés aussi streamers, qui est responsable de la composante impulsionnelle du courant.
- ✓ Le quatrième régime : au-delà d'une tension appliquée «  $V_r$  », la température du canal augmente fortement, ce qui provoque la dilatation brutale du gaz. Le champ réduit «  $\frac{E}{N}$  » est alors suffisamment important pour que les phénomènes d'ionisation deviennent majoritaires par rapport à l'attachement électronique. Le régime d'arc est atteint, le milieu passe à l'état de plasma thermique.

#### 2.4.1 Mécanisme de la décharge couronne

Les décharges sont interprétées sur la base de deux modèles [28,47] :

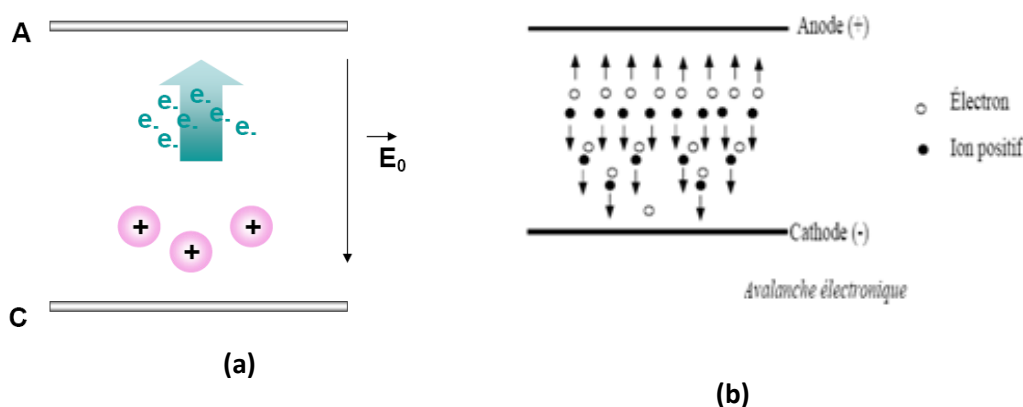
- ✓ Le premier concerne les décharges à long rayon d'action faisant intervenir l'intervalle de décharge tout entier et notamment les effets secondaires à la cathode : c'est la décharge de Townsend.
- ✓ Le deuxième modèle mis au point pour expliquer la rapidité des phénomènes concernant les décharges à court rayon d'action, faisant intervenir la situation locale : c'est la décharge par Streamers.

### 2.4.2 La décharge de Townsend et critère d'auto-entretien de la décharge

Comme nous venons de le voir, l'énergie cinétique d'un électron détermine sa capacité à exciter ou à dissocier les molécules du gaz plasmagène. L'énergie acquise par un électron placé entre deux électrodes dépend de son libre parcours moyen et du champ électrique auquel il est soumis. L'obtention d'un nombre d'électrons suffisant pour exciter le gaz de façon significative exige un mécanisme de multiplication. Si l'énergie d'un électron est supérieure à l'énergie d'ionisation d'une molécule, alors un choc inélastique est susceptible de libérer un électron par ionisation.

L'électron obtenu par ionisation est alors accéléré par le champ électrique et peut à son tour ioniser de nouvelles molécules.

Townsend a proposé en 1914 l'introduction d'un coefficient d'ionisation « $\alpha$ » appelé premier coefficient de Townsend en vue de traduire mathématiquement ce phénomène d'ionisation. Ce coefficient dépend du champ réduit « $\frac{E}{N}$ » (avec  $N$  désignant la densité du gaz) et de « $\frac{1}{\alpha}$ » qui représente le libre parcours moyen d'un électron entre deux collisions ionisantes. L'apparition d'un électron primaire au niveau de la cathode se traduit par l'arrivée de « $\exp(\alpha d)$ » électrons au niveau de l'anode. Ce processus est appelé «avalanche électronique». Ceci est illustré sur la figure 2.2.



La relation de Townsend s'écrit alors :

$$I = I_0 \exp(\alpha d) \quad (2.9)$$

Avec :

$I$  : Courant (A).

$I_0$  : Courant initial dû aux électrons primaires (A).

$d$  : Distance inter électrodes (m).

$\alpha$  : Premier coefficient de Townsend ( $m^{-1}$ ).

En dehors de ce mécanisme de multiplication des électrons proposé par Townsend, des électrons secondaires peuvent être émis par impact d'ions positifs « $M^+$ » sur la cathode ou par impact de photons émis par désexcitation radiative après impact électronique. La probabilité de produire ainsi des électrons secondaires se traduit par le critère d'auto-entretien de la décharge, où la condition d'apparition d'une décharge disruptive autonome (claquage) s'écrit [30] :

$$\gamma \cdot (\exp(\alpha d) - 1) = 1 \quad (2.10)$$

Comme ce mécanisme est consommateur d'électrons, il est considéré comme compétitif du mécanisme d'ionisation. Pour prendre en compte ce phénomène, il convient alors d'introduire dans la relation de Townsend une probabilité d'attachement d'électrons « $\eta$ » :

$$I = I_0 \cdot \exp^{(\alpha-\eta)d} \quad (2.11)$$

Le critère d'auto-entretien de la décharge s'écrit donc :

$$\gamma \cdot (\exp^{(\alpha-\eta)d} - 1) = 1 \quad (2.12)$$

Et par conséquence on a [46] :

✓ Si  $\gamma \exp^{\alpha d} < 1$  : la décharge est dite non autonome car elle ne peut se maintenir d'elle-même par le fait des mécanismes secondaires si l'apport d'électrons créés par une source extérieure est interrompu.

- ✓ Si  $\gamma_{\text{exp}}^{\text{ad}} = 1$  : le nombre d'ions créés par l'avalanche primaire est un moyen juste suffisant à maintenir la décharge par bombardement de la cathode. La décharge est autonome, c'est-à-dire qu'elle peut se maintenir en l'absence d'une source extérieure de production de charges. Ce critère définit donc la tension d'amorçage.
- ✓ Si  $\gamma_{\text{exp}}^{\text{ad}} > 1$  : le processus des avalanches successives est cumulatif et le courant de décharge croît d'autant plus rapidement que «  $\text{exp}^{\text{ad}}$  » dépasse l'unité.

### 2.4.3 Limite du critère de Townsend

1. Le mécanisme d'avalanche décrit par Townsend ne conserve sa validité que pour des valeurs de produits «p. d» inférieures à 200 torr. Au-delà, l'expérimentation montre qu'il se produit des phénomènes peu compatibles avec le mécanisme d'avalanche de Townsend [30].
2. A partir de l'instant où le critère de Townsend est satisfait, un temps minimum est nécessaire pour que puissent apparaître les mécanismes secondaires d'ionisation. Il est imposé par le transit des ions positifs vers la cathode sous l'effet du champ électrique. Or, à des pressions voisines d'un bar, les temps mesurés sont de l'ordre du centième de ceux que nécessite le transit des ions positifs, en raison de leur fiabilité quand la pression augmente. A cet égard, le domaine de validité du modèle pourrait être étendu par l'intervention d'autres mécanismes tels le bombardement de la cathode par des photons émis au sein de l'avalanche primaire.
3. La densité du courant de décharge croît avec la pression, la faible mobilité des ions positifs crée alors une concentration de la charge d'espace qui modifie le champ appliqué initialement, et donc la valeur du coefficient « $\alpha$ ». On peut alors réécrire le critère de Townsend sous la forme plus générale :

$$\gamma\{\text{exp}(\alpha d) - 1\} = 1 \quad (1.13)$$

4. On ne peut expliquer cependant que la constitution de la cathode, par l'intermédiaire du coefficient  $\gamma$ , n'ait plus d'influence sur la tension d'amorçage pour les grandes valeurs du produit «pd». Cette indépendance est particulièrement évidente dans le cas de

la décharge couronne près d'une pointe positive, mais elle est confirmée en champ homogène par l'observation du streamer ou dard se développant à partir de l'anode ou dans l'espace inter-électrodes.

### 2.4.5 Loi de Paschen

Paschen a établi une loi empirique de comportement des gaz, connue sous le nom de loi de Paschen. Cette dernière énonce que la tension disruptive d'un gaz qui représente la tension à partir de laquelle une décharge est observée, entre deux électrodes parallèles dépend de la valeur du produit de la pression du gaz avec la distance inter-électrodes (figure 2.3) ; la relation s'écrit :

$$V_s = f(p.d) \quad (2.14)$$

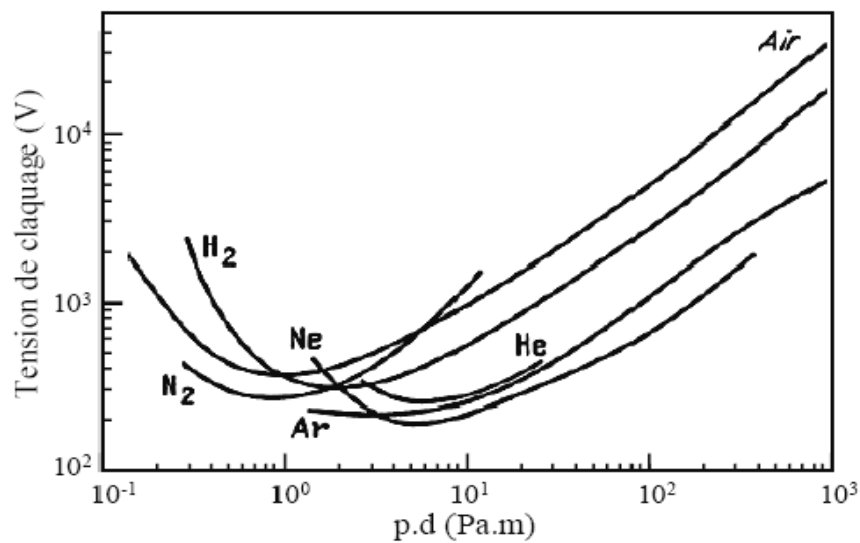


Figure 2.3. Loi de Paschen pour différents gaz [30,41,42,44,45,48].

Le mécanisme proposé par Townsend permet d'expliquer de manière théorique la loi empirique de Paschen décrivant la tension nécessaire à l'apparition d'une décharge disruptive en fonction du produit « pd » équation (2.15) [30].

$$V_s = \frac{B.p.d}{\ln(A.p.d) - \ln\left(\ln\left(1 + \frac{1}{\gamma}\right)\right)} \quad (2.15)$$

Les constantes A et B, qui dépendent du gaz, peuvent être déterminées à partir du premier coefficient d'ionisation « $\alpha$ ».

Avec :

$$\alpha = A \cdot p \cdot \exp^{-B \cdot \frac{p}{E}} \quad (2.16)$$

Les travaux de Coliatene [41] montrent que la tension minimale (minimum de Paschen) d'initiation d'une décharge dans l'air en champ uniforme reste inchangée ( $\approx 320\text{V}$ ) quelle que soit l'augmentation de la température. Cela signifie que ce minimum est «universel» [41].

#### 2.4.6 Théorie des streamers

Dans un champ électrique suffisant pour créer l'amorçage, la vitesse des électrons est environ 100 fois supérieure à celle des ions positifs, si bien que l'avalanche se développe comme un nuage d'électrons laissant derrière lui des ions positifs quasi stationnaires, l'avalanche conduit alors à la formation d'une structure dipolaire comme le montre la figure 2.4.

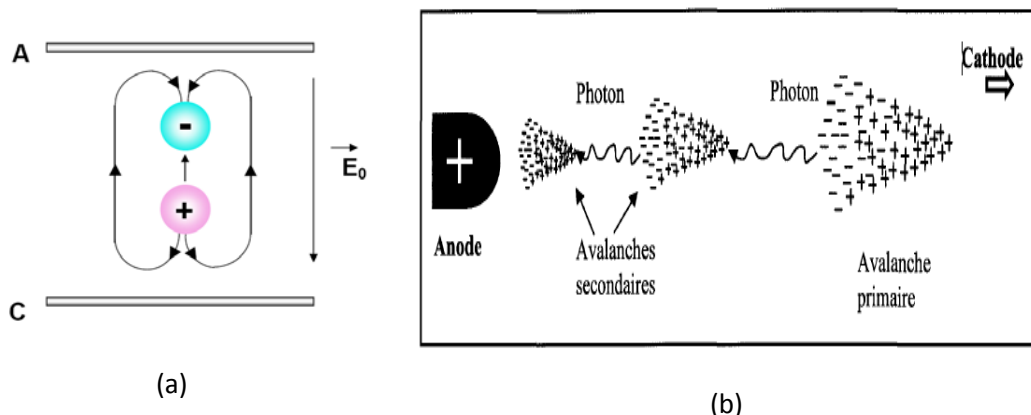


Figure 2.4. Génération d'avalanches secondaires dans un processus de décharge positive (a) [5], (b) [35].

Par conséquent la séparation des électrons et des ions génère une charge d'espace importante produisant un champ électrique «E» de structure dipolaire et s'opposant à la séparation qui s'ajoute vectoriellement au champ extérieur. Le champ résultant est alors plus faible que « $E_0$ » et acquiert une composante radiale entre les deux nuages de charges.

Le taux d'ionisation, croit avec le champ électrique et augmente à la tête de l'avalanche, tandis qu'il diminue à l'intérieur de celle-ci par le développement du champ résultant. C'est l'affaiblissement du champ dans l'avalanche qui favorise la formation d'un plasma quasi-neutre. Les processus d'évolution des streamers sont représentés sur la figure 2.5.

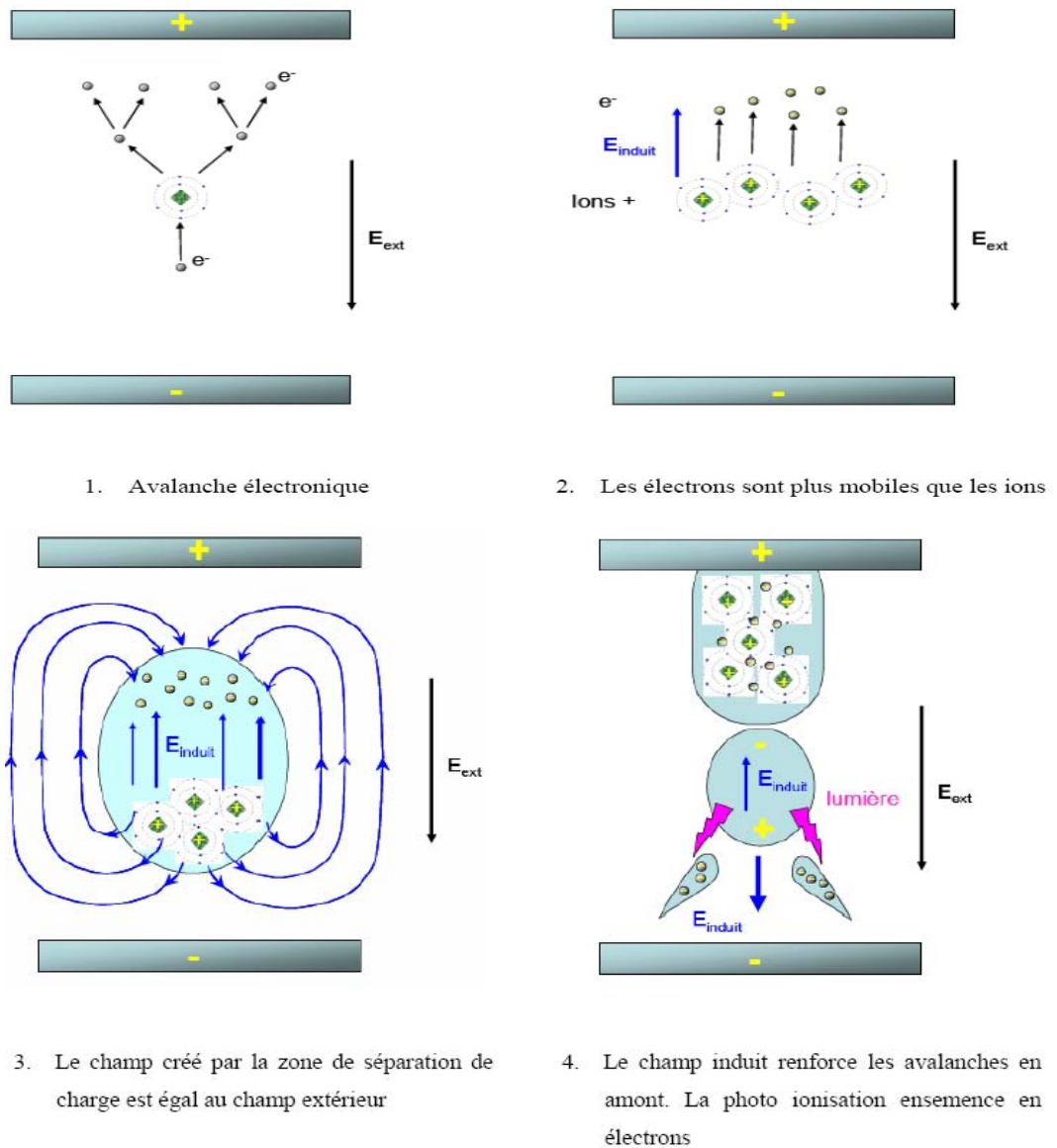


Figure 2.5. Étapes successives de développement d'un streamer [34,48].

Si le streamer ainsi formé se dirige vers la cathode, il est dit cathode-directe ou positif. Dans le cas contraire, on parle d'anode-directe streamer, la situation intermédiaire restant possible.

Ainsi, le processus de transformation de l'avalanche primaire en streamer est fondamental dans le claquage et constitue encore un sujet de recherche actuel. Si l'on considère le cas d'une cathode-directe streamer, lorsque l'avalanche a atteint l'anode, les électrons commencent à plonger dans le métal de l'électrode. Les ions positifs forment une charge d'espace importante qui renforce l'effet du champ résultant. On émet alors l'hypothèse d'un mécanisme prédominant résidant dans la photo-ionisation par des photons énergétiques produits par l'avalanche avec des atomes excités. Les électrons ainsi formés au voisinage de l'avalanche génèrent des avalanches secondaires se dirigeant vers le sillon du nuage sous l'effet du champ résultant décrit précédemment. Ces nouvelles avalanches rejoignent l'avalanche primaire pour former un plasma quasi-neutre de plus grande étendue dans la direction de la cathode. Un canal de plasma neutre reliant les électrodes s'est formé, se comportant électro-statiquement comme un fil métallique, ce qui a pour effet de diminuer le champ électrique entre les électrodes par la polarisation du conducteur. Les avalanches secondaires dues à la photo-ionisation sont attirées par le canal, ce qui limite sa croissance. Ainsi la formation du streamer est possible lorsque le champ «E» dû à la charge d'espace est plus important que le champ extérieur, afin que les avalanches secondaires se dirigent vers l'avalanche primaire.

On en déduit un critère de formation s'écrivant :

$$E' = \frac{E}{R^2} \exp(\alpha d) \approx E_0 \quad (2.17)$$

Où :

E : Charge élémentaire de l'électron.

R : Rayon de la tête de l'avalanche.

#### 2.4.7 Critère de Meek et critère de Reather

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

Critère de Meek : l'avalanche peut se transformer en streamer si le champ de charge d'espace «  $E_C$  » des ions positifs est sensiblement égal au champ appliqué «  $E_g$  » [48].

$$E_C = KE_g \quad (K \approx 1) \quad (2.18)$$

Critère de Reather : l'avalanche peut se transformer en streamer si le nombre de charges de l'avalanche principale atteint  $10^8$  à  $10^{10}$  électrons. Ce critère s'écrit simplement dans le cas du champ non uniforme :

$$\int (\alpha - \eta) dx = \log n_e \quad (2.19)$$

Avec :

$x$  : représente la distance critique ;

$n_e$  : Le nombre critique d'électrons produits par l'avalanche (en général, ce nombre est de l'ordre de  $10^8$ ).

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

Les streamers sont déclenchés par une avalanche électronique dont l'origine est un électron providentiel parti d'une zone intermédiaire où le champ est assez fort. Quand les diverses ramifications du streamer atteignent une zone de champ faible, leur progression s'arrête.

## **2.5 Distribution du champ électrique sur un système pointe-plan et topographie de la décharge couronne**

La distribution du champ électrique dans l'espace inter-électrode dépend de la configuration utilisée. La géométrie des électrodes joue un rôle primordial dans l'analyse de la décharge. Dans la géométrie pointe-plan, la région de champ élevé où la génération de charge se produit, est confinée près de la pointe, ce qui évite le phénomène de claquage. Par contre la partie restante de la distance inter-électrodes est soumise à un champ suffisamment faible [49].

On utilise généralement une configuration d'électrodes pointe-plan pour imposer le sens de propagation au canal de pré-décharge, qui précède le court-circuit [50]. La figure 2.6 représente la configuration pointe-plan

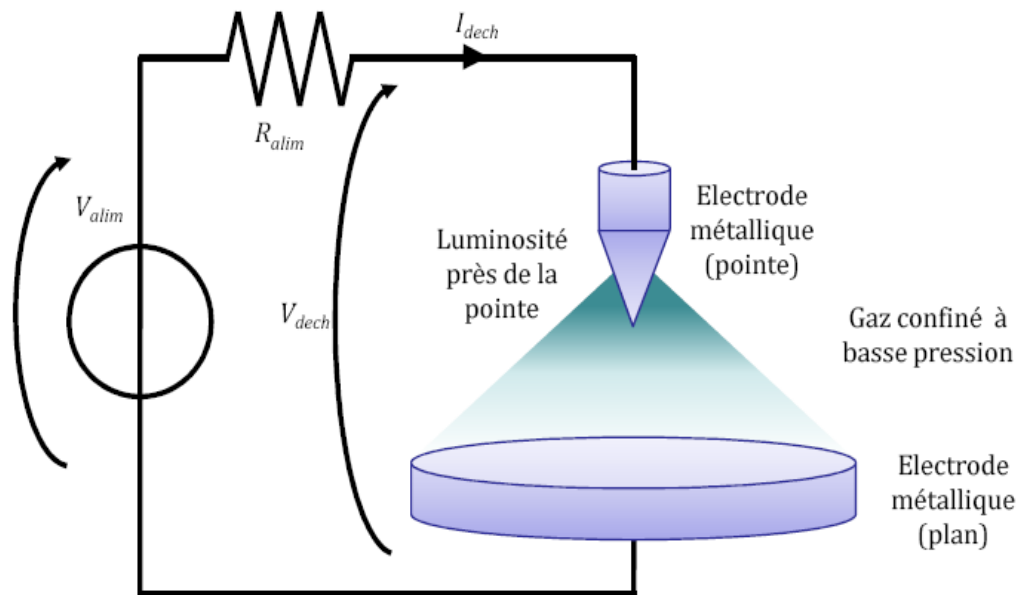


Figure 2.6. Système de configuration pointe-plan [51]

En l'absence de charge d'espace, Hartmann(1977) a établi une expression du champ électrique  $E$  en fonction du potentiel appliqué à la pointe le long de l'axe de symétrie  $x$ , équation (2.20) [41,42,43,52]:

$$E(x) = \frac{V}{\left(x + \frac{r}{2}\right) \ln\left(\frac{2d+r}{r}\right)} \quad (2.20)$$

Avec :

$V$  : Tension appliqué [V].

$r$  : Rayon de courbure de la pointe [m].

$d$  : La distance inter-électrodes [m].

$x$  : La distance à la pointe sur l'axe pointe-plan [m].

Dans une configuration fil-plaque, Lacoste et al ont réduit l'expression du champ électrique  $E(X)$  [4,52].

$$E(X) = E_i \frac{r}{X} \quad (2.21)$$

Avec  $E_i$  le champ électrique à la surface du fil que l'on peut déterminer par la formule empirique de Peek (157 kV/cm).

Pour une configuration pointe-plan Lama et Gallo ont proposé une expression du champ géométrique  $\frac{E}{N}$ , qui est donnée par l'équation (2.22) [53].

$$E_X = \frac{E_{\max} \cdot d \cdot r}{d \cdot r + 2 \cdot X - X^2} \quad (2.22)$$

Où :

$$E_{\max} = \frac{2 \cdot V}{r \cdot \ln\left(\frac{4 \cdot d}{r}\right)} \quad (2.23)$$

La figure 2.7, tirée des travaux de Yousfi et Kanzari, montre la variation du champ électrique réduit  $\frac{E}{N}$ , ( $N$  représente la densité des particules). Cette figure a été obtenue à partir de l'équation (2.22). On constate que le champ décroît brutalement dès que l'on s'éloigne de la pointe.

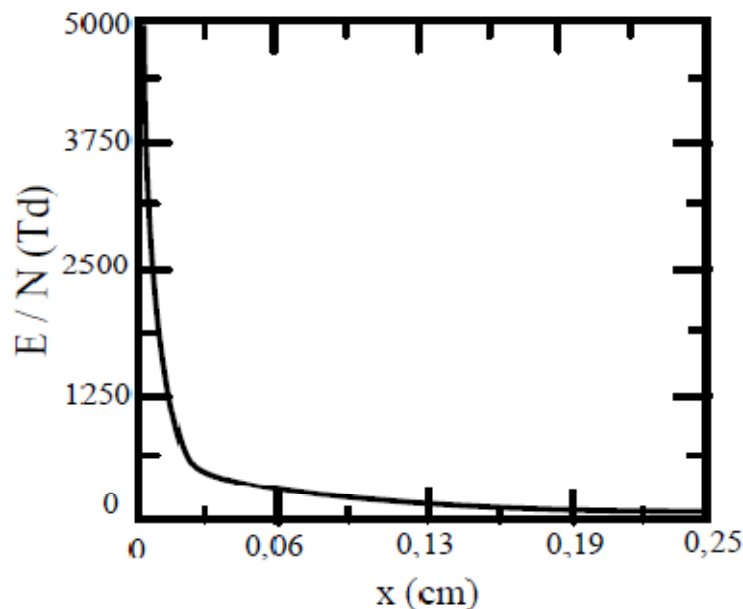


Figure 2.7. Variation du champ électrique réduit en configuration pointe-plan. Distance inter-électrodes : 2,5mm ; rayon de courbure de la pointe : 10  $\mu$ m. Potentiel appliqué à la pointe : 22 kV [53].

Dans le cas d'une géométrie pointe-plan (figure 2.8), le champ intense qui règne à proximité de l'électrode active permet l'ionisation du gaz. Les ions présents dans cette zone peuvent être positifs ou négatifs. Au-delà de cette région se trouve une zone de dérive ionique où le champ électrique est trop faible pour permettre les réactions d'ionisation. Des ions négatifs sont alors formés par attachement électronique. Ils sont ensuite entraînés le long des lignes du champ et réagissent avec les molécules rencontrées. La zone de dérive ionique, électriquement passive, est le siège d'une intense activité physico-chimique (dispersion des espèces par le vent électrique). La consommation d'électrons par attachement électronique est égale à leur libération par impact électronique, les coefficients « $\alpha$ » et « $\eta$ » sont alors égaux. La surface  $\alpha' = \alpha - \eta = 0$  est la limite entre les zones d'ionisation et de dérive ionique [44].

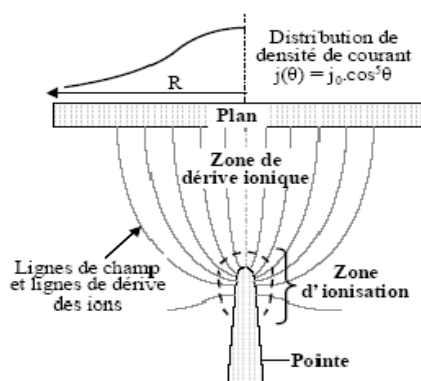


Figure 2.8. Topographie de la décharge couronne en configuration pointe-plan [33,42].

## 2.6 Seuil d'apparition de la décharge couronne

Pour évaluer le seuil de l'effet couronne à la surface de l'anode, Peek, en s'inspirant de la théorie de Townsend proposée en 1920, a suggéré pour la première fois une loi empirique établie en géométrie cylindrique dans l'air ambiant, et en tension alternative. Cette équation est appelée depuis la loi de Peek.

$$E_C = E_0 \delta m_1 m_2 \left( 1 + \frac{0.308}{\sqrt{\delta r}} \right) \quad (2.24)$$

Avec :

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

$r$  : Rayon du conducteur en cm.

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

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

$\delta$  : Densité de l'air.

$$\delta = \frac{P}{P_0} \frac{273+t_0}{273+t} \quad (2.25)$$

Le terme «  $1 + \frac{0.308}{\sqrt{\delta r}}$  » : est appelé correction de Peek, il tient compte du fait que plus le rayon du conducteur est petit plus il est difficile d'ioniser loin de ce conducteur. Cette difficulté d'ioniser est due au fait que le champ électrique décroît très rapidement en s'éloignant du conducteur (figure 2.6) [54]. Depuis de nombreuses formules empiriques et semi-empiriques du champ seuil de l'effet couronne ont été établies par divers auteurs. Dans tous les cas, l'expression du seuil «  $E_s$  » est donnée sous la forme générale suivante [28].

$$E_s = f \left( 1 + \frac{G}{R_0^B} \right) \quad (2.26)$$

Avec :

$E_s$  : Champ seuil d'apparition de la décharge.

$G, B, f$  : Des constantes qui diffèrent d'un auteur à l'autre, elles dépendent de la géométrie de l'électrode et de la densité du gaz.

$R_0$  : Rayon du conducteur de l'électrode active.

Récemment, des études approfondies et des mesures expérimentales très précises ont été réalisées sur le seuil d'apparition de la décharge couronne. Ces auteurs ont proposé un modèle physico-mathématique qui généralise la loi de Peek. Ce modèle repose d'une part sur la notion de la longueur de l'avalanche «  $L_C$  » définie pour la première fois par Nasser et al [55], et de l'autre sur un critère qui a été proposé à l'origine par Meek et amélioré ultérieurement par Hartmann. Ce dernier suppose qu'à la tête de

l'avalanche les électrons ne peuvent se multiplier en raison des champs « $E_S$ » à la surface de l'anode et « $E_P$ », dû à la charge d'espace en tête de l'avalanche, qui s'opposent. La somme algébrique est donc égale au champ critique du minimum d'ionisation « $E_C$ » correspondant à « $\alpha - \eta = 0$ » [28].

$$E_C = E_S + E_P \quad (2.27)$$

L'expression du champ seuil à la surface de l'anode est :

$$E_S = E_C \left( 1 + \frac{L_C}{R_0} \right) \quad (2.28)$$

$E_C$  : calculé en fonction de la pression, de la température et de l'humidité absolue « $H_a$ » est donné par l'expression suivante [54] :

$$E_C(\delta, H_a) = E_C(1,0)\delta(1 + \alpha\sqrt{H_a}) \quad (2.29)$$

## 2.7 Effet de la polarité sur le processus de développement de la décharge couronne

La décharge couronne peut être positive ou négative selon la polarité de l'électrode de faible rayon de courbure [56]. Si elle est positive, on parle d'une décharge couronne positive, sinon, d'une décharge couronne négative. Du fait de la différence de masse entre les électrons (négatifs) et les ions (positifs), la physique de ces deux types de décharge couronne est radicalement différente. La décharge couronne négative se produit beaucoup plus qu'une décharge couronne positive par contre la décharge complète intervient à des tensions plus faibles en polarité positive qu'en polarité négative [28,57]. Pour la décharge couronne négative, l'avalanche électronique prend naissance sur la pointe et se dirige vers l'électrode plane. Par contre en polarité positive [32], les électrons libres naturels et ceux créés lors des avalanches électroniques se déplacent vers l'anode dans la zone où le champ électrique est le plus intense. De plus la décharge couronne apparaît à des tensions plus faibles en pointe négative qu'en pointe positive. Mais la décharge complète intervient à des tensions plus faibles en polarité négative [28]. Du point de vue de l'isolation, les décharges couronne positives sont plus néfastes que celles des couronnes négatives [35]. L'intensité lumineuse et la longueur des streamers sont beaucoup plus faibles qu'en polarité positive [31], de plus le champ seuil de l'effet

couronne est légèrement plus petit en tension positive qu'en tension négative et les pertes sont plus élevées en polarité négative qu'en polarité positive [58].

La décharge positive présente un grand intérêt dans la mesure où elle constitue la contrainte la plus sévère pour un intervalle du point de vue isolation. Les décharges négatives sont en effet de structure très complexe. Il faut pratiquement une tension deux à trois fois plus forte que dans le cas de la décharge positive pour obtenir l'amorçage [12]. La figure 2.9 illustre les deux processus de décharges.

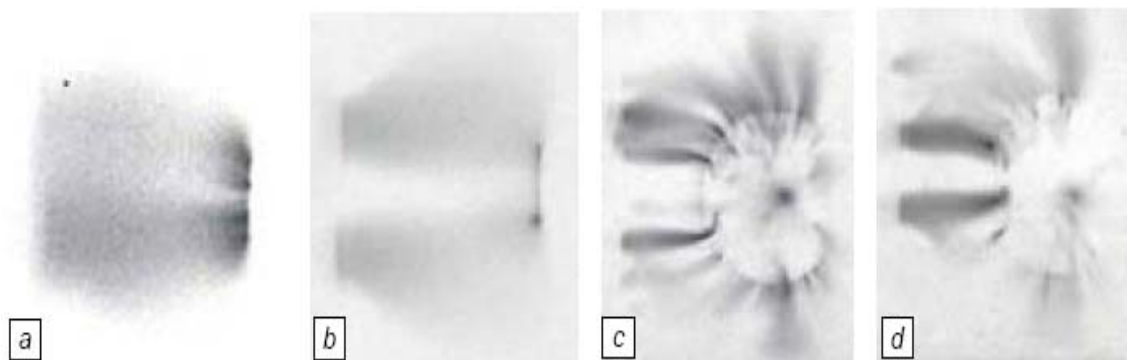


Figure 2.9. Photographie de la décharge couronne

(a et c) : polarité négative (b et d) : polarité positive [59].

### 2.7.1 Polarité négative

Dans le cas d'une pointe alimentée par une tension négative (pointe cathodique), l'apparition d'un électron germe à proximité de la pointe peut provoquer une avalanche électronique qui se développe en champ divergent. La cathode accélère alors les ions positifs qui la percutent et lui arrachent des électrons secondaires. Ce phénomène propre à l'utilisation d'une pointe cathodique, entraîne un abaissement de la tension de claquage de la décharge par rapport à la configuration pointe positive-plan. La charge d'espace positive domine dans la zone d'ionisation tandis que la zone de dérive ionique possède une charge d'espace négative, faible ou forte suivant l'importance des processus d'attachement électronique. La figure 2.10 montre le mécanisme du développement d'une décharge couronne négative en géométrie pointe-plan, temporel et instantané.

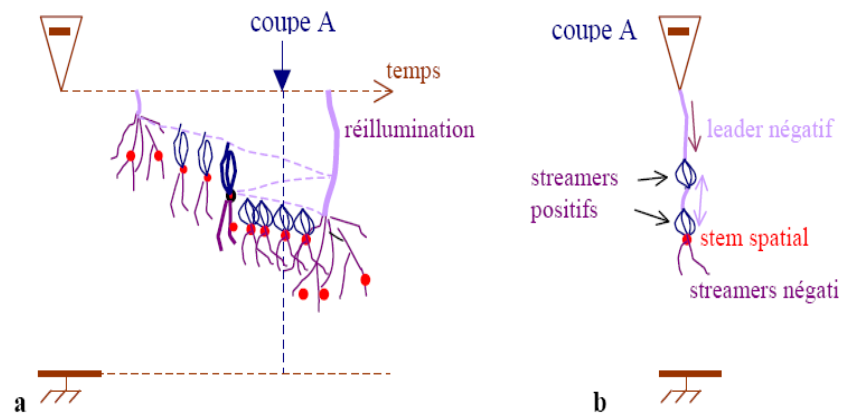


Figure 2.10. Développement de la décharge électrique négative  
a) temporel, b) instantané [50]

La figure 2.11 représente une prise de vue des différents régimes de décharge, pointe polarisée négativement. De gauche à droite : régime couronne, luminescent et d'arc.

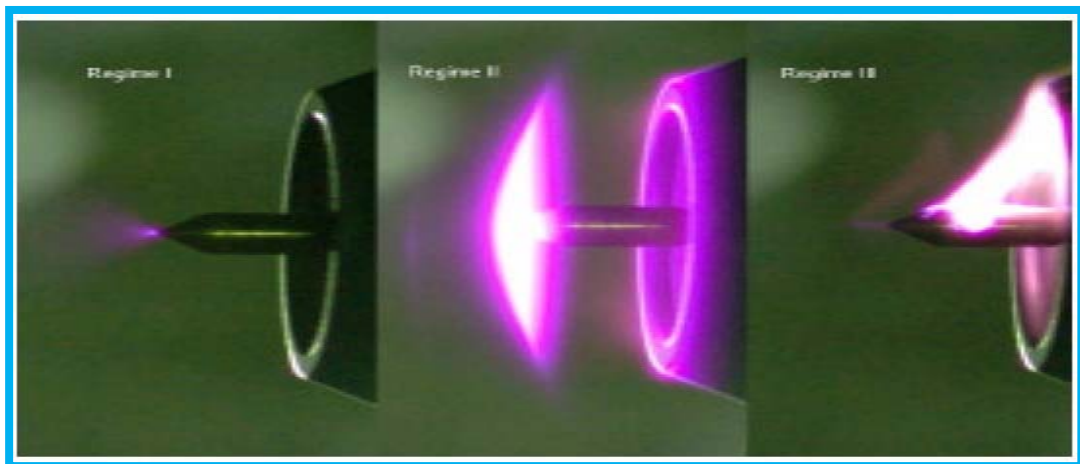


Figure 2.11. Photographie du développement d'une décharge couronne négative en géométrie pointe-plan en trois régimes [60].

Les études sur les impulsions de Trichel [61], pour les décharges couronne négatives pour différents gaz font l'objet de nombreuses études. Loeb confirme que les

impulsions de Trichel sont formées uniquement dans les décharges des gaz électronégatifs.

## **2.8 Les facteurs influençant la décharge couronne**

Plusieurs facteurs peuvent influencer le seuil et les caractéristiques de la décharge couronne [11], on distingue trois facteurs essentiels :

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

### **2.8.1 Facteurs géométriques**

#### **1) Rayon de la courbure**

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

#### **2) Distance inter-électrodes**

L'influence de la distance inter-électrodes sur les paramètres de la décharge est montrée sur la figure 2.12.

Il apparait clairement que le courant est plus important et croit plus rapidement avec la tension appliquée pour de faibles distances inter-électrodes. De plus, les seuils de décharge couronne apparaissent pour de faibles valeurs de tension dans le cas des distances inter-électrodes petites [62].

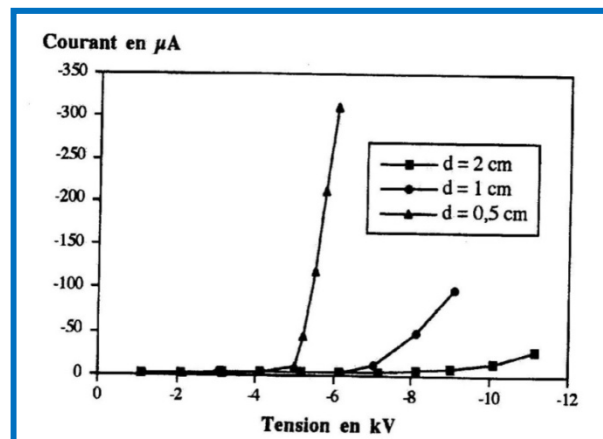


Figure 2.12. Influence de la distance inter-électrodes sur le courant de la décharge couronne [62].

### 2.8.2 La nature des électrodes

La caractéristique courant-tension est représentée selon la nature des électrodes (cuivre, aluminium, et acier) sur la figure 2.13.

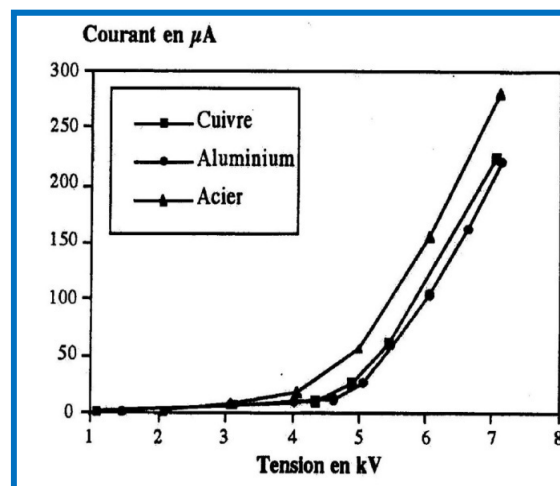


Figure 2.13. Caractéristique courant-tension selon la nature des électrodes ( $d = 0.5\text{cm}$ ,  $\varnothing = 125\mu\text{m}$ , et  $H_r = 5\%$ ) [62]

La nature des électrodes et la tension appliquée influent sur la mobilité ionique comme le montre le tableau 2.1 [62].

Tableau 2.1. Influence de la nature des électrodes sur la mobilité ionique en tension positive et négative ( $H_R=5\%$ ,  $\varnothing_{fil} = 125\mu\text{m}$  )

<b>Tension positive</b>	<b><math>\mu</math> : en <math>[\text{m}^2.\text{V}^{-1}.\text{s}^{-1}]</math> à <math>d=0.5\text{cm}</math></b>
Electrode en cuivre	$8.10^{-5}$
Electrode en aluminium	$7,4.10^{-5}$
Electrode en acier	$12.10^{-5}$
<b>Tension négative</b>	<b><math>\mu</math> : en <math>[\text{m}^2.\text{V}^{-1}.\text{s}^{-1}]</math> à <math>d=0.5\text{cm}</math></b>
Electrode en cuivre	$4.10^{-4}$
Electrode en aluminium	$2,9.10^{-4}$
Electrode en acier	$4,5.10^{-4}$

Nous observerons une grande mobilité ionique avec des électrodes en acier qu'avec des électrodes en aluminium quelle que soit la polarité de la tension appliquée.

### 2.8.3 Les facteurs physico-chimiques

#### 1) La température

Avec l'augmentation de la température, à la pression normale, la rigidité diélectrique de l'air diminue, ce qui favorise la décharge couronne. Cela est dû au fait que dans ce cas le libre parcours moyen augmente [28]. Par contre si l'augmentation de la température entraîne une augmentation de la pression, ceci influe donc sur le produit «pd» [41].

#### 2) L'humidité

L'influence de l'humidité sur la rigidité diélectrique de l'air est très importante surtout dans le cas où le champ électrique est non uniforme. Ce phénomène serait lié d'une part à l'accroissement de l'attachement des électrons libres, du fait de la présence de vapeur d'eau dans l'air (grande électronégativité) et d'autre part à la plus grande absorption des photons en tête des streamers, dans la région où se produisent les

avalanches secondaires par photo-ionisation [63]. Le seuil d'apparition de la décharge couronne survient à des tensions toujours plus basses pour 90% que pour 5% d'humidité relative [62]. Cette différence pourrait s'expliquer par l'augmentation de la conductivité de l'air lorsque l'humidité relative de la cellule de décharge augmente.

### 3) La pression

L'effet de la pression est proportionnel à la tension d'amorçage et inversement proportionnel au courant. La figure 2.14 montre l'effet de la pression sur la décharge.

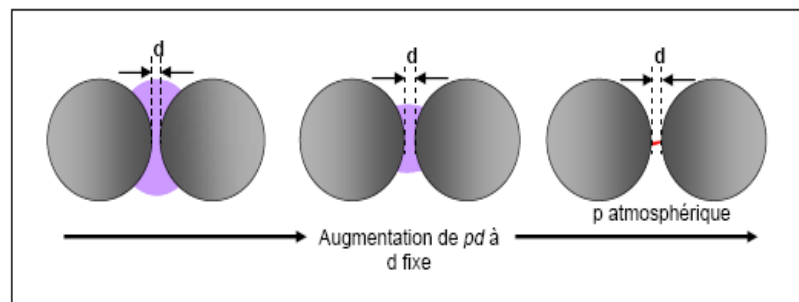


Figure 2.14. Schéma d'évolution de la décharge observée en fonction de la pression [41]

### 4) La densité de l'air

Les paramètres climatiques et particulièrement la densité de l'air influencent la tension d'amorçage des intervalles d'air.

La tension «  $U_d$  » est proportionnelle à la densité de l'air :

$$U_{dn} = \frac{U_d K_h}{\delta} \quad (2.30)$$

Avec :

$U_{dn}$  : Tension de claquage dans les conditions normales.

$\frac{K_h}{\delta}$  : Correction à apporter pour avoir les conditions normales.

### 2.8.4 Facteurs électriques

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

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

## 2.9 Phénomènes induits par la décharge couronne

De nombreuses réactions autres que des réactions d'ionisation ont lieu au sein du gaz : dissociation, recombinaison, excitation moléculaire, excitation électronique...etc. Les différentes espèces ainsi produites vont se distinguer par leur charge, leur masse, leur vitesse et leur énergie, mais aussi par leur nature et leur état d'énergie interne.

### 2.9.1 Effets électromagnétiques

Ces effets se traduisent par les perturbations radiophoniques et les pertes d'énergie dans les lignes de transport. L'effet perturbateur du phénomène couronne se manifeste par la formation d'un champ électromagnétique à large spectre autour des conducteurs. Celui-ci est lié aux courants à haute fréquence circulant dans les conducteurs. Les perturbations dues aux lignes aériennes à haute tension au dessus de «1kV» peuvent être produites sur une très large bande de fréquence par :

- ✓ Les décharges par effet couronne dans l'air à la surface des conducteurs.
- ✓ Les décharges et claquages dans les régions à fortes contraintes des isolateurs.
- ✓ Les claquages au niveau de contacts défectueux.

Les parasites les plus gênants sont ceux qui produisent les champs intenses captés par les antennes des postes récepteurs au même temps que le champ utile.

### 2.9.2 Effet chimique

Nous assistons, suivant la polarité de la décharge, à la naissance de certaines espèces chimiques dérivées du gaz ambiant, par exemple dans le cas de l'air, à la naissance d'autres d'oxydes d'azote ( $\text{NO}$ ,  $\text{NO}_2$ ), de radicaux ( $\text{HO}$ ) et ( $\text{H}_2\text{O}$ ) ainsi que l'ozone ( $\text{O}_3$ ) qui est un gaz instable, pouvant dégrader beaucoup de matières.

### 2.10 Conclusion

Ce chapitre a fait l'objet d'une étude bibliographique sur les décharges électriques dans le cas général et nous nous sommes intéressés particulièrement aux décharges couronne générées entre deux électrodes par l'application d'un champ électrique. Nous avons d'abord évoqué les deux modèles de décharge Townsend et streamer. Comme les décharges couronne que nous étudions sont des décharges filamenteuses, nous avons aussi décrit les différents mécanismes à l'origine de la formation et de la propagation de ce type de décharge. L'étude de la décharge dans les grands intervalles d'air présente un intérêt tant du point de vue physique (physique atmosphérique, physique des plasmas) que du point de vue industriel (isolement et protections des réseaux haute tension).

### 3.1 Introduction

L'inconvénient de la décharge couronne est la transition à l'arc électrique. Pour éviter ce type de problème, plusieurs solutions ont été avancées pour limiter le courant de décharge. L'une de ces solutions est de disposer une barrière diélectrique entre les électrodes, car celle-ci homogénéise la répartition des charges à la surface des électrodes. Ainsi, la transition de la décharge lumineuse ou filamentaire vers une décharge de type arc est stoppée par la barrière diélectrique. Ceci empêche tout échauffement local important [64]. Les décharges à barrière diélectriques (DBD) sont connues depuis le milieu de XIX<sup>ème</sup> siècle [65]. La première DBD à pression atmosphérique dans l'air a été obtenue par Von Engle et al [4]. Les premières expériences sur ce type de décharge ont été proposées par Siemens 1857 [2,5,9,28,48,51,66,67,68]. Ces décharges sont des plasmas froids hors équilibre dans lesquels les électrons créés possèdent une énergie ou une température supérieures à celles des ions (énergie moyenne de quelques eV) et des particules neutres de gaz (300K) qui restent majoritaires [2,65,69].

Les décharges à barrière diélectrique touchent de nombreux domaines comme l'électronique, le textile, l'emballage et l'automobile. Les principales caractéristiques de cette décharge sont : pression de travail élevée (autour de la pression atmosphérique), une tension de l'ordre du kilovolt, une fréquence d'excitation de l'ordre du kilohertz et au moins une électrode recouverte par un diélectrique. La distance inter-électrodes est de quelques millimètres [63].

### 3.2 Différentes configurations de la décharge à barrière diélectrique

Suivants le type d'application envisagée, différentes possibilités d'arrangement de la décharge à barrière diélectrique (DBD) peuvent être adaptées. Les différentes configurations existantes de la (DBD), ayant toutes en commun l'insertion d'une barrière diélectrique couvrant au moins l'une des deux électrodes, sont représentées sur la figure 3.1.

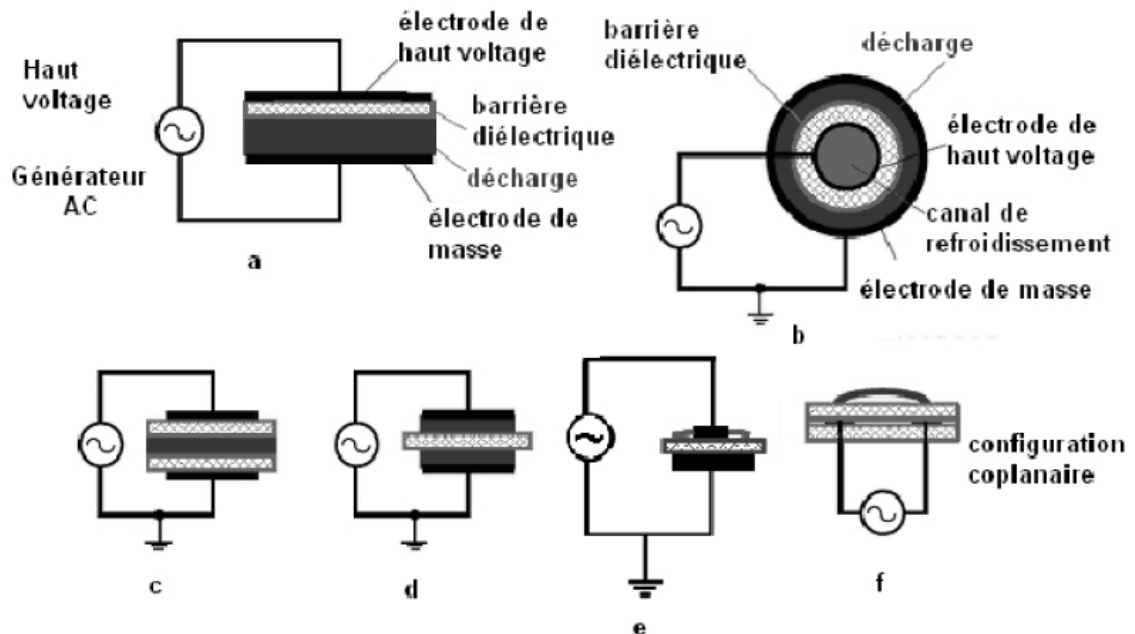


Figure 3.1. Différents types de configuration de barrière diélectrique [2,48].

### 3.3 Physico-chimie du matériau de la barrière diélectrique

Les électrons d'un atome ou d'une molécule qui forment un tel matériau se trouvent dans un état énergétique spécifique suivant les lois de la mécanique quantique. Il en découle des niveaux d'énergie autorisés ou interdits. Pour un matériau, ces niveaux sont regroupés en bande d'énergie. A l'état fondamental, chaque électron occupe son niveau d'énergie le plus faible possible ; les électrons remplissent donc les couches de plus faible énergie. La dernière bande d'énergie pleine est appelée bande de valence (BV), la suivante est appelée la bande de conduction (BC) [44]. Ces bandes sont plus ou moins proches selon les matériaux. La figure 3.2 représente la distribution des électrons dans les bandes permises en fonction de l'énergie.

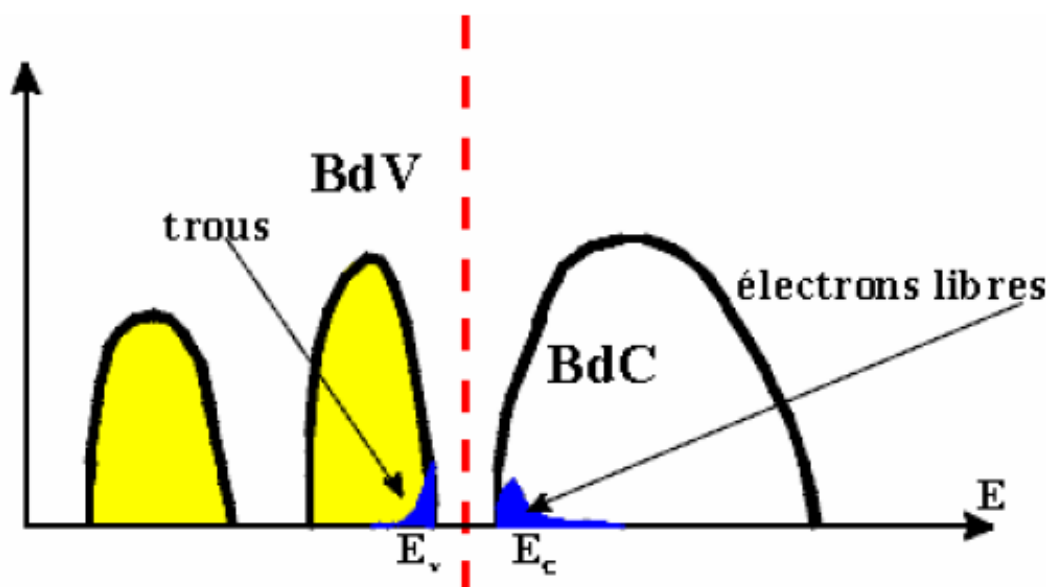


Figure 3.2. Distribution des électrons dans les bandes permises en fonction de l'énergie. Trait pointillé : niveau de Fermi. BdV : bande de valence, occupée par les électrons des couches externes et d'énergie maximale  $E_v$ .

BdC : bande de conduction et d'énergie minimale  $E_c$

La conduction électrique d'un matériau dépend des électrons qui se déplacent dans la bande de conduction. Lorsque l'on apporte de l'énergie, les électrons excités migrent vers un niveau d'énergie supérieur laissant à leur place un trou. Les matériaux isolants et semi-conducteurs ont leur bande de conduction vide et leur bande de valence pleine à 0K. Pour les isolants ( $(E_c - E_v) > 5 \text{ eV}$ ) ; si leur pureté est parfaite, les électrons ne peuvent aller dans la bande de conduction et cela quelle que soit la température [44].

### 3.4 Principe de la décharge à barrière diélectrique

Le principe de fonctionnement est illustré sur la figure 3.3. Avec l'application de la tension « $V_a$ » sur les électrodes, le claquage du gaz conduit à la formation d'un canal conducteur, le passage du courant induit une accumulation de charges sur la surface de la barrière diélectrique et donc une tension « $V_{ds}$ » à ses bornes. Dans ce cas le diélectrique

est considéré comme isolant d'un condensateur dont les armatures sont d'un côté la décharge et de l'autre côté l'électrode. Si l'augmentation, au fur et à mesure du développement de la décharge, est plus rapide que l'augmentation de la tension d'alimentation, elle cause une chute de la tension appliquée sur le gaz, « $V_g$ », ce qui conduit à l'extinction de la décharge. Ainsi, quelle que soit la taille et la distribution spatiale des décharges, elles sont bloquées bien avant d'atteindre un degré d'ionisation suffisant pour échauffer la cathode et conduire à l'arc.

Le rôle principale du diélectrique est de limiter la charge déposée sur les électrodes afin que la décharge ne devienne un arc comme cela peut arriver entre deux électrodes métalliques à pression atmosphérique. En contre partie, la présence d'un diélectrique impose l'utilisation d'une excitation électrique alternative afin de décharger le condensateur « $C_{ds}$ ».

Par ailleurs, l'utilisation de la barrière diélectrique a pour conséquence de tendre vers une répartition plus uniforme des micro-décharges sur toute la surface des diélectriques.

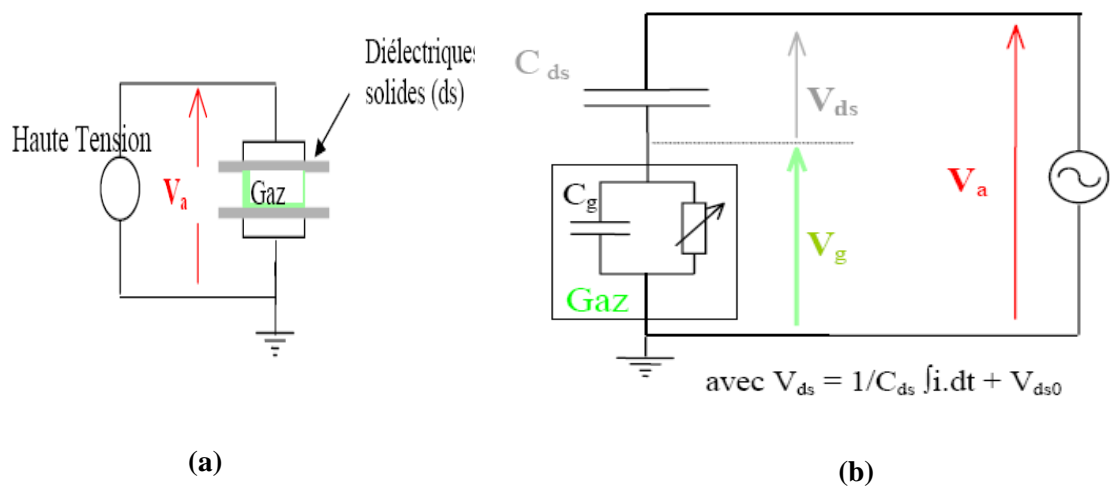


Figure 3.3. a) Exemple de configuration de DBD avec deux diélectriques solides  
b) son schéma électrique équivalent [4.67.69.70].

### 3.5 Paramètres de régulation de la décharge à barrière diélectrique

#### 3.5.1 Influence de la tension

La tension régule le nombre de micro-décharges par  $\text{cm}^3$  pendant une demi-alternance. Lorsque la tension augmente, le nombre de micro-décharges par demi-période augmente. Ceci est confirmé par les travaux de De Geyter et al [68]. Les figures 3.4 et 3.5 illustrent cette influence.

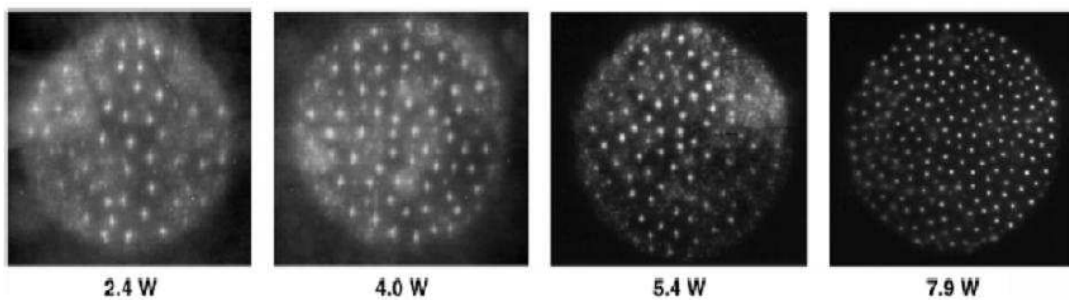


Figure 3.4. Figures de Lichtenberg d'une DBD à différentes puissances (diélectrique : verre 2mm ; distance inter-électrodes : 3mm, 5kPa, 50kHz, air)

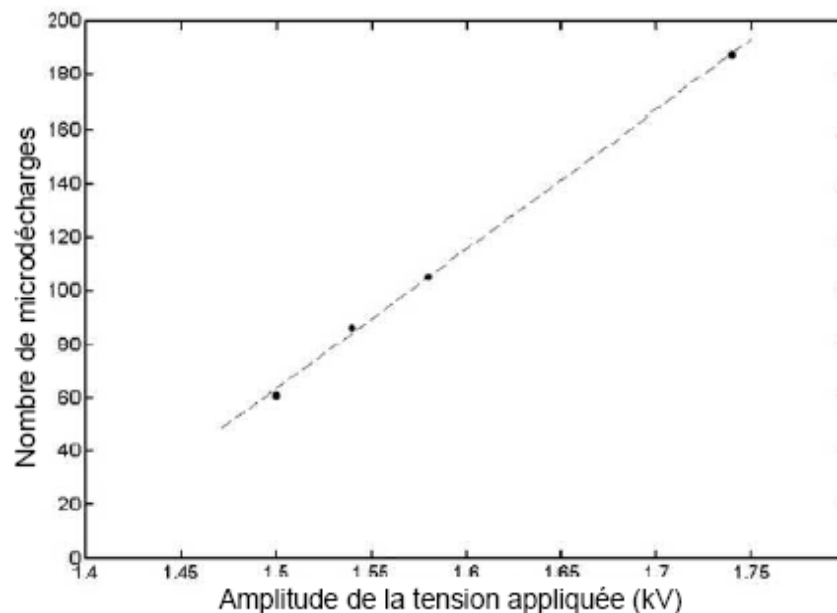


Figure 3.5. Evolution du nombre de micro-décharges en fonction de la tension appliquée (diélectrique : verre 2mm ; distance inter-électrodes : 3mm, 5kPa, 50kHz, air) [68]

### 3.5.2 Influence de la fréquence

Le courant de décharge et le nombre de décharges par unité de temps augmentent avec l'augmentation de la fréquence d'alimentation. Plus la fréquence est élevée et plus le temps entre la dernière décharge d'une demi-alternance et la première de la demi-alternance suivante est court. Les charges ont moins de temps de s'écouler et renforcent le champ [68].

### 3.5.3 L'influence de la distance inter-électrodes

L'influence de la distance inter-électrodes sur la décharge est illustrée sur la figure 3.6.

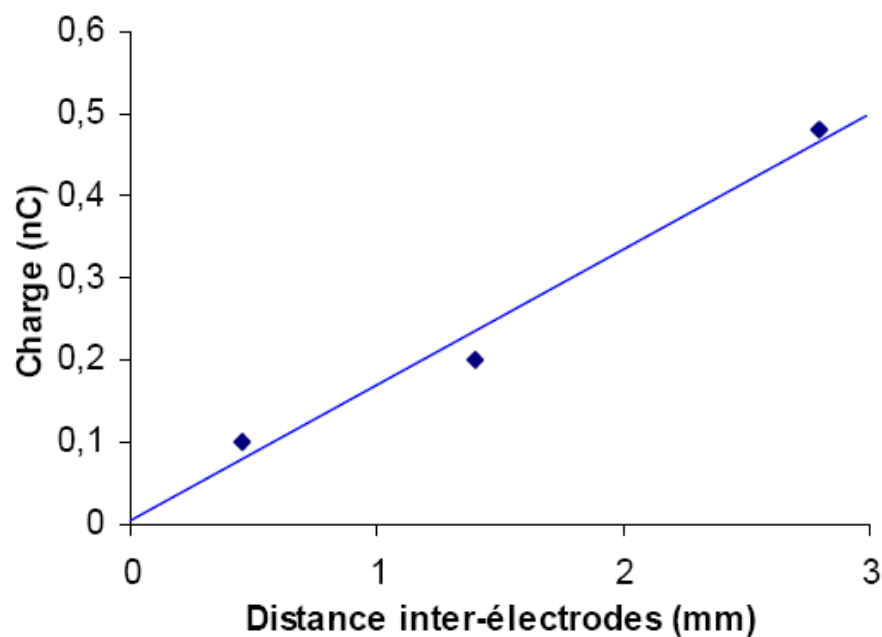


Figure 3.6. Charge par micro-décharge selon la distance inter-électrodes (verre,  $e=2$  mm) [68].

La figure 3.6 montre que la distance inter-électrodes régule la quantité de charge par impulsion, qui définit l'énergie d'un filament et celle-ci augmente avec la distance inter-électrodes [68].

### **3.6 Mesure de la résistance de la barrière isolante**

La notion de résistance électrique est la propriété qu'un corps s'oppose au passage du courant électrique (son unité est l'ohm). La résistivité est la résistance entre les faces d'un cube de 1m de côté. Cette dernière également appelée résistivité volumique (son unité est le  $(\Omega/\text{m}^{-1})$ ). On détermine la résistivité superficielle par une mesure de résistance entre deux électrodes parallèles à la surface d'un échantillon, quand on a la distance inter-électrodes qui est égale à la longueur de l'électrode (configuration d'un carré), d'où la résistivité est indépendante des dimensions et est égale à la résistance mesurée. Cette résistivité superficielle est exprimée plus fréquemment en  $\Omega$  par carré. Les mesures des résistances sont faites selon les normes suivantes : (IEC 613406-5-1, EN 1149-1, EN 1149-2) [71].

#### **3.6.1 Mesure de la résistivité de surface**

Selon la norme (EN 1149-1), la méthode de détermination de la résistivité de surface est illustrée sur la figure (3.7). Cette méthode est basée sur l'utilisation d'une électrode concentrique [71].

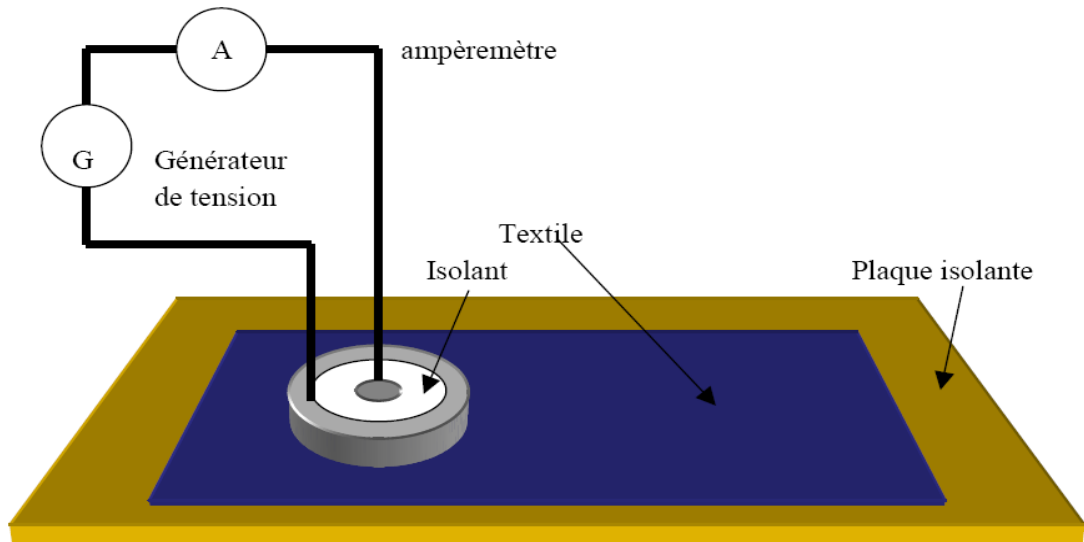


Figure 3.7. Principe de mesure de la résistivité superficielle selon la norme EN 1149-1 [71].

### 3.6.1.a Mesure de la résistivité de surface entre deux électrodes parallèles

Pour déterminer la résistivité de surface, il suffit de mesurer la résistance entre deux électrodes parallèles à la surface de l'échantillon (figure 3.8). Dans ce cas la résistivité  $\rho_S$  se déduit de la résistance de surface  $R_S$  mesurée avec l'ohmmètre par l'utilisation de la relation (3.1) [71].

$$\rho_S = R_S \frac{l}{L} \quad (3.1)$$

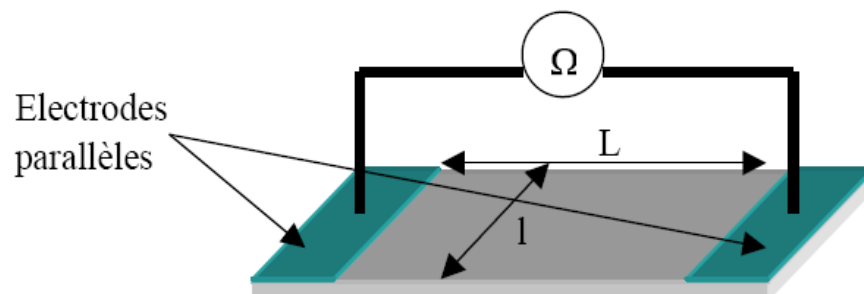


Figure 3.8. Mesure de la résistivité de surface entre deux électrodes parallèles [71].

Lorsqu'on a  $\frac{l}{L}$  égal à l'unité, dans ce cas là on trouve la configuration d'un carré, d'où l'égalité suivante :  $\rho_S = R_S$ . La résistivité est alors exprimée en  $\Omega$  par carré.

### 3.6.1.b Mesure de la résistivité de surface entre deux électrodes concentriques

Pour déterminer la résistance de surface et la résistivité de surface avec l'utilisation des électrodes concentriques, il faut connaître d'abord la densité de courant dans l'espace inter-électrodes. Pour le cas d'anneaux concentriques la densité de courant  $J$  est donnée par l'équation (3.2) [71].

$$J = \frac{I_S}{2\pi r e_0} \quad (3.2)$$

Avec :

$I_S$  : correspond au courant électrique de surface (on suppose en fait que tout le courant circule dans une fine couche d'épaisseur  $e_0$  à la surface de l'échantillon) ;

$r$  : Le rayon variant de  $h_1$  qui est le rayon de l'électrode centrale à  $h_2$  représentant le rayon interne de l'électrode extérieure. La figure (3.9) représente la configuration d'une électrode concentrique.

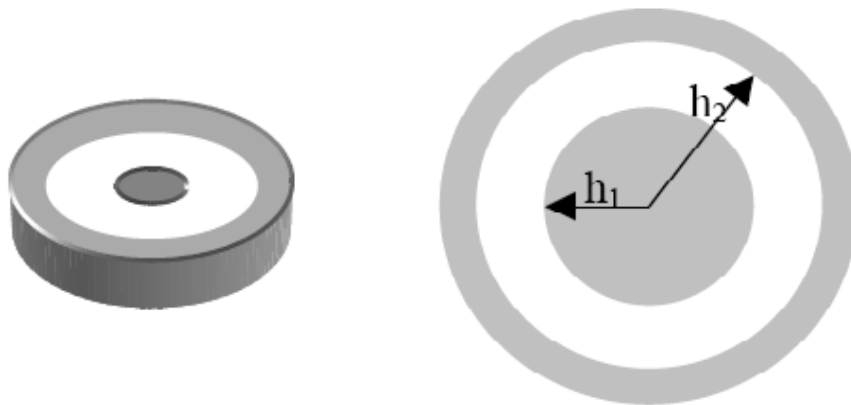


Figure 3.9. Configuration d'une électrode concentrique.

Nous pouvons déterminer l'intensité du champ électrique  $E$ , avec l'application de la loi d'ohm entre les deux électrodes, par conséquent on a l'équation (3.3).

$$E = \rho J = \frac{\rho I_s}{2 \pi r e_0} \quad (3.3)$$

Où  $\rho$  : est la résistivité volumique de la fine couche superficielle.

On détermine la tension  $U$  entre les deux électrodes par l'intégration du champ électrique  $E$  entre  $h_1$  et  $h_2$ .

$$U = \int_{h_1}^{h_2} E dr = \frac{\rho I_s}{2 \pi e_0} \int_{h_1}^{h_2} \frac{1}{r} dr = \frac{\rho I_s}{2 \pi r e_0} \ln \left( \frac{h_2}{h_1} \right) \quad (3.4)$$

On en déduit la résistance de surface  $R_s$  :

$$R_s = \frac{U}{I_s} = \frac{\rho}{2 \pi e_0} \ln \left( \frac{h_2}{h_1} \right) \quad (3.5)$$

La résistivité surfacique est alors donnée par la relation (3.6) :

$$\rho_s = \frac{\rho}{e_0} = \frac{2 \pi}{\ln \left( \frac{h_2}{h_1} \right)} R_s \quad (3.6)$$

### 3.6.2 Mesure de la résistivité transversale de la barrière

Pour mesurer la résistance transversale, en utilisant la même électrode concentrique et en plaçant l'échantillon entre l'électrode et un plan conducteur, on réalise la mesure de la résistance transversale comme est indiquée par la norme (NE1149-2) et montrée sur la figure 3.10.

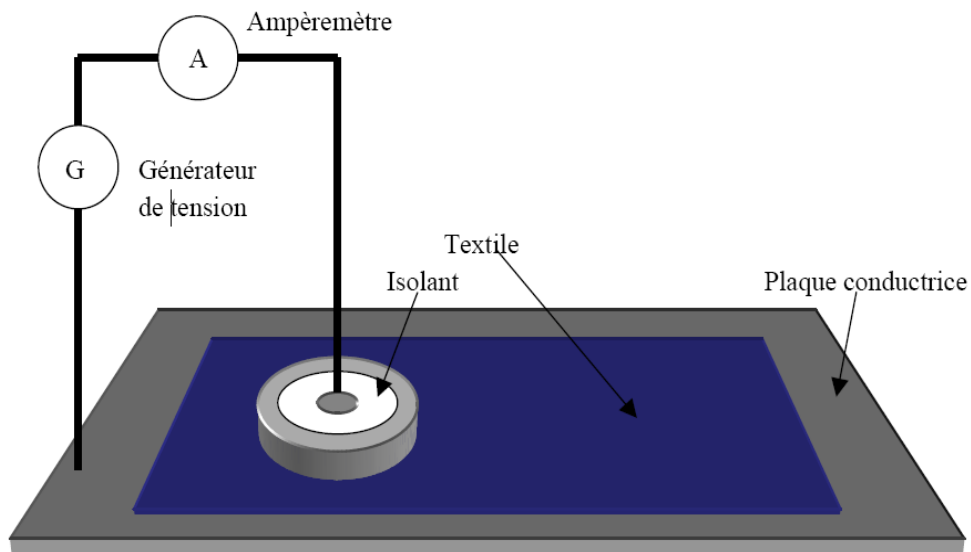


Figure 3.10. Principe de mesure de la résistance transversale selon la norme EN 1149-2 [71].

La détermination de la résistance transversale par cette méthode se fait directement par le rapport de la tension  $U$  appliquée entre le plan conducteur et l'électrode et le courant  $I_T$  qui traverse l'échantillon et mesure par l'électrode.

$$R_T = \frac{U}{I_T} \quad (3.7)$$

### 3.7 Les types de la décharge à barrière diélectrique

Deux types de décharge à barrière diélectrique peuvent être différenciés : décharge silencieuse et décharge lumineuse homogène.

#### 3.7.1 Décharge silencieuse

C'est la première décharge qui a été observée. Dans ce type de décharge le diélectrique joue le rôle d'un condensateur avec le plasma, ce qui conduit à un effet stabilisateur avec un grand nombre de micro-décharges de petite impulsion dans tout l'espace inter-électrodes. Ces micro-décharges sont caractérisées par un diamètre de quelques centaines de micromètres et un temps de vie de 100 ns. Ces caractéristiques dépendent de la nature et de la pression du gaz (Eliasson et Kogelschatz). La figure 3.11 représente un exemple de la décharge à barrière diélectrique où les deux électrodes sont recouvertes d'un isolant. Les électrodes forment un nuage qui est suivi d'un filament de charges positives issues des avalanches électroniques (figure 3.11.a), d'autre part les charges négatives traversent l'espace inter-électrodes et sont bloquées sur la surface isolante. L'accumulation de ces charges entraîne la formation d'un champ électrique local inverse stoppant les avalanches électroniques et le flux de courant après quelques nanosecondes [4].

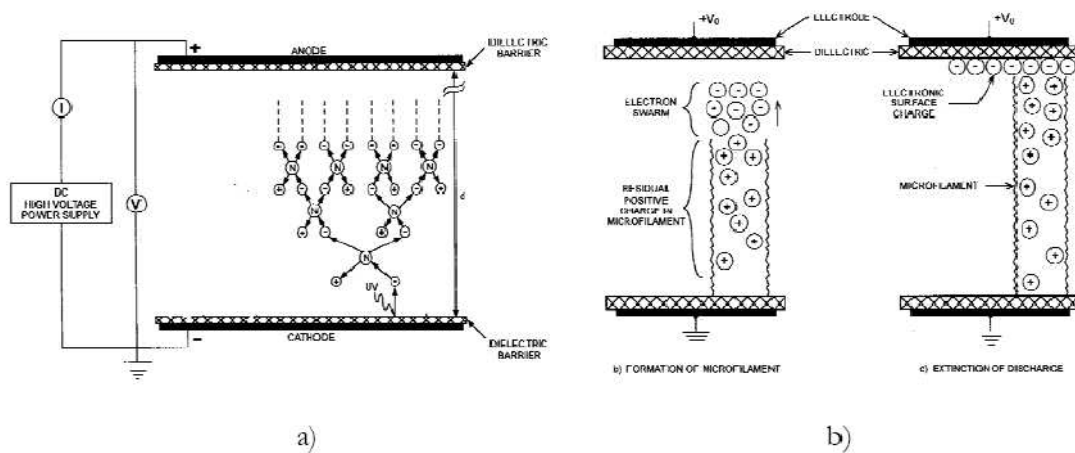


Figure 3.11. Etapes de la formation d'une micro-décharge dans une DBD [4].

### 3.7.2 Décharge lumineuse homogène

En appliquant des champs électriques de l'ordre du kV avec des fréquences de quelques kHz et des distances inter-électrodes de 0.5 à 3 cm, on obtient des décharges lumineuses homogènes sans filament dans l'air à la pression atmosphérique. Dans ce cas la décharge silencieuse est remplacée par un régime lumineux homogène (d'un point de vue macroscopique). Okazaki et al ont obtenu des décharges lumineuses avec une fréquence de l'ordre de 50 Hz par l'utilisation d'une grille au lieu d'une électrode plane. Dans tous les cas, la décharge est contrôlée par une barrière diélectrique, car cette dernière rend la décharge de courte durée. La répartition de charges telles que les micro-décharges sont rares (Massines et al). Par contre, pour les décharges silencieuses, (Massines et al) ont montré que ce type de décharge est caractérisé par un courant de décharge périodique, et que celui-ci a la même structure que les décharges observées à basse pression [4].

### 3.8 Application des décharges à barrière diélectrique

Les décharges couronne sont utilisées dans de nombreux domaines où elles remplacent des techniques souvent plus polluantes (utilisation de solvants). Les décharges couronne offrent de nombreuses possibilités pour le traitement des gaz et plus

particulièrement les gaz polluants [72]. Les décharges couronne sont aussi employées dans les processus électrostatiques [11]. Cependant elles restent pour certaines applications encore trop coûteuses d'un point de vue énergétique comparées à d'autres méthodes mieux maîtrisées. Mais les recherches effectuées sur le sujet tendent à accroître leur intégration dans le milieu industriel et ouvrent de nouvelles possibilités [42].

### ➤ Production d'ozone

C'est la solution qui permet de traiter les effluents gazeux est d'utiliser l'ozone : au lieu de créer un milieu fortement réactif, l'ozone possédant un fort pouvoir oxydant, est introduit dans le gaz à traiter. L'ozone est également utilisé dans le traitement de l'eau mais aussi dans de nombreux domaines comme l'industrie agroalimentaire en tant que désinfectant ou conservateur. La figure 3.12 donne le schéma de principe d'un ozoniseur alimenté en oxygène. Dans cet exemple la décharge est constituée de deux barrières diélectriques coaxiales. La décharge s'effectue dans le volume de gaz par lequel le gaz circule, par conséquent le courant électrique va convertir une partie du gaz entrant en ozone.

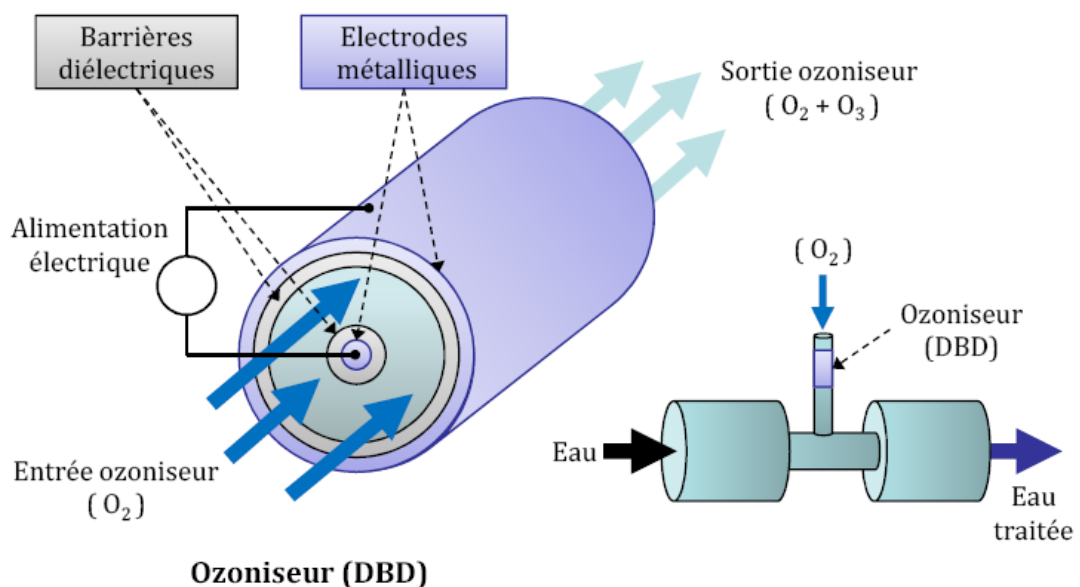
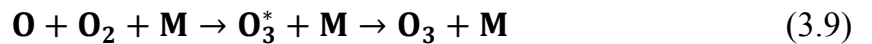


Figure 3.12. Schéma de principe d'un ozoniseur utilisé dans le traitement de l'eau [51].

La production d'ozone s'effectue en deux étapes. En première étape, nous avons la réaction (3.8) qui se produit par une collision électronique en produisant deux atomes d'oxygène.



En deuxième étape, l'atome d'oxygène, s'associe dans un état excité, avec une molécule  $O_2$ , à l'aide d'une troisième espèce M [51].



### ➤ Traitement de surfaces

Le traitement de surfaces est le deuxième domaine d'utilisation des plasmas froids produits par décharge couronne. Le premier secteur à les avoir adoptés couramment est la micro-électronique pour la fabrication des circuits intégrés et des circuits imprimés.

En raison de leurs caractéristiques et de leurs qualités intrinsèques, les plasmas froids se diffusent dans d'autres secteurs comme :

- **La métallurgie et la mécanique :** durcissement superficiel et protection anticorrosion des pièces et outillages.
- **La plasturgie :** préparation de la surface à une enduction ultérieure, nettoyage et dégraissage, élaboration de fonctions sélectives sur membranes, modification du coefficient de frottement, création d'un effet barrière, notamment pour les emballages alimentaires.
- **Le textile :** anti-mouillabilité, antiglisse ou encore l'optique et l'optoélectronique (dépôt, organométalliques multicouches).
- **Élimination de l'électricité statique :** l'électricité statique est, dans l'industrie, la source de dysfonctionnements gênants. Elle provoque des décharges néfastes aux dispositifs électroniques.

La figure 3.13 représente un exemple d'utilisation de la décharge à barrière diélectrique pour le traitement d'une surface de plastique.

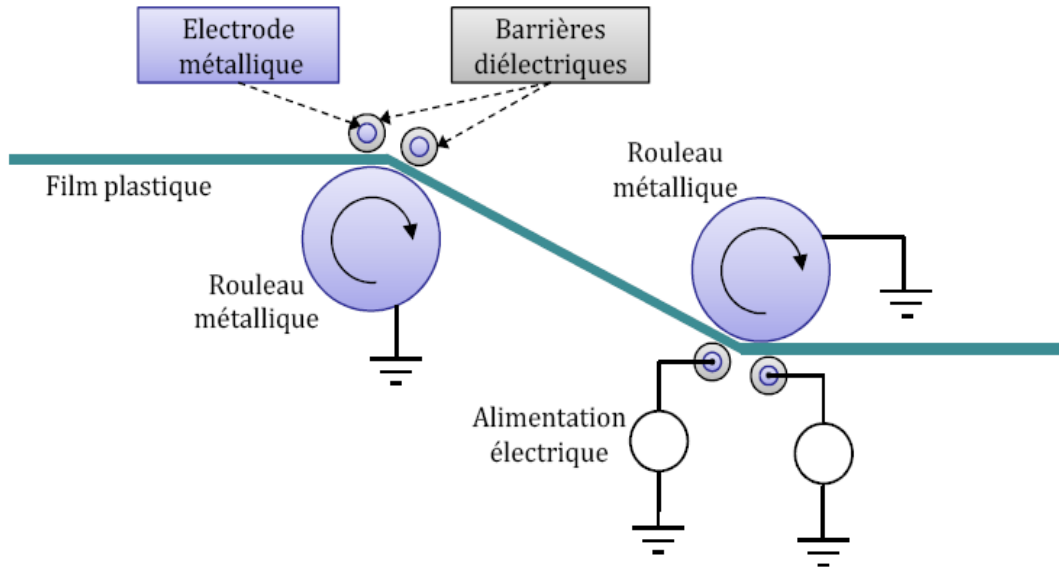


Figure 3.13. Utilisation d'une DBD dans le traitement surfacique de plastiques [52].

### ➤ Dépollution des effluents gazeux

Le traitement de gaz avec les décharges couronne se fait par des réacteurs. L'utilisation des réacteurs plasmas froids hors équilibre générés par des décharges électriques de type couronne nous permet de traiter les gaz à pression atmosphérique. Le traitement s'effectue soit en détruisant les espèces toxiques, soit en les transformant en espèces moins nocives et/ou plus facilement traitables par d'autres techniques de dépollution. Les espèces toxiques traitées peuvent être des oxydes d'azote et de soufre ou des composés organiques volatiles. Des recherches sont également en cours pour estimer le potentiel de traitement des surfaces par des dispositifs hybrides couplant les décharges couronne avec des catalyseurs. Dans certains cas, le réacteur corona peut également servir de précipitateur électrostatique et piéger les poussières ou les particules lourdes [11,66].

Le traitement d'un gaz d'échappement par réacteur corona s'effectue en trois principales étapes comme il est indiqué sur la figure 3.14.

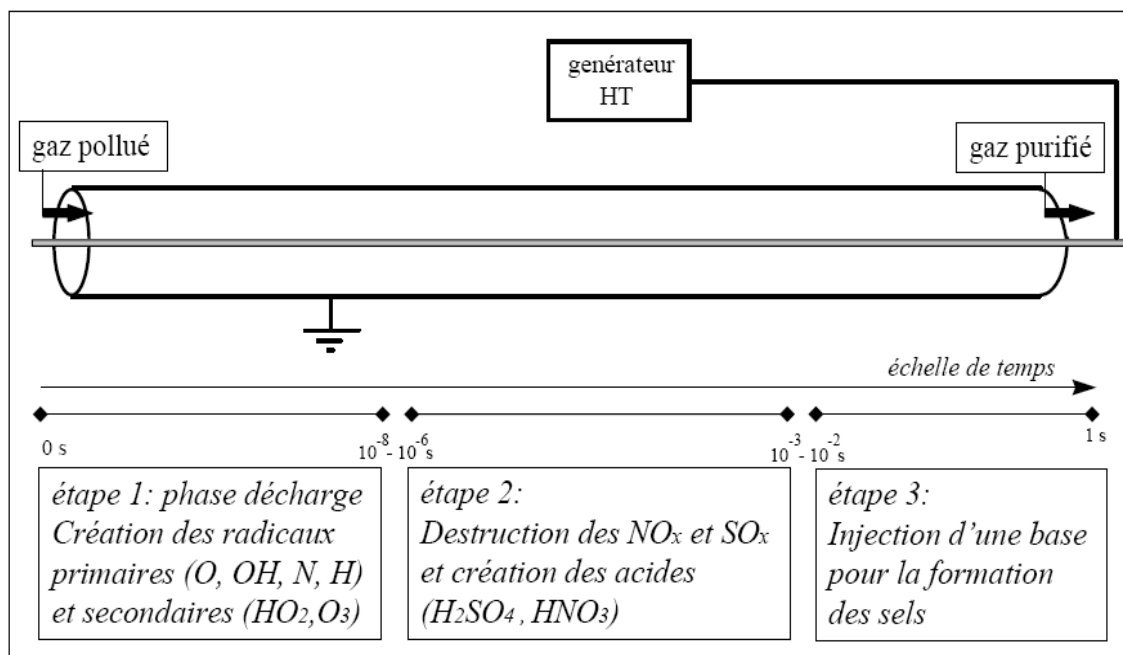


Figure 2.14. Représentation schématique des principales étapes de la destruction des oxydes toxiques par décharge couronne [66].

### 3.9 Conclusion

Dans ce chapitre nous avons donné l'idée générale sur les DBD. Nous avons parlé sur les paramètres de régulation de cette décharge, les différentes configurations de la DBD et aussi les mesures de la résistance de la barrière. Nous avons également donné les différents types de la DBD ainsi que ses différents domaines d'application.

## 4.1 Introduction

S'il est établi que le plasma généré par une décharge couronne facilite ou amplifie les interactions entre le gaz et les surfaces, les expériences mettant en évidence les phénomènes sont laborieuses et les systèmes d'analyse ne sont pas toujours disponibles. C'est cette contrainte qui fit que dans le présent travail nos expériences ont été orientées vers les matériaux isolants beaucoup plus que les surfaces métalliques. En effet si la confection d'échantillons isolants est relativement aisée, ce n'est pas le cas avec des échantillons métalliques. De plus, si des modifications de résistivité volumique peuvent être examinées avec des isolants cela est extrêmement difficile avec des conducteurs.

La décharge couronne utilisée dans nos expériences est une décharge négative. Ce type de décharge a la particularité de présenter un caractère oxydant très marqué. Ce caractère oxydant peut avoir pour effet de perturber les liaisons voire de les casser ou dans le cas extrême causer des modifications morphologiques. Le dispositif de décharge mis en œuvre dans nos expériences est de configuration pointe-plan, le matériau à traiter étant inséré, sous forme de barrière entre la pointe et le plan (cf. figure 4.1). Durant nos différentes expériences nous avons examiné :

1°) l'évolution temporelle du courant de la décharge couronne en présence du matériau.

2°) le phénomène de charge d'échantillons traités par effet couronne

3°) les variations de résistivité volumique des échantillons suite à une exposition à la décharge couronne.

4°) les variations morphologiques révélées par la microscopie électronique à balayage.

Ces différents examens peuvent donner des indications sur les modifications affectant les échantillons. Dans le cas d'une surface métallique, seules l'évolution temporelle du courant et la séquence de charge ont été examinées. Afin de lever toute équivoque et aider à la compréhension de la problématique, il nous semble utile de préciser un point d'une extrême importance. En effet, à première vue, examiner les variations des courants de décharge semble traiter des variations infligées à la décharge

couronne et non celles affectant les matériaux. Cela n'est pas faux mais les variations de courant sont intimement liées aux modifications subies par les matériaux, sur les variations de la résistivité. Cela est très apparent dans le cas des conducteurs, pour lesquels d'ailleurs nous n'avons pas pu examiner les autres altérations.

Dans le cas des diélectriques, les matériaux soumis à étude sont le PMMA, le PS et le SAN. La surface métallique qui a été traitée consiste en une tôle magnétique pour transformateurs. La distance inter-électrodes choisie est de 2 cm, la pointe utilisée est en acier inoxydable avec une terminaison de forme conique avec un angle d'ouverture de  $30^\circ$ . Les plans utilisés sont des disques en acier avec un diamètre de 10 cm. Le schéma conventionnel du dispositif expérimental est donné sur la figure 4.1. Les échantillons ont un diamètre de 12 cm, ce qui permet d'éviter tout contournement. Les essais se sont déroulés sous une pression de 1005 hPa et une température de  $25^\circ\text{C}$ .

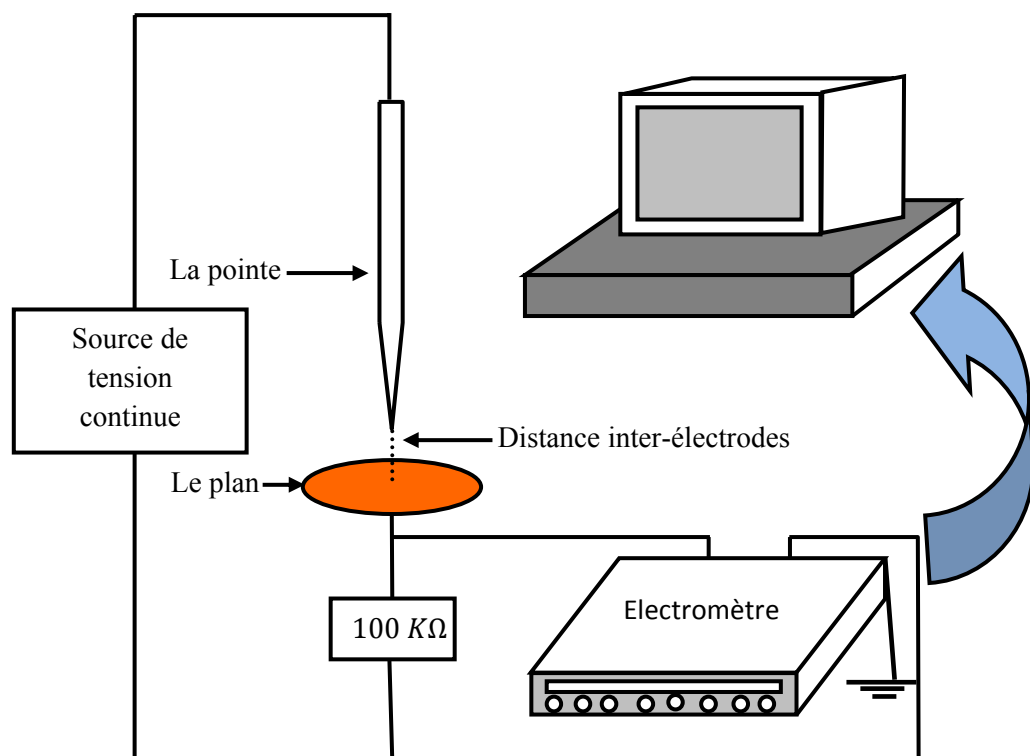


Figure 4.1 : Schéma conventionnel du dispositif expérimental utilisé dans le traitement par décharge couronne.

## **4.2 Evolution temporelle du courant avec des échantillons diélectriques**

Cette étude a été effectuée pour deux niveaux de tension à savoir 30 et 35 kV. Les valeurs très voisines des tensions d'essai résident dans le fait que l'effet couronne n'apparaît qu'au-delà d'un seuil et que lorsque la tension est très élevée, il y a risque de claquage intempestif pouvant être dommageable aux appareils de mesure. L'évolution temporelle du courant a été enregistrée à l'aide d'un électromètre programmable. L'appareil est programmé pour enregistrer 120 mesures espacées de 60 secondes ce qui donne un enregistrement de l'évolution du courant durant deux heures. La valeur du courant associé à la décharge couronne est déduite à partir de la tension aux bornes d'une résistance non inductive de 100 k $\Omega$ .

### **4.2.1 Résultats expérimentaux**

Ces résultats concernent le PMMA avec une épaisseur de 3 mm, le PS et le SAN avec, pour ces matériaux, deux épaisseurs de 2 et 3mm.

#### **4.2.1.1 Cas du PMMA**

L'évolution temporelle du courant d'effet couronne dans le cas de ce matériau est donnée sur la figure 4.2. Les courbes de cette figure sont données pour une épaisseur de barrière de 3 mm et les deux niveaux de tension de 30 et 35 kV. L'examen des courbes données sur cette figure indiquent une augmentation du courant de décharge durant les deux heures d'exposition à la décharge couronne. L'augmentation est beaucoup plus accentuée pour la tension de 35 kV où elle avoisine les 100%, que celle obtenue pour une tension de 30kV pour laquelle on enregistre une hausse de 25% environ.

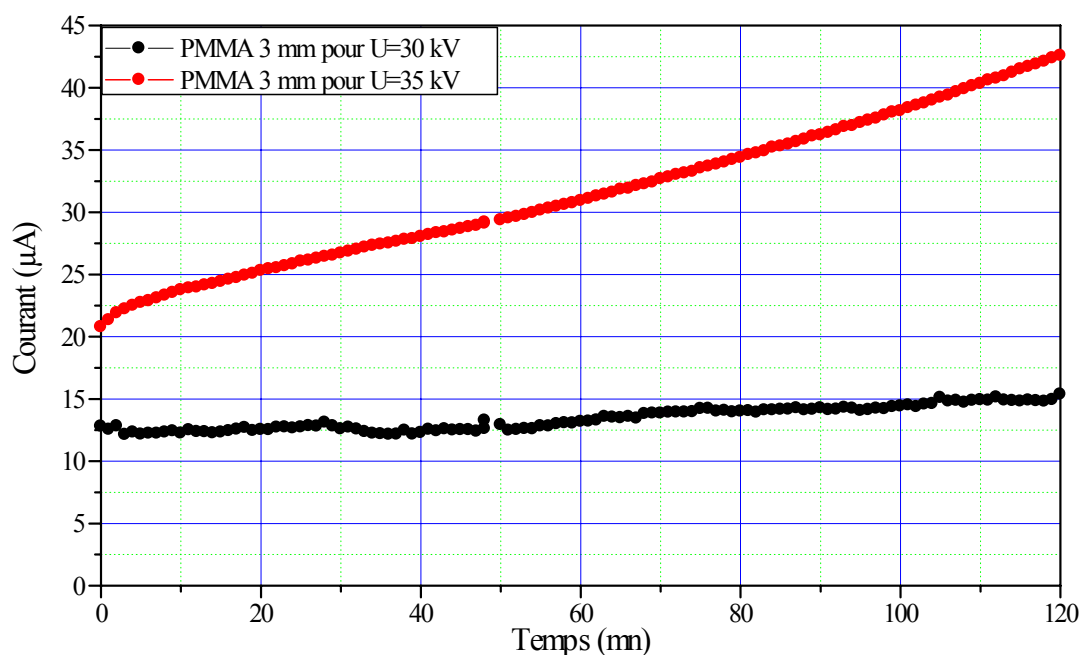


Figure 4.2 : Evolution temporelle du courant avec un échantillon de PMMA de 3mm pour des tensions de 30 et 35 kV.

#### 4.2.1.2 Cas du PS

Les résultats obtenus avec le polystyrène sont donnés sur la figure 4.3. Dans ce cas de matériau deux épaisseurs, 2 et 3 mm, ont été testées.

Les courbes d'évolution du courant de la décharge obtenues avec le polystyrène indiquent une augmentation similaire à celle relevée avec le PMMA mais dans des proportions moins accentuées. Nous remarquons aussi que l'évolution est plus sensible à l'épaisseur lorsque la tension est plus faible (30 kV). Les valeurs relevées indiquent des variations de l'ordre de 25% pour une épaisseur de 2 mm et de 50% pour une épaisseur de 3 mm dans le cas d'une décharge avec une tension de 30 kV. Pour une tension de 35 kV nous notons des augmentations pratiquement identiques pour les deux épaisseurs, augmentations valant environ 50% dans les deux cas.

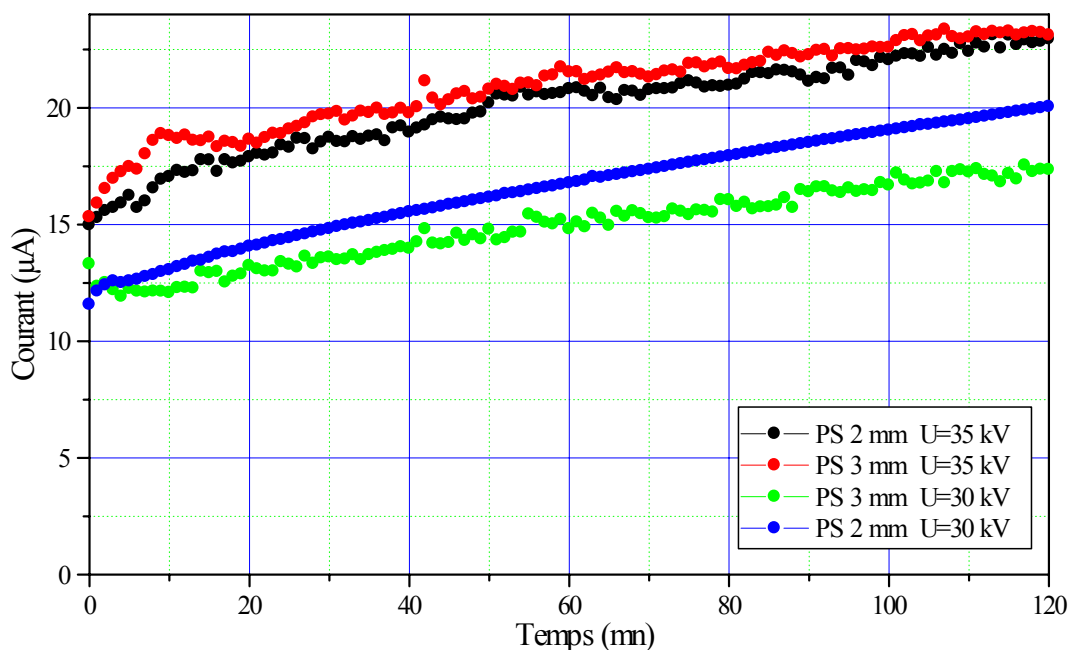


Figure 4.3 : Evolution temporelle du courant pour les échantillons de PS pour des épaisseurs de 2 et 3mm et des valeurs de la tension de 30 et 35 kV.

#### 4.2.1.3 Cas du SAN

De façon analogue à ce qui a été fait pour le polystyrène, nous donnons sur la figure 4.4, les résultats relatifs au SAN.

Quelle que soit l'épaisseur de la barrière isolante, le courant augmente de façon plus accentuée pour la tension de 35 kV. Le courant est plus élevé pour la tension de génération de l'effet couronne de 35 kV. Le courant est plus élevé pour une épaisseur de 2 mm dans le cas où la tension engendrant l'effet couronne est de 30 kV. Ce courant est plus élevé pour une épaisseur de 3 mm quand la tension qui génère l'effet couronne est de 35 kV.

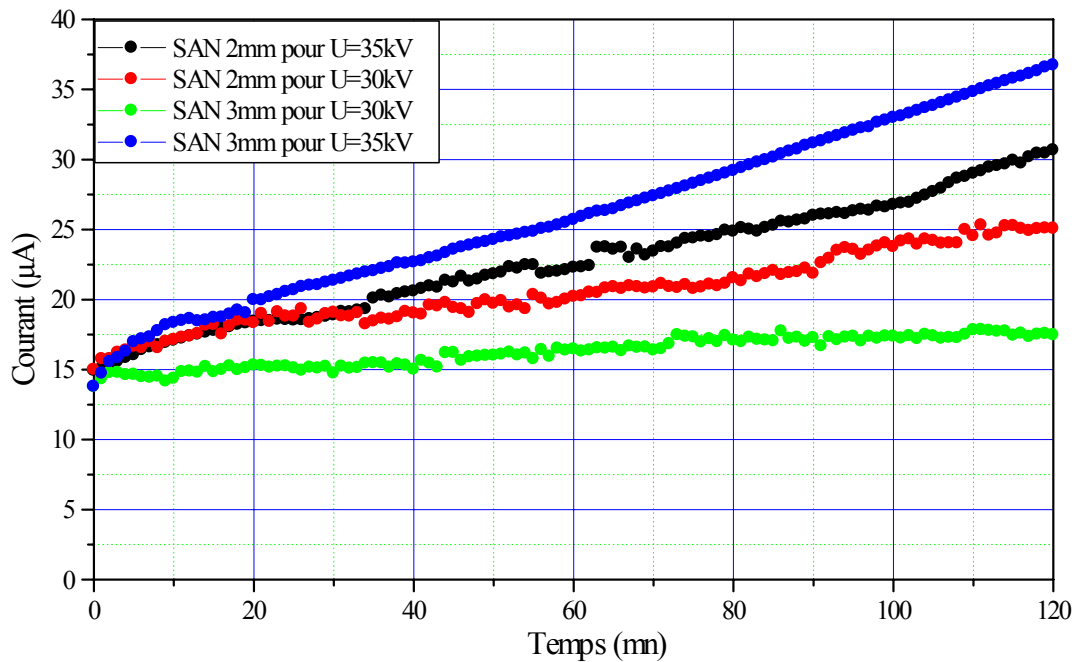


Figure 4.4 : Evolution temporelle du courant pour les échantillons de SAN pour des épaisseurs 2 et 3mm et des valeurs de la tension 30 et 35 kV.

Les courbes d'évolution temporelle obtenues pour le SAN respectent l'allure générale déjà obtenue. Les taux d'accroissement du courant sont plus élevés pour la tension la plus grande (35 kV) avec 100% et 150% pour les épaisseurs de 2 et 3 mm respectivement. Dans le cas de la tension de 30 kV nous avons relevé une augmentation d'environ 70% pour l'épaisseur de 2 mm pour une augmentation très faible (de l'ordre de 10%) pour l'échantillon de 3 mm d'épaisseur.

#### 4.2.1.4 Effet de la nature du matériau sur l'évolution temporelle du courant

Nous avons regroupé dans les figures 4.5 et 4.6 les courbes donnant l'évolution du courant d'effet couronne pour les trois matériaux, pour une épaisseur de 3 mm et une tension de test de 30 kV et 35 kV respectivement. Les courbes portées sur ces figures montrent dans tous les cas qu'il y a augmentation du courant.

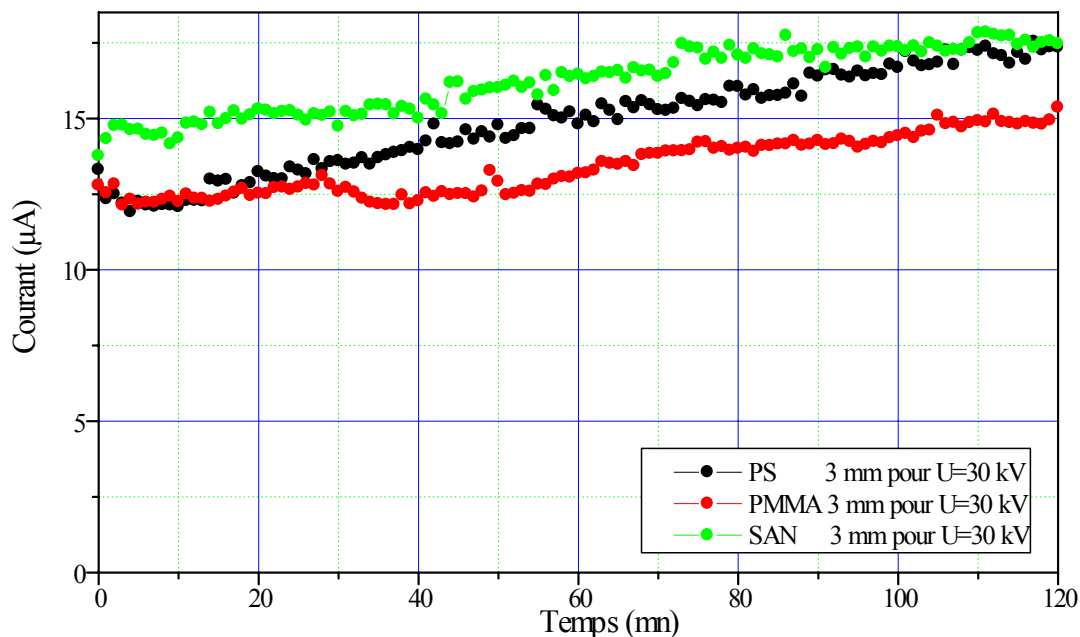


Figure 4.5 : Evolution temporelle du courant pour les trois matériaux PMMA, PS et SAN pour une épaisseur de 3 mm et une tension de 30 kV.

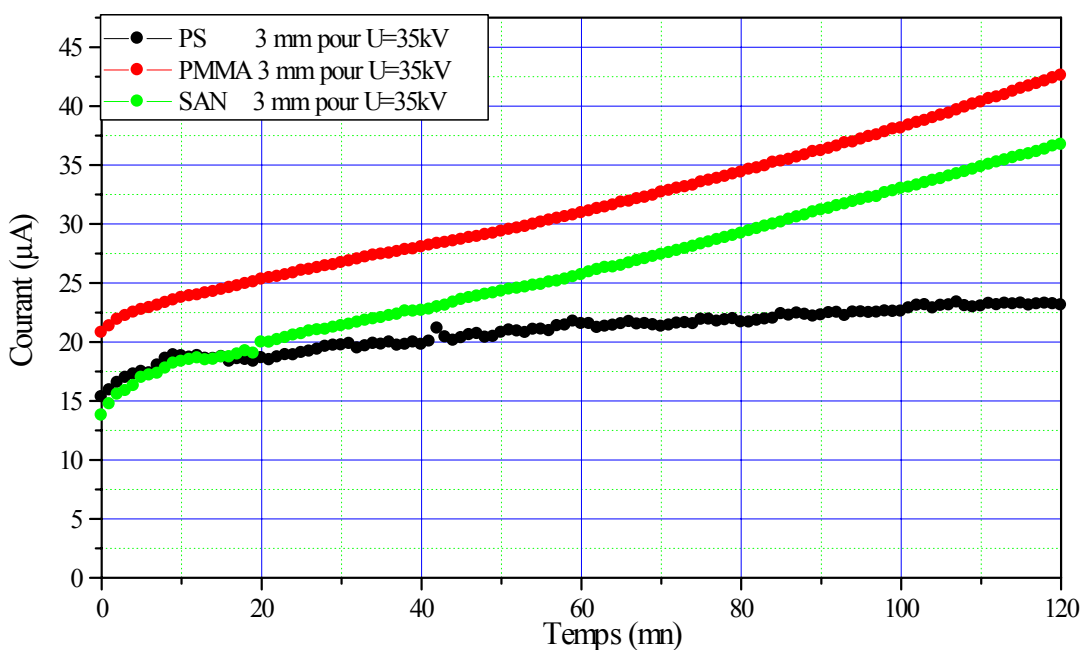


Figure 4.6 : Evolution temporelle du courant pour les trois matériaux PMMA, PS et SAN pour une épaisseur de 3mm et une tension de 35 kV.

Pour une tension de 30 kV, il nous est aussi révélé que les courants sont plus intenses pour le SAN suivi par le PS, les courants les moins forts étant obtenus avec le PMMA. Pour une tension de 35 kV, les courants les plus élevés sont associés au PMMA, suivis des courants liés au SAN puis ceux du PS.

#### **4.2.1.5 Tendence générale pour les trois matériaux**

Nos expériences ont mis en évidence une augmentation du courant de décharge durant la période d'exposition. Cette augmentation est plus importante lorsque la tension est élevée. En effet pour une tension élevée le courant est plus intense, ce qui augmente substantiellement l'efficacité du plasma généré. Il est ainsi montré que le plasma résultant de la décharge affecte le matériau. L'effet sur ce dernier a pu avoir lieu sur sa résistivité ou tout simplement sur son émissivité.

### **4.3. Comportement électrique des matériaux soumis à des séquences de charges/décharges**

Des échantillons des différents matériaux traités par décharge couronne durant deux heures sont soumis à des séquences de charge/décharge sous une tension de 1000 V dans le but de mettre en évidence l'action de l'effet couronne sur ces matériaux. La décharge est réalisée avec une tension de 30 kV dans la même configuration que celle décrite dans ce qui précède. Afin de déceler des modifications, nous donnons pour chaque cas les résultats obtenus pour des échantillons témoins, c'est-à-dire des échantillons non traités à l'effet couronne. Le schéma représentant le système de mesure est donné sur la figure 4.7. Notons que le dispositif de la figure nous permet également d'accéder à la mesure des résistivités volumiques.

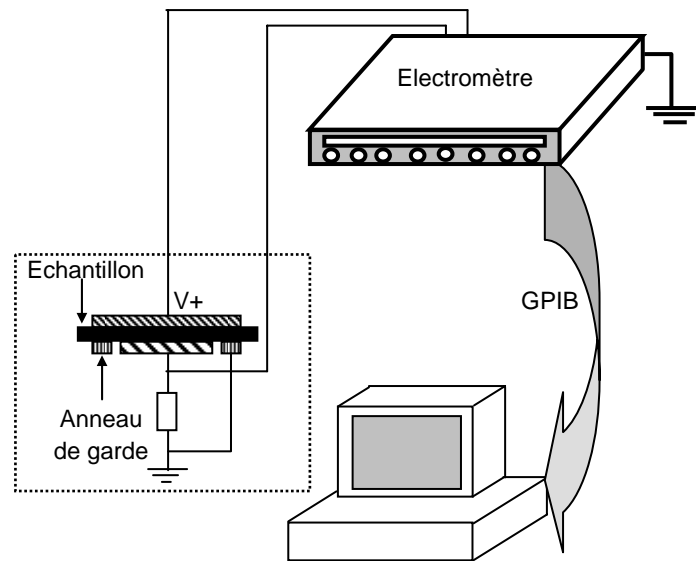


Figure 4.7 : Schéma du dispositif expérimental utilisé pour l'étude des charges sous 1000 V et pour la mesure des résistivités volumiques.

#### 4.3.1. Echantillons de PMMA

Dans le cas du PMMA, Les séquences de charge/décharge sont données dans la figure 4.8 pour un échantillon non traité et sur la figure 4.9 pour un échantillon traité à la décharge couronne. Ces figures révèlent que les courants de charge sont plus importants avec l'échantillon exposé à la décharge couronne.

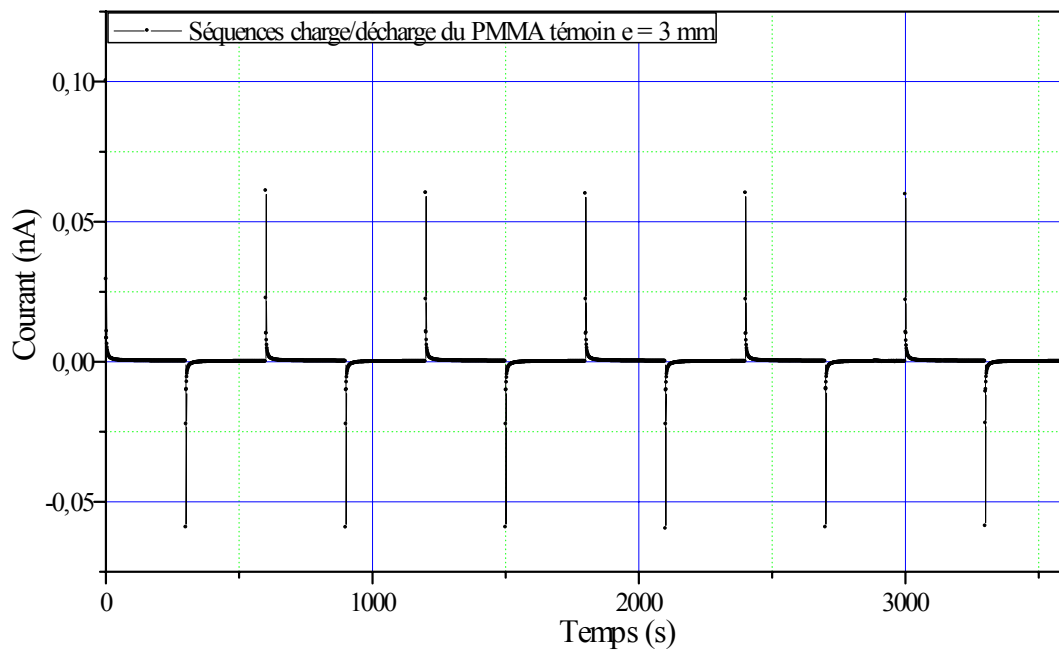


Figure 4.8: Séquences charge/décharge pour un échantillon de PMMA de 3 mm non traité.

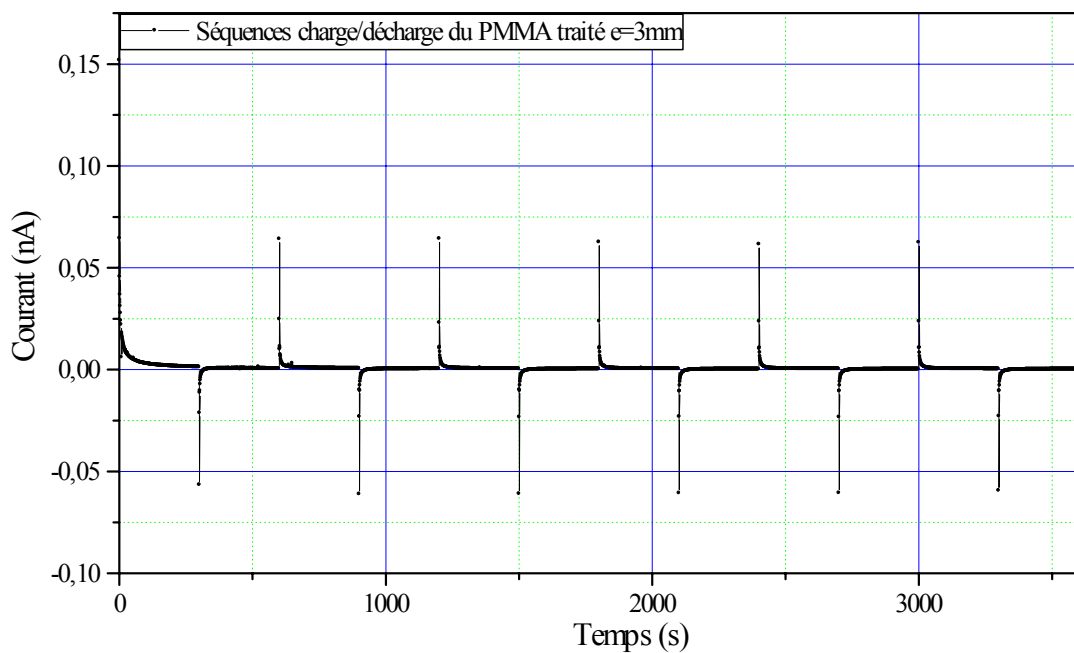


Figure 4.9 : Séquences charge/décharge pour un échantillon de PMMA de 3 mm traité.

### 4.3.2. Echantillons de PS

Comme pour le PMMA, nous avons soumis à examen deux échantillons de polystyrène ayant une épaisseur de 3 mm. L'un des échantillons étant vierge c'est-à-dire exempt de traitement alors que l'autre a été traité durant deux heures par une décharge couronne de 30 kV. Les résultats obtenus sont donnés dans les figures 4.10 et 4.11.

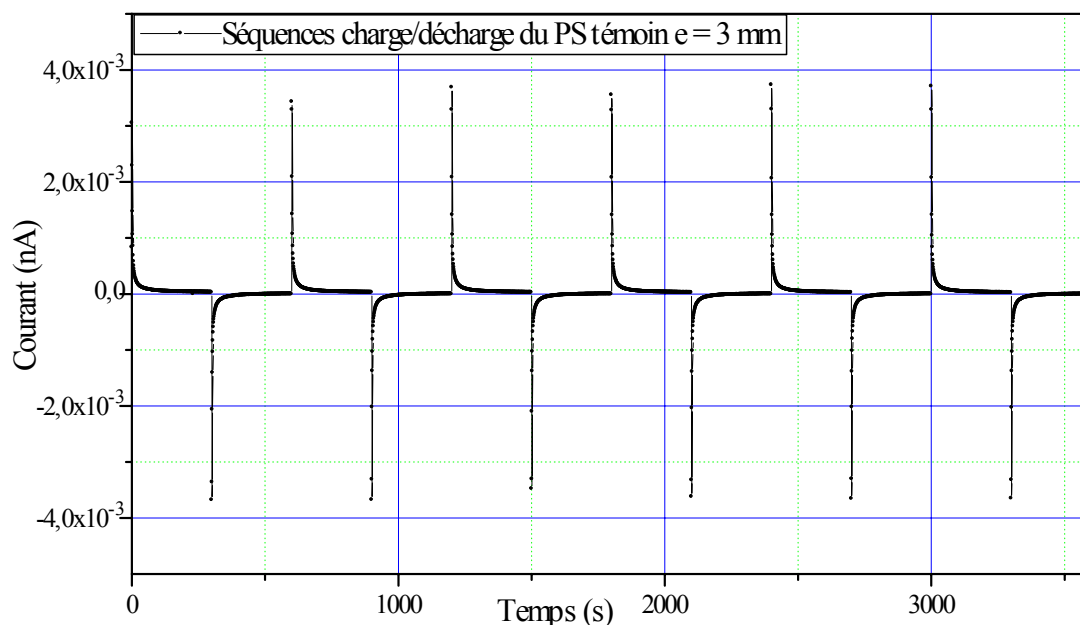


Figure 4.10 : Séquences de charge/décharge pour l'échantillon du PS 3mm non traité.

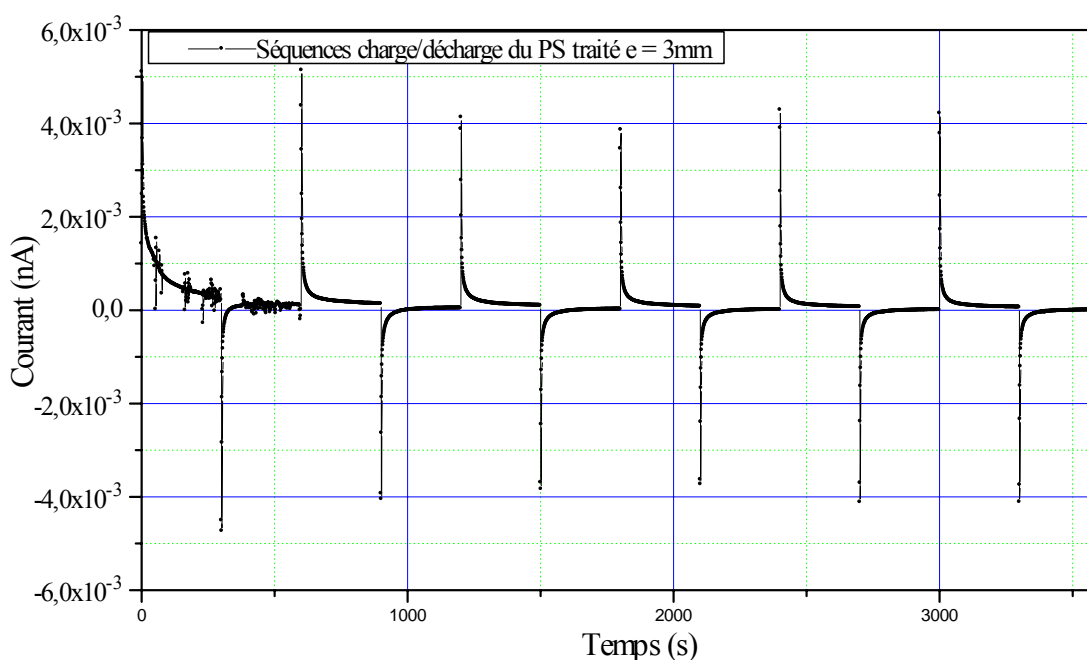


Figure 4.11: Séquences de charge/décharge pour l'échantillon du PS de 3mm traité.

Dans le cas du PS nous avons également étudié un échantillon ayant une épaisseur de 2 mm et les résultats obtenus sont donnés sur les figures 4.12 et 4.13.

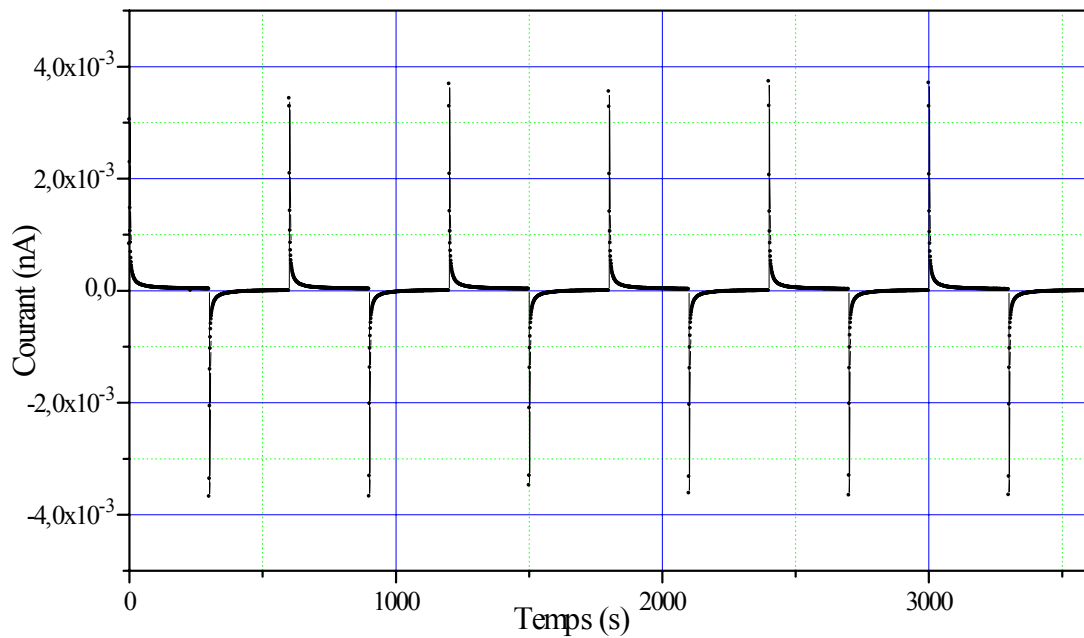


Figure 4.12: Séquences de charge/décharge pour l'échantillon du PS de 2 mm non traité.

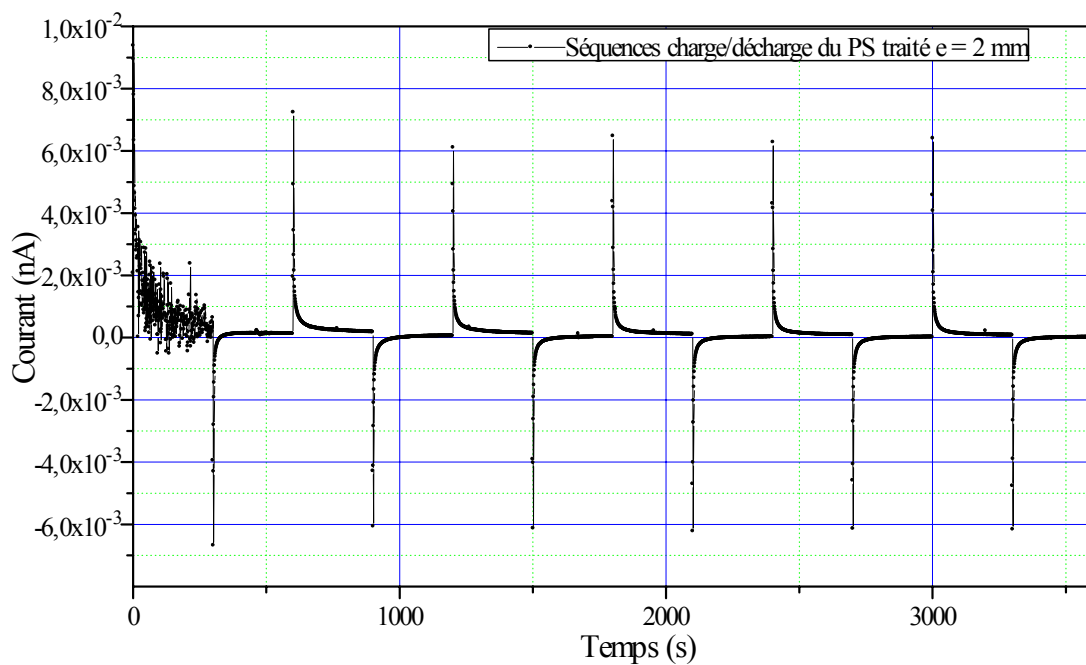


Figure 4.13 : Séquences de charge/décharge pour l'échantillon du PS de 2 mm traité.

### 4.3.3. Echantillons de SAN

Les échantillons de SAN ont été examinés selon le protocole adopté pour le PMMA et le PS. Les résultats sont donnés sur les figures 4.14 et 4.15 pour une épaisseur de 3 mm et sur les figures 4.16 et 4.17 pour les échantillons dont l'épaisseur est de 2 mm.

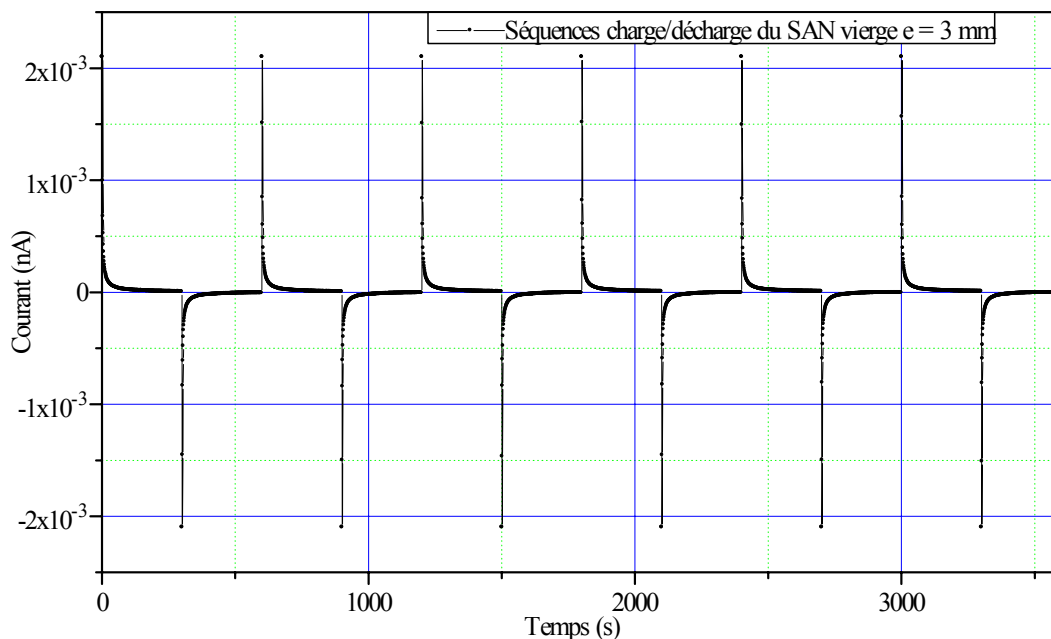


Figure 4.14: Séquences de charge/décharge pour l'échantillon de SAN de 3mm non traité.

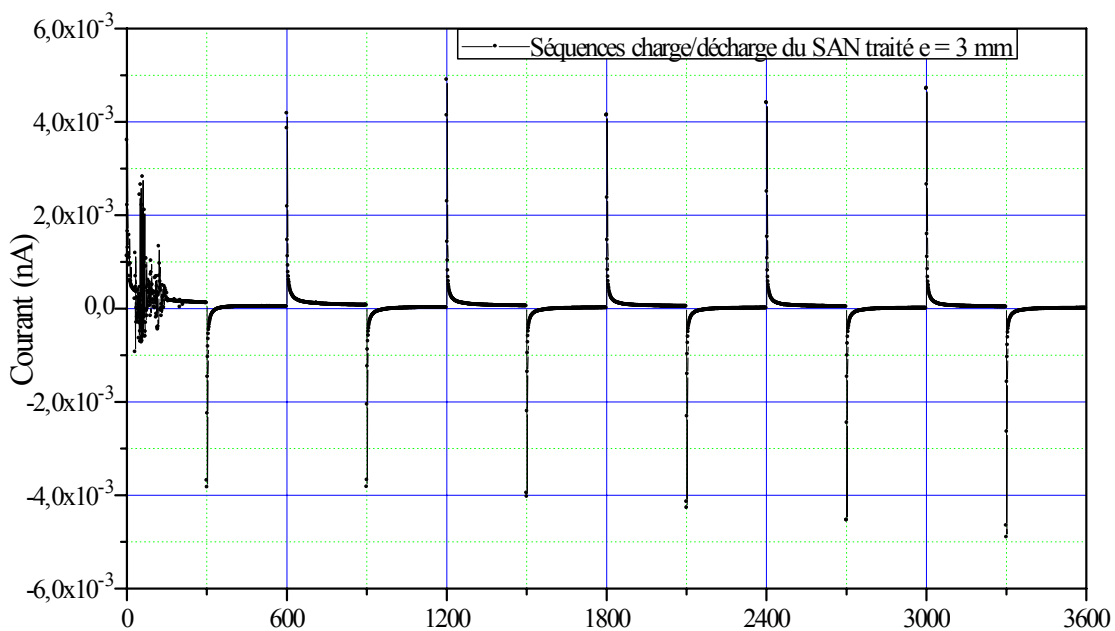


Figure 4.15 : Séquences de charge/décharge pour l'échantillon de SAN de 3 mm exposé à la décharge durant deux heures.

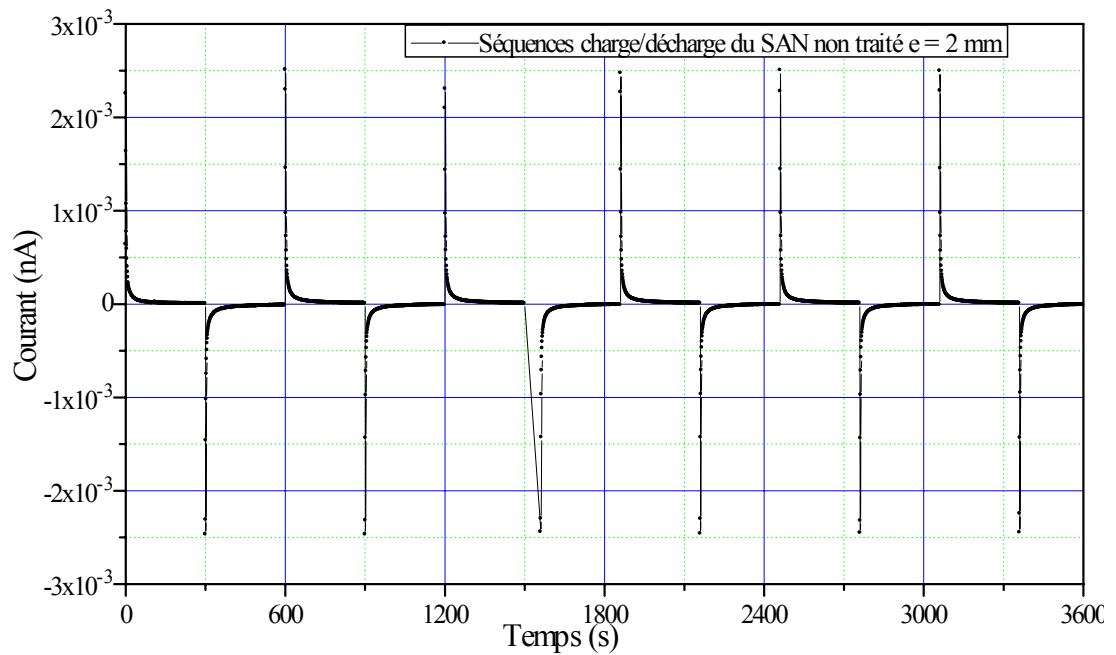


Figure 4.16: Séquences de charge/décharge pour l'échantillon de SAN de 2 mm non traité.

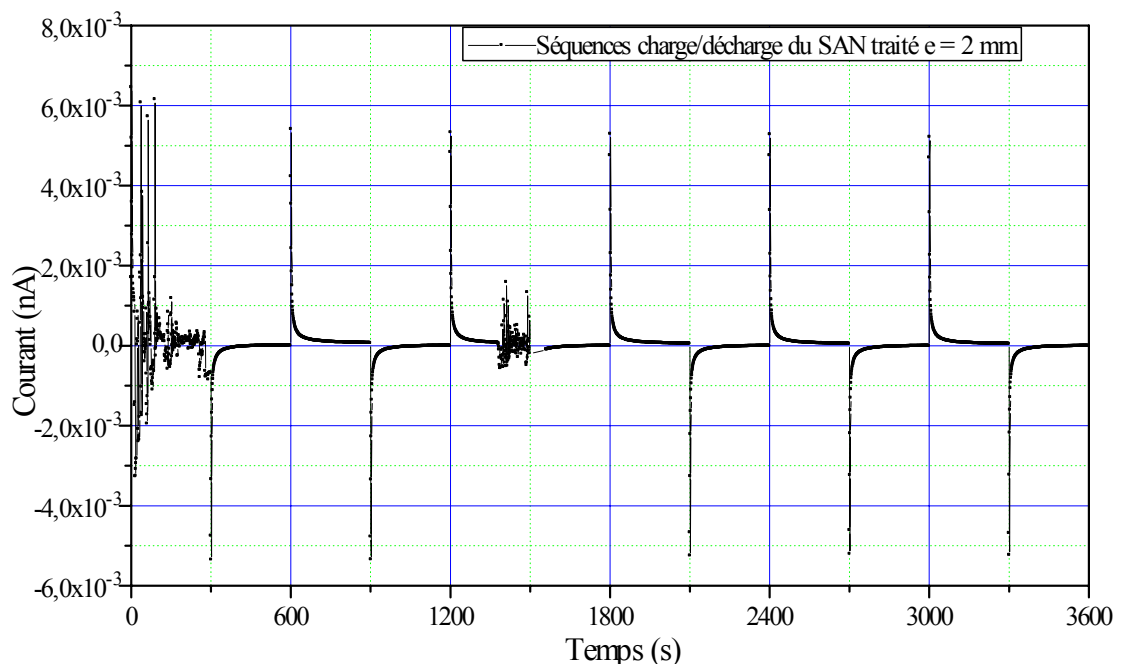


Figure 4.17: Séquences de charge/décharge pour l'échantillon de SAN de 2 mm exposé à la décharge durant deux heures.

Pour les trois matériaux, les séquences de charge/décharge montrent clairement une altération de l'état isolant étant donné que le courant de charge augmente visiblement.

#### 4.4 Représentation de la première et de la deuxième charge pour les échantillons de PMMA, PS et le SAN avec une épaisseur fixée à 3 mm.

Dans le souci de clarté, nous avons extrait des courbes données sur les différentes figures ce qui correspond aux première et seconde charges pour les différents échantillons. Les résultats expérimentaux sont donnés sur les figures 4.18 et 4.19.

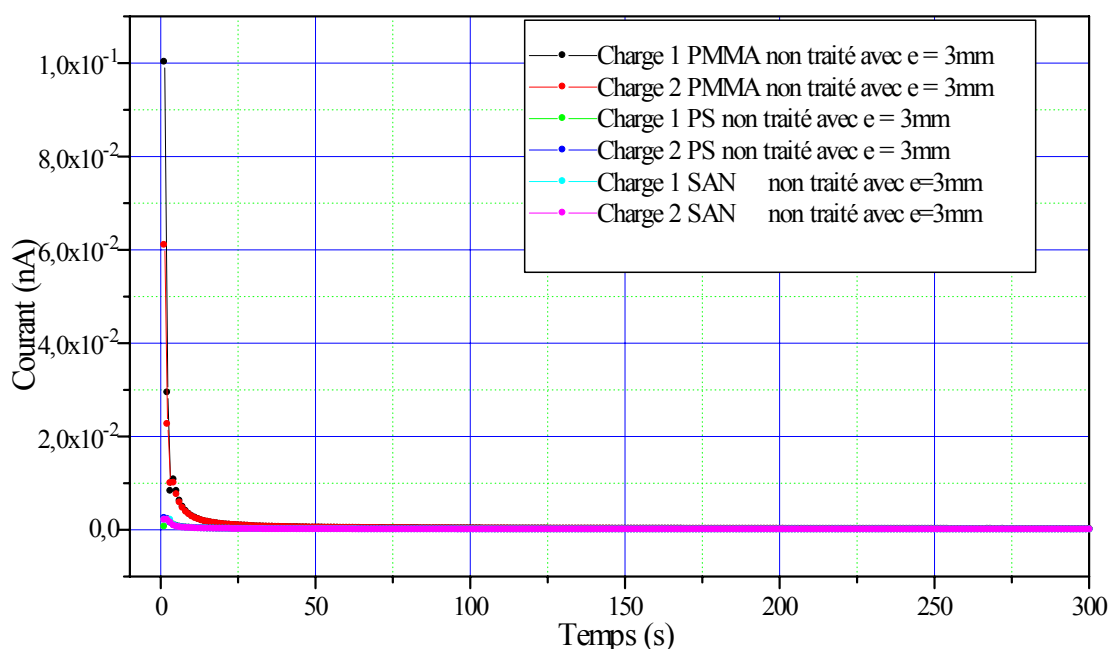


Figure 4.18 : Représentation des deux premières charges dans le cas du PMMA, du PS et du SAN avant traitement pour une épaisseur de 3mm.

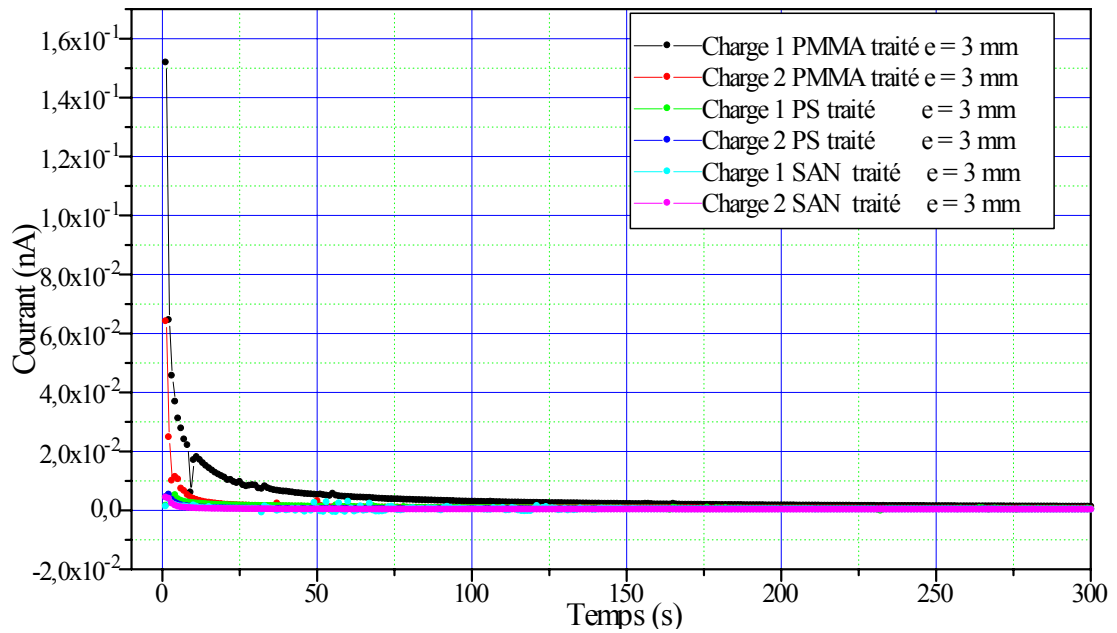


Figure 4.19 : L'évolution temporelle des deux premières charges pour le PMMA, PS et le SAN après traitement par la décharge couronne.

#### 4.5 Influence de l'exposition à la décharge couronne sur la première et la deuxième charge pour les échantillons PMMA, PS et le SAN.

##### 4.5.1 Cas du PMMA

Les résultats pour le PMMA sont donnés dans la figure 4.20.

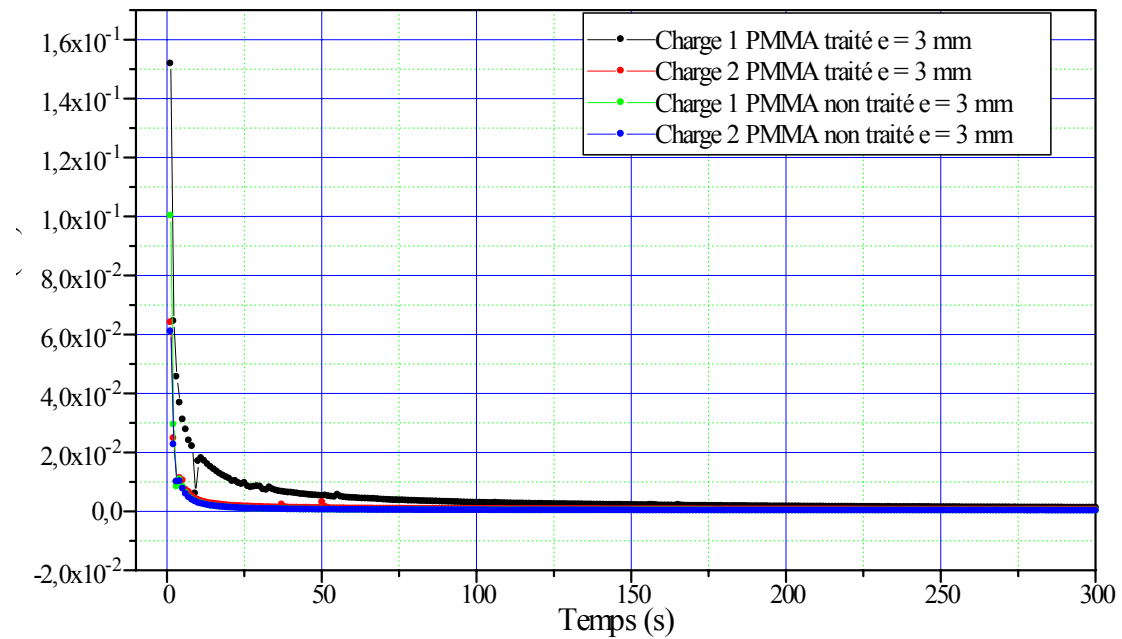


Figure 4.20 : L'évolution temporelle du courant pour les deux premières charges du PMMA de 3 mm avant et après traitement.

#### 4.5.2 Cas du SAN

Les résultats pour le SAN sont donnés dans les figures 4.21.

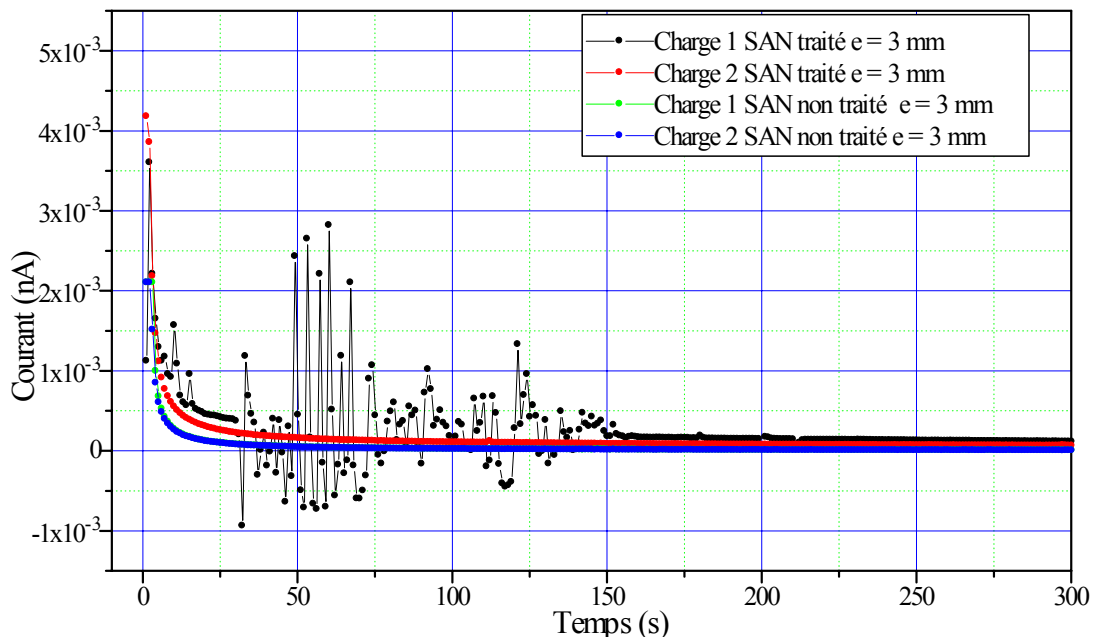


Figure 4.21 : L'évolution temporelle du courant pour les deux premières charges du SAN 3 mm avant et après traitement.

### 4.5.3 Cas du PS

Les résultats pour le PS sont donnés dans la figure 4.22.

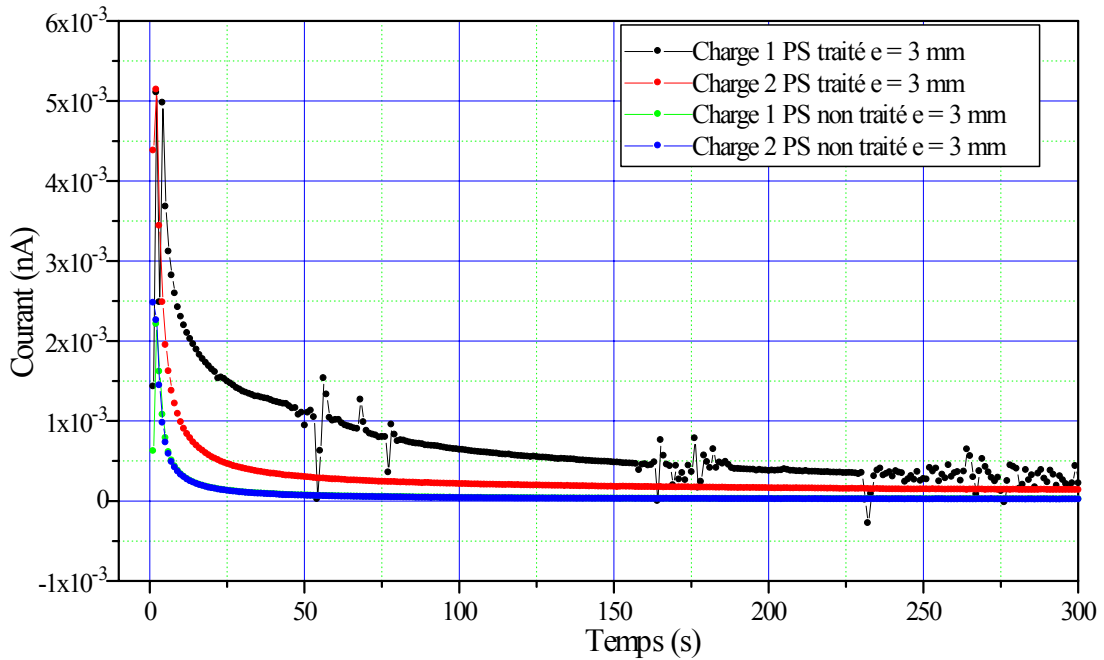


Figure 4.22 : Evolution du courant pour les deux premières charges du PS 3 mm.

### 4.5.4 Cas des échantillons d'une épaisseur de 2mm

Pour le SAN et le PS nous avons également examiné des échantillons de 2mm d'épaisseur. Les résultats obtenus pour cette épaisseur sont regroupés dans la figure 4.23 pour les échantillons non traités et dans la figure 4.24 pour les échantillons soumis à la décharge couronne.

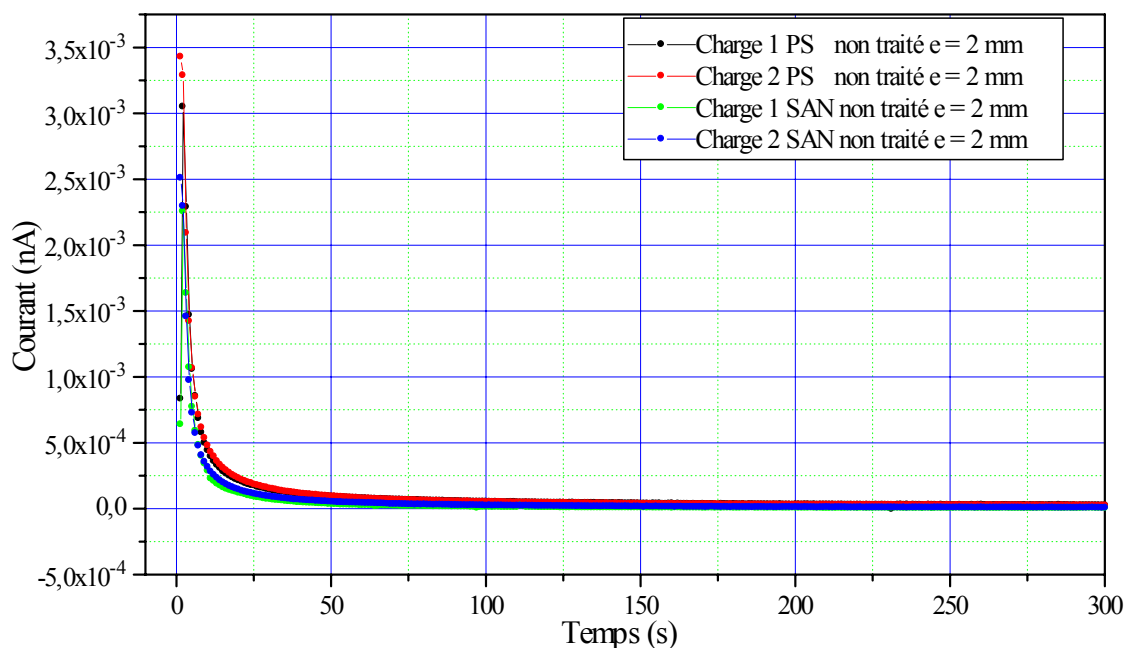


Figure 4.23 : L'évolution temporelle du courant des deux premières charge pour le PS et le SAN de 2mm avant l'exposition des matériaux à la décharge.

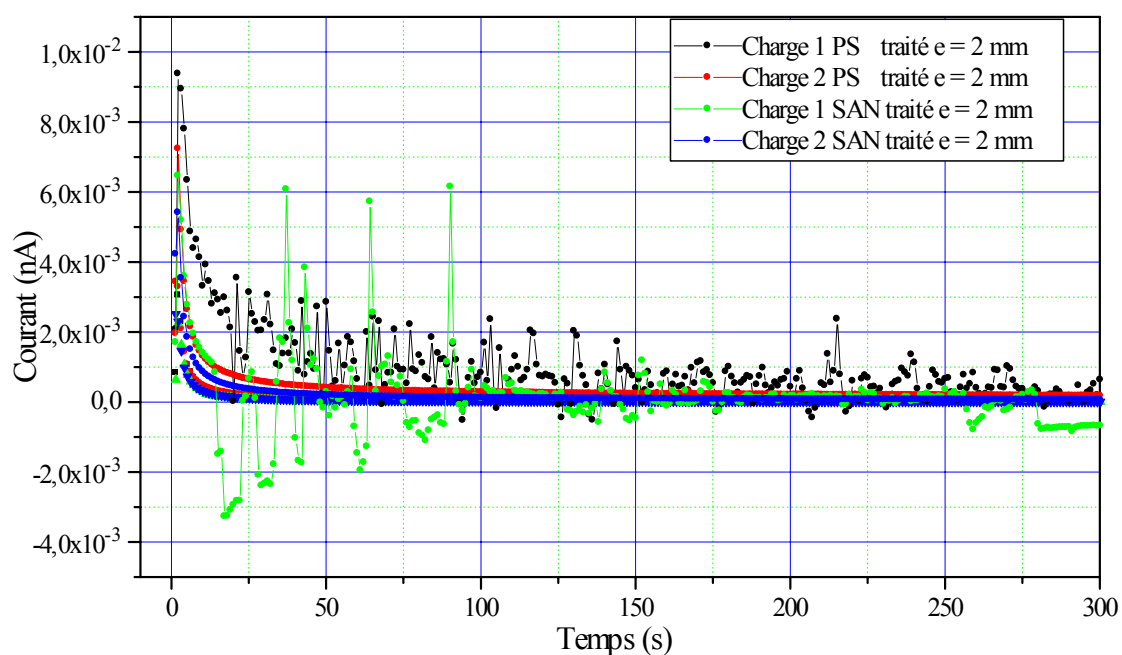


Figure 4.24 : L'évolution temporelle du courant des deux premières charges pour le PS et le SAN (2 mm) traités par la décharge.

#### 4.6 Influence de l'exposition à la décharge couronne sur les résistivités volumiques des échantillons de PMMA, de PS et de SAN

Les résistivités volumiques des différents échantillons ont été mesurées suite à une exposition à la décharge couronne pendant deux heures sous 30 kV et 35 kV. Les valeurs de ces résistivités sont consignées dans le tableau 4.1.

Tableau 4.1 : Valeurs des résistivités volumiques des matériaux avec ou sans exposition à l'effet couronne.

Matériau	Résistivité volumique en ( $\Omega \cdot \text{cm}$ ) avant traitement	Résistivité volumique en ( $\Omega \cdot \text{cm}$ ) après traitement sous 30 kV	Résistivité volumique en ( $\Omega \cdot \text{cm}$ ) après traitement sous 35 kV
PMMA 3mm	$9,02 \cdot 10^{16}$	$4,74 \cdot 10^{16}$	$1,03 \cdot 10^{16}$
PS 3mm	$4,81 \cdot 10^{17}$	$1,03 \cdot 10^{17}$	$9,54 \cdot 10^{16}$
PS 2mm	$4,01 \cdot 10^{17}$	$1,22 \cdot 10^{17}$	$8,34 \cdot 10^{16}$
SAN 3mm	$6,39 \cdot 10^{17}$	$2,09 \cdot 10^{17}$	$1,03 \cdot 10^{17}$
SAN 2mm	$6,38 \cdot 10^{17}$	$1,12 \cdot 10^{17}$	$8,68 \cdot 10^{16}$

Les résistivités volumiques des différents échantillons diminuent suite à l'application de la décharge couronne. Cette résistivité semble diminuer également quand la tension de génération de la décharge couronne augmente.

#### 4.7 Influence de l'exposition à la décharge couronne sur la morphologie des échantillons de PMMA, de PS et de SAN

Pour avoir une idée sur les effets de la décharge couronne sur la morphologie des matériaux nous avons pris quelques images des échantillons obtenues par microscopie électronique à balayage.

La figure 4.25 donne la structure d'un échantillon de PMMA avant traitement. Il est aisé de constater sur cette photographie l'aspect assez uni de la surface. Par contre sur la figure 4.26 est présentée la photographie d'un échantillon du même matériau exposé à la décharge couronne durant deux heures. Sur cette seconde photographie nous voyons bien des différences de morphologie générées par la décharge.

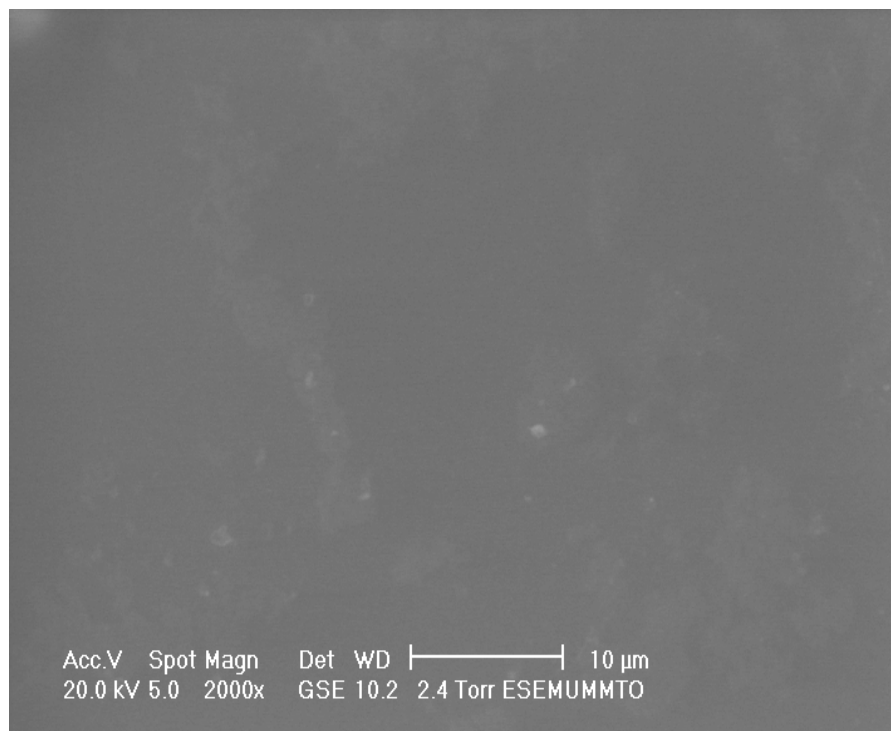


Figure 4.25 : Etat du PMMA 3 mm vu avant traitement par un microscope électronique à balayage (MEB).

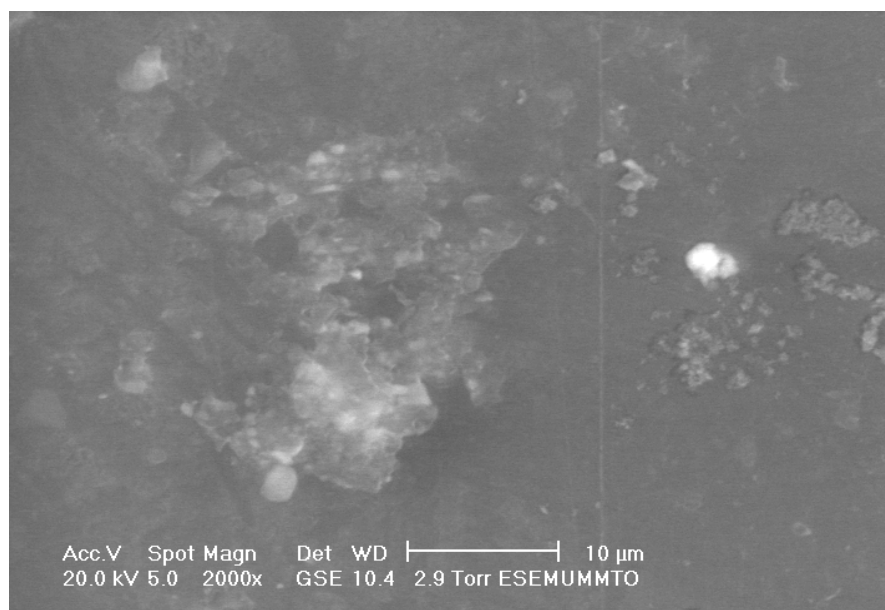


Figure 4.26 : Photo MEB du PMMA 3 mm exposé durant 2 heures au plasma.

Les figures 4.27 et 4.28 représentent les photos du SAN 2 mm vues par (MEB) respectivement avant et après traitement des échantillons par la décharge.

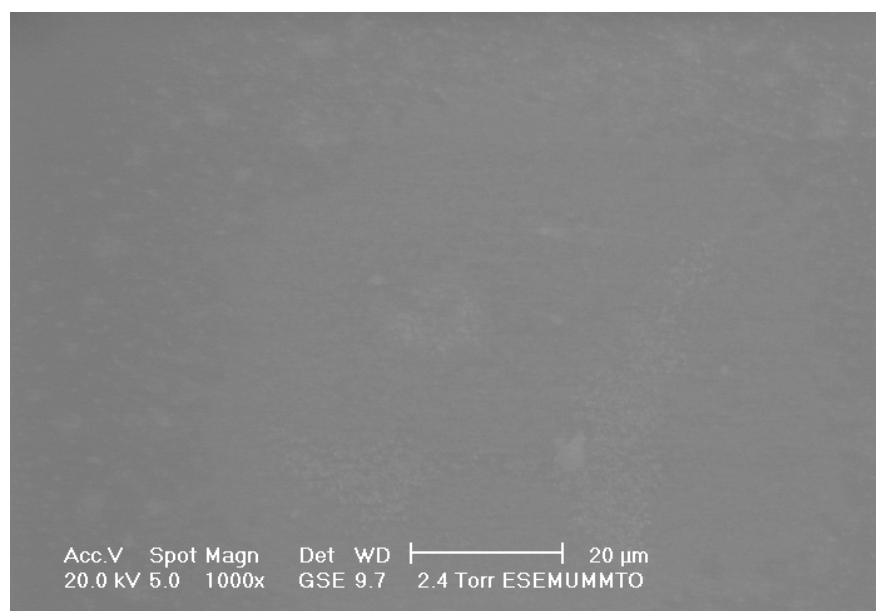


Figure 4.27 : Photo MEB du SAN 2mm non exposé au plasma.

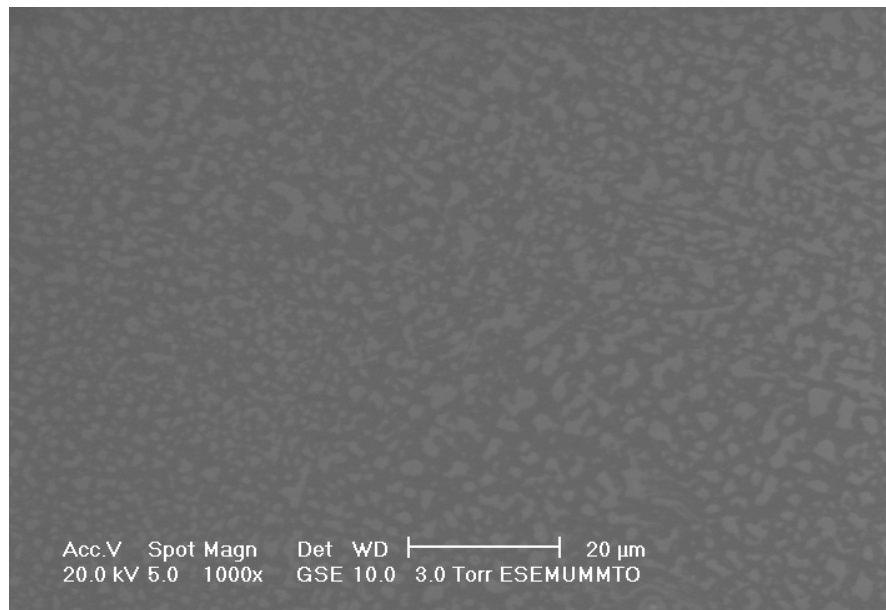


Figure 4.28 : Photo MEB du SAN 2mm exposé durant deux heures au plasma.

Nous constatons sur ces deux figures que la décharge couronne affecte de façon sensible la surface de ce matériau.

Sur les figures 4.29 et 4.30 sont données des photographies SAN 3 mm vues par (MEB) respectivement avant et après traitement des échantillons par la décharge.

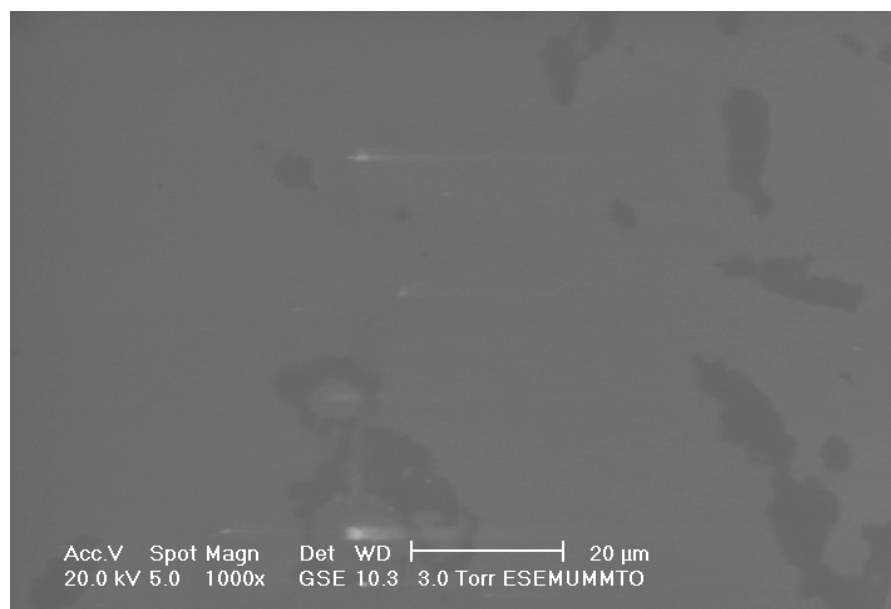


Figure 4.29 : Photo MEB du SAN 3mm non exposé au plasma.

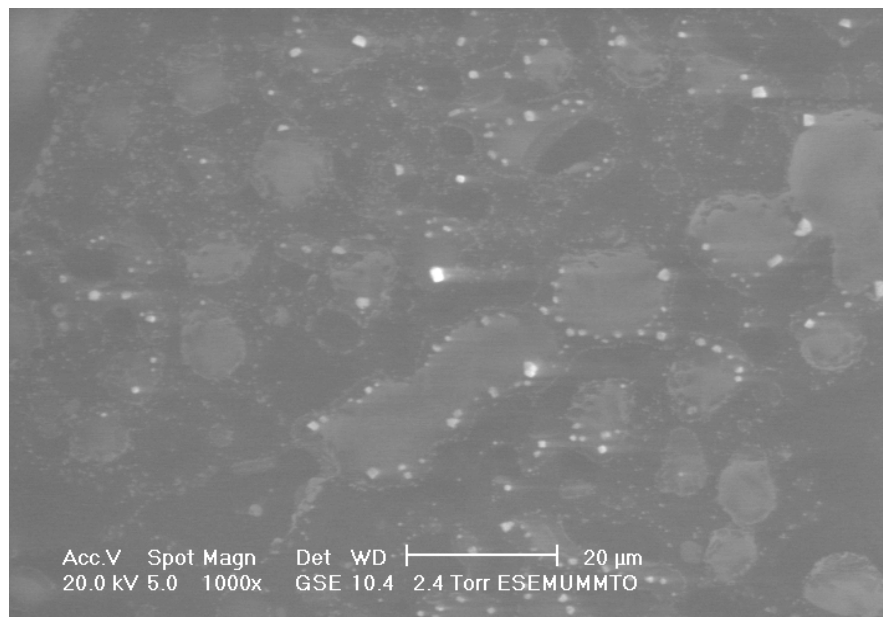


Figure 4.30 : Photo MEB du SAN 3 mm exposé durant deux heures au plasma.

Les figures 4.31 et 4.32 représentent les photos du PS 2mm observées avec le MEB avant et après traitement des échantillons par une décharge couronne.

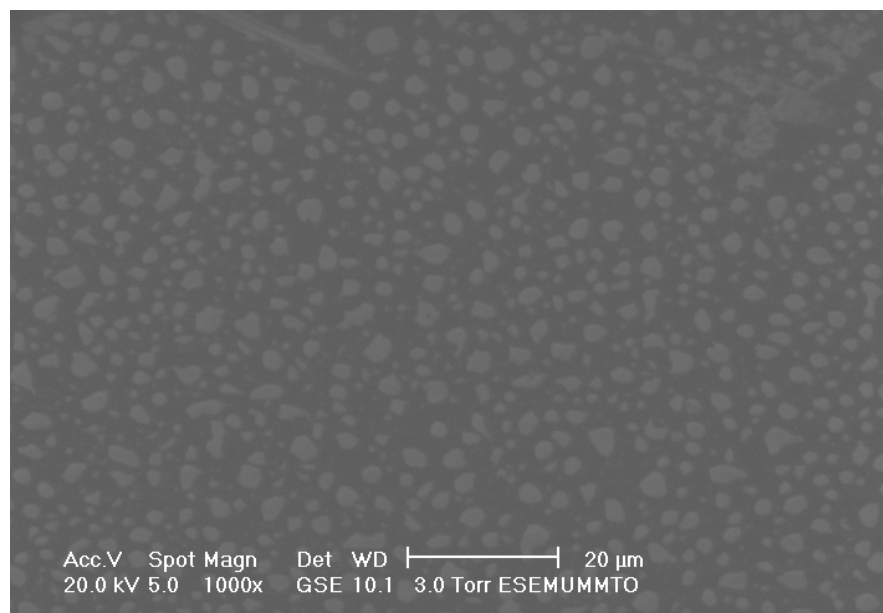


Figure 4.31: Photo MEB du PS 2mm non traité.

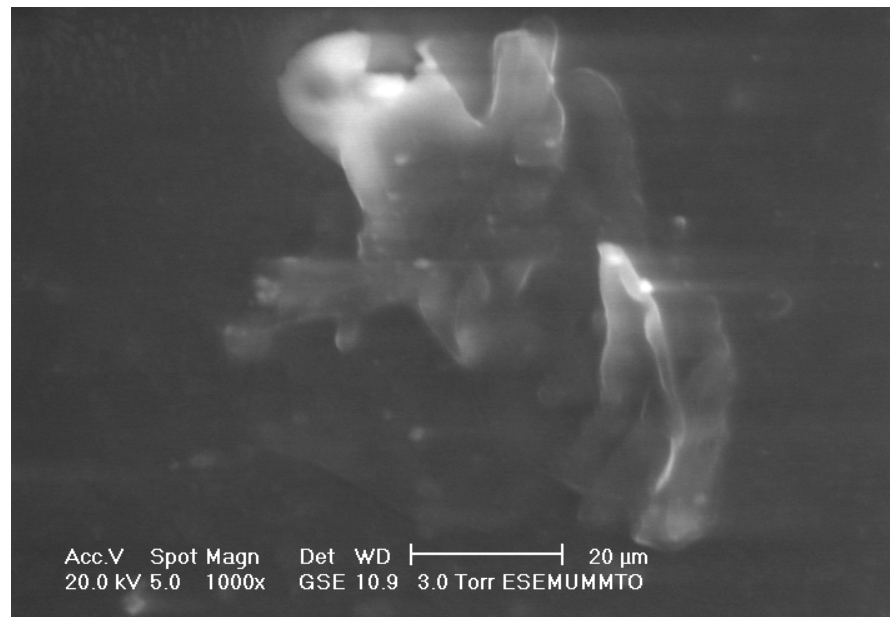


Figure 4.32 : Photo MEB d'un échantillon de PS 2mm après deux heures d'exposition à la décharge couronne.

Les figures 4.33 et 4.34 représentent les photos du PS 3mm observées avec le MEB avant et après traitement des échantillons par une décharge couronne pendant Deux heures.

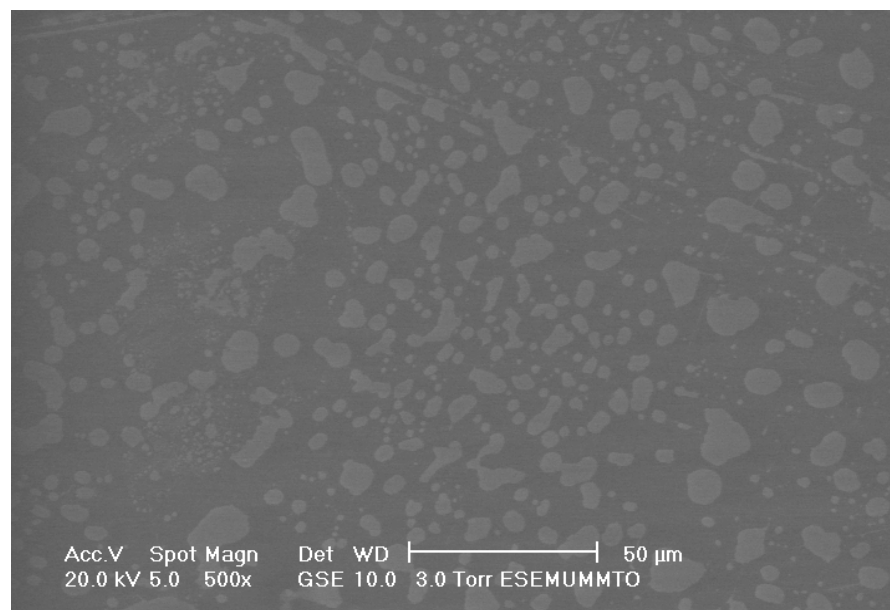


Figure 4.33: Photo MEB du PS 3mm non traité.

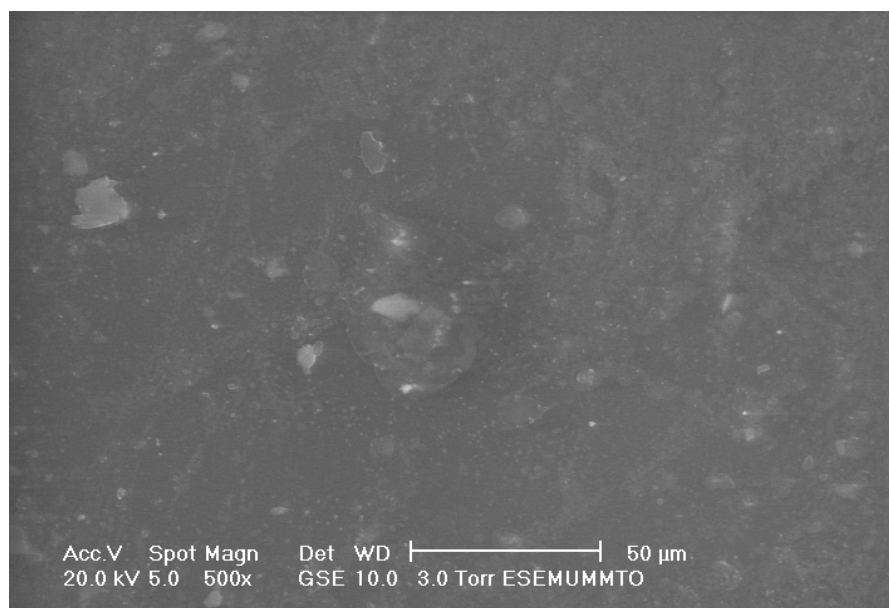


Figure 4.34 : Photo MEB du PS 3 mm exposé durant deux heures à la décharge couronne.

Une grande transformation de l'état de surface des échantillons est observable suite à leur exposition à la décharge couronne.

#### **4.8 Action de la décharge sur une tôle d'acier pour transformateur**

Comme nous l'avons signalé auparavant l'examen des effets sur une surface métallique sont très compliqués. Toutefois nous avons essayé d'appréhender cet effet de façon qualitative dès lors que l'aspect quantitatif n'a pu être mis en relief.

Les expériences que nous avons menées ont porté sur le traitement par décharge couronne négative d'une tôle d'acier pour transformateur ayant la forme d'un carré de 85mm de côté pour une épaisseur de 0.5mm. Les divers temps de décharge sont de 12h, 24h et 48h. Le courant de décharge est de l'ordre 150  $\mu$ A et il est obtenu avec une tension de 35 kV en polarité négative pour une distance inter électrodes de 20 mm. Notons à ce niveau que les courants obtenus avec la tôle sont beaucoup plus intenses que ceux relevés avec les polymères. Cela est lié au fait que l'émissivité et la capture d'électrons est plus aisée avec un métal.

Nous avons, comme pour les matériaux diélectriques, relevé l'évolution temporelle du courant de décharge avec l'échantillon de tôle magnétique. Les résultats de cette expérience sont représentés sur la figure 4.35, la figure 4.36 donnant un agrandissement. Ils montrent une atténuation du courant de décharge indiquant que l'émissivité de la surface a été affectée par la décharge. Ainsi donc un processus d'oxydation accélérée a eu pour résultat d'augmenter la barrière de potentiel du métal. En d'autres termes, une espèce chargée négativement dérivant depuis la pointe vers le plan constitué par l'échantillon a plus de difficultés à se neutraliser. Ceci conduit à une accumulation de charges négatives sur le plan ce qui a pour effet en retour de modifier la structure du champ dans l'intervalle inter-électrodes.

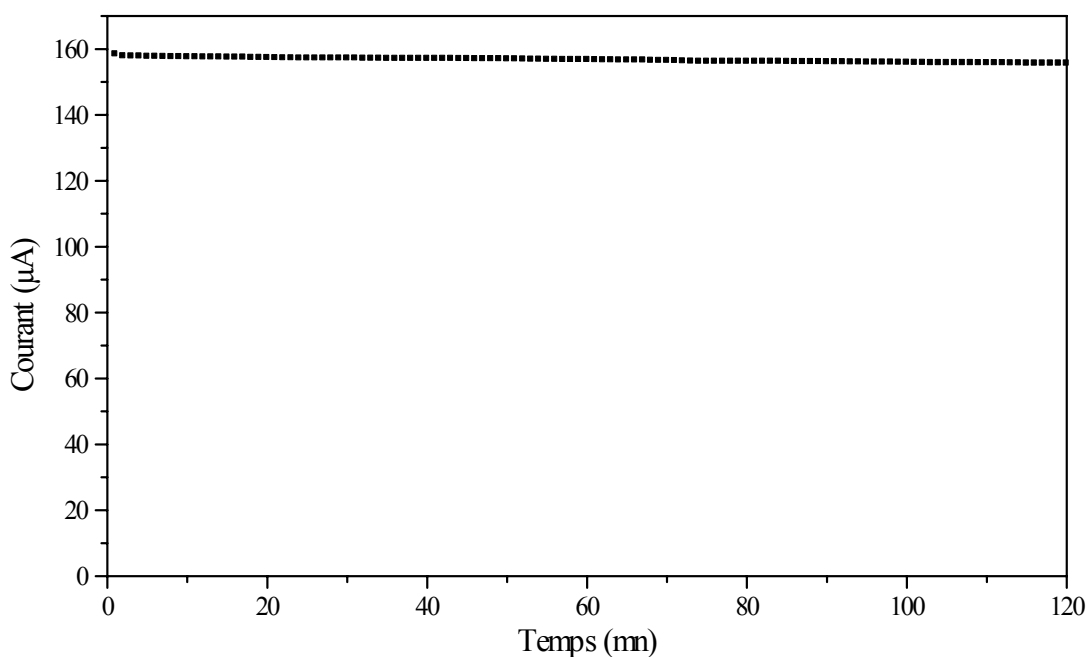


Figure 4.35. Evolution temporelle du courant de décharge pour un échantillon métallique.

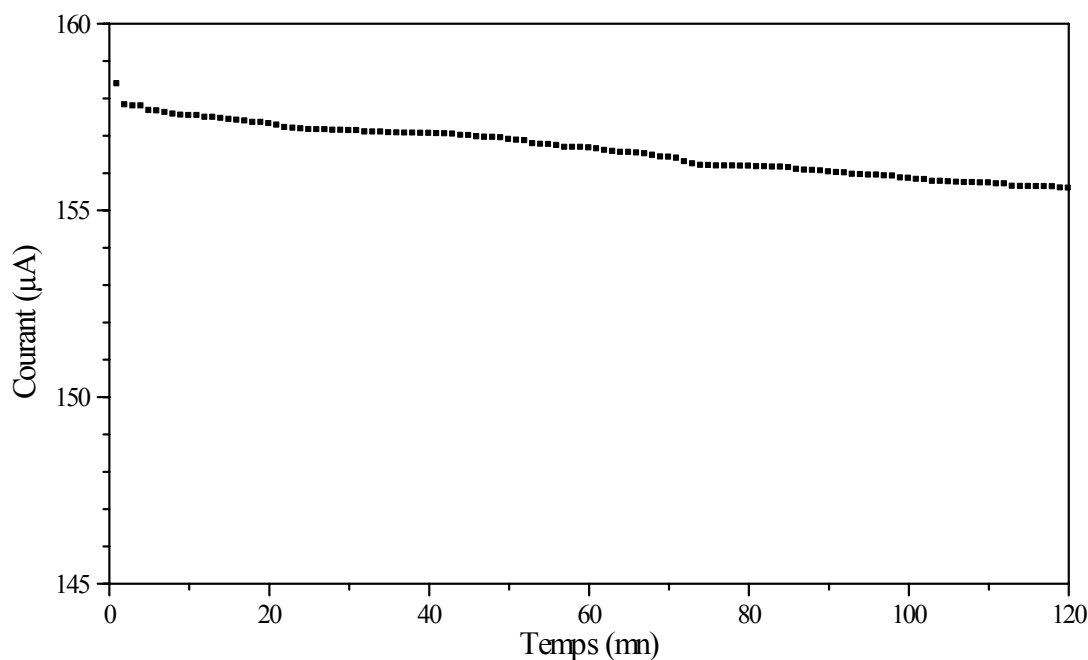


Figure 4.36. Evolution temporelle du courant de décharge pour un échantillon métallique.  
(Agrandissement)

Une expérience intéressante serait de mesurer la résistance de contact de la surface traitée avec des électrodes standard. Ce dispositif n'est actuellement pas disponible dans notre laboratoire. Nous avons tout de même essayé d'adapter un dispositif prévu pour l'approche de résistivités superficielles. Cette notion de résistivité superficielle est difficile à appréhender ce qui nous a poussés à ne pas en parler dans le cas des polymères. Ici nous partons du fait que la résistivité du métal est extrêmement faible et que la variation du courant est liée à la seule résistance de contact. Dans ce cas nous n'obtenons pas la résistance de contact mais nous pouvons apprécier, bien que de façon grossière, ses variations. Les variations sont appréciées à partir de celles des courants. La tension appliquée dans le cas de ces essais est de 30 V et les courbes de courant sont prises sur une durée de 300 secondes. Les résultats sont donnés sur la figure 4.37.

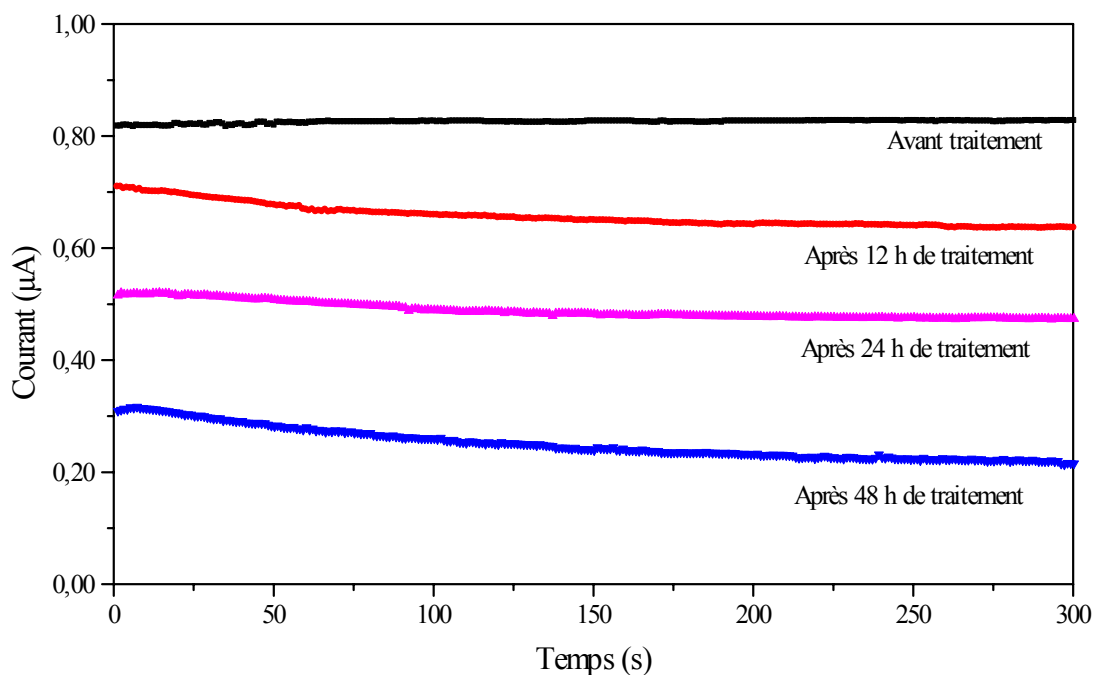


Figure 4.37. Courants de contact sur une plaque d'acier magnétique traitée à l'effet couronne.

Nous remarquons sur cette figure que les valeurs des courants diminuent avec le temps d'exposition à la décharge, cela indique que la résistance de contact a tendance à augmenter sous l'action de la décharge. Nous notons aussi, pour chacune des périodes d'exposition une tendance à la baisse du courant durant les 300 secondes d'examen. Cela pourrait résulter d'un phénomène de polarisation semblable à ceux rencontrés en électrochimie.

## 4.9 Conclusion

Des diverses expériences que nous avons réalisées, il ressort que la décharge couronne de par sa réactivité, agit sur les surfaces environnantes. Les actions de la décharge se répercutent sur le courant de décharge qui peut alors servir d'indice révélateur de l'importance de l'action de la décharge. La morphologie de la surface est également affectée par le plasma généré par la décharge couronne et lorsque l'on a en vue les renforcements de champs au niveau des aspérités, il devient facile de comprendre comment des augmentations de courant peuvent survenir. Les résultats de l'analyse au microscope électronique à balayage indiquent une nette modification des surfaces des polymères étudiés. Les modifications relevées sur les résistivités volumiques montrent que l'action de la décharge semble se répercuter à l'intérieur du matériau et non à sa surface uniquement. Or il est bien connu que la variation de résistivité a une incidence sur le champ électrique c'est-à-dire sur le niveau d'ionisation et en fin de compte sur le comportement général de la décharge. Les effets de la décharge sur les surfaces métallique sont examinés sous le seul angle de l'évolution temporelle des courants d'effet couronne et sur une appréciation de la résistance de contact. En effet les changements de résistivité suite à des phénomènes d'oxydation ou de nitruration influent sur l'intensité du courant de décharge. Aussi une corrélation peut être attendue entre les modifications subies par la surface et les courants de décharge.

A l'issue du présent travail, nous avons pu mettre en évidence l'action de la décharge couronne négative sur les surfaces environnantes. Nos différentes investigations dans la littérature spécialisée nous ont permis de bien comprendre comment les réactions chimiques générées par le plasma froid de la décharge couronne peuvent aboutir à une transformation de la surface environnante. Dans le cas de surfaces métalliques les réactions les plus courantes sont des oxydations ou des nitrurations. Ces réactions ont également lieu avec des diélectriques, surtout lorsque l'on a affaire à des polymères, mais en pareil cas des réactions chimiques beaucoup plus complexes peuvent avoir lieu. Nous pouvons assister à des ruptures de chaînes, à l'apparition de radicaux libres eux-mêmes très réactifs voire dangereux sur le plan sanitaire.

Sur le plan pratique, nous avons essayé tout au long de l'élaboration du présent travail, de reproduire des situations susceptibles d'être rencontrées en électrotechnique. Les résultats auxquels nous sommes parvenus présentent l'intérêt de provenir d'expérimentations pouvant utilement aider les concepteurs de modèles théoriques.

L'exposition d'une surface à un plasma froid donne des effets dont la consistance est liée à la durée de cette exposition. Lorsque cette exposition s'étale sur de longues périodes comptées en années on parlera de vieillissement réel. Comme il est pratiquement impossible de réaliser des expériences portant sur de telles périodes, les praticiens recourent à des vieillissements accélérés par l'application de contraintes très supérieures en intensité aux contraintes de fonctionnement normal. C'est dans cette optique que nous avons soumis nos échantillons à une décharge couronne durant une période de deux heures. Cette période choisie suite à des essais préliminaires nous a permis de mettre en évidence des modifications sur le double plan électrique et morphologique des matériaux. Les trois types d'échantillons utilisés ont montré des phénomènes de dégradation. En effet que ce soit pour le PMMA, le SAN ou le PS une augmentation du courant de la décharge couronne a été relevée durant les deux heures d'exposition. Cette augmentation de courant prouve celle des phénomènes d'ionisation qui sont influencés par la conductivité de la barrière constituée par l'échantillon mais aussi par les éventuels effets de charges superficielles.

Des modifications de résistivités ont été observées en volume. En effet de telles modifications semblent indiquer une altération en profondeur alors que l'on s'attend plus à des actions superficielles. Cela pourrait résulter d'une injection ionique.

Si les résultats provenant du présent travail semblent encourageants, il demeure, néanmoins, incomplets. Ils appellent un complément d'investigations notamment en ce qui concerne les surfaces métalliques avec des analyses de surface plus puissantes à l'exemple de spectroscopie XPS ou Auger.

Dans le cas d'une surface métallique, seule une approche qualitative voire phénoménologique a été faite.

Parmi les perspectives ouvertes par le présent travail, il est utile de citer l'étude de l'effet de la polarité comme il faudrait voir un prolongement de l'étude de décharges en atmosphère contrôlée, ce qui compléterait utilement une approche réalisée à la pression atmosphérique.

- [1] : Eddy. AUBERT «Diagnostic optique du vieillissement électrique des résines époxydes sous faible champ électrique». Thèse de doctorat de l'université TOULOUSE III – Paul Sabatier, novembre 2008.
- [2] : Sarra-Bournet Christian «Fonctionnalisation de surface de polymères par plasma à la pression atmosphérique. Animation de surface et dépôt de couches minces par un procédé de décharge par barrière diélectrique». Thèse de doctorat l'Université Toulouse III - Paul Sabatier, novembre 2009.
- [3] : Nadine Lahoud «Modélisation du vieillissement des isolants organiques sous contrainte électrique application à la fiabilité des matériaux». Thèse de doctorat de l'université TOULOUSE III – Paul Sabatier. Mars 2009.
- [4] : Jérôme JOLIBOIS «Étude et développement d'un actionneur plasma à décharge à barrière diélectrique-Application au contrôle d'écoulement sur profil d'aile». Thèse de doctorat de l'université de Poitier, décembre 2008.
- [5] : Katia. Allégraud «Décharge à Barrière Diélectrique de surface : physique et procédé». Thèse de doctorat, école polytechnique, 2009.
- [6] : Brahim. Benamar «La faisabilité de l'électrofiltration d'une atmosphère chargée en poussières de bois : étude expérimentale et numérique». Thèse de doctorat de l'université, Henri Poincaré, Nancy, le 13 novembre 2008.
- [7]: Yu. S. Akishev, M. E. Grushin, I. V. Kochetov, A. P. Napartovich, M. V. Pan'kin, et N. I. Trushkin «LOW-TEMPERATURE PLASMAS: Transition of a Multipin Negative Corona in Atmospheric Air to a Glow Discharge». Plasma Physics Reports, Vol. 26, N°. 2, pp. 157–163, 2000.

- [8]: A. A. Kudryavtsev, A. V. Morin, and L. D. Tsendin «GAS DISCHARGES, PLASMA: Role of Nonlocal Ionization in Formation of the Short Glow Discharge». ISSN 1063-7842, TECHNICAL PHYSICS. pp. 1029–1040. Vol. 53 N<sup>o</sup>. 8 2008.
- [9] : Ionut Enache «Étude expérimentale et modélisation du transfert de matière dans des décharges de Townsend à pression atmosphérique en mélange HMDSO-N<sub>2</sub>O-N<sub>2</sub> ET SIH<sub>4</sub>-N<sub>2</sub>O-N<sub>2</sub>». Thèse de doctorat de l'université TOULOUSE III – Paul Sabatier, novembre 2007.
- [10] : Jean-Charles MATÉO-VÉLEZ «Modélisation et simulation numérique de la génération de plasma dans les décharges couronnes et de son interaction avec l'aérodynamique». Thèse de doctorat de L'ÉCOLE NATIONALE SUPÉRIEURE DE L'AÉRONAUTIQUE ET DE L'ESPACE. ONERA. Décembre 2006.
- [11] : Rezzouga M, Tilmatine A, Gouri R, Medles K, Dascalescu L «Experimental modiling of high-voltage corona discharge using design of experiments». Front. Electr. Electron. Eng, 2(2): 139-143. China 2007.
- [12] : Issouf. FOFANA «Modélisation de la décharge positive dans les grandes intervalles d'air». Thèse de doctorat, L'école centrale de Lyon novembre 1996.
- [13] : MICHAËL. REDOLFI «Étude de l'oxydation de différents types d'hydrocarbure par des procédés utilisant des techniques de décharges électriques non-thermiques à pression atmosphérique : application à la problématique du démarrage à froid». Thèse de doctorat de l'université Paris XIII, décembre 2007.
- [14] : Juan. Martinez-Vega «Matériaux diélectriques pour le génie électrique». Lavoisier 2007.

[15] : Warne D.F «Génie électrotechnique». Édition 2007.

[16] : M. Aguet et M. Lanoz «Traité d'électricité : Haute Tension», vol XXII 2<sup>ème</sup> édition 2004.

[17] : Robert. Fournié «Diélectriques : bases théoriques». Technique de l'ingénieur D 2 300.

[18] : M.D «Influence du vieillissement thermique sur les propriétés de l'EPDM (éthylène propylène diène monomère». Thèse de magister, UMM T-O 2002.

[19] : Patrick. Abgrall «Micro-technologies polymères pour les laboratoires sur puces». Thèse de doctorat de l'université Toulouse III, février 2006.

[20] : Abdoulaye SEYNI «Propriétés physico-chimiques et d'usage de matériaux composites à charge dégradable produits par co-broyage». Thèse de doctorat de l'université de Toulouse, décembre 2008.

[21]: R. Farhi, C. Morel, G. Chéron «Matières plastiques & adjuvant hygiène et sécurité». INRS, ED638, Octobre 2006.

[22] : Philippe. Robert «Traite d'électricité : Matériaux d'électrotechnique».

[23]: Hans-henning Kansch, Nicole Heymans, Christopher John Plummer Pierre Decroly «Matériaux polymères : propriétés mécaniques et physiques». Traité des matériaux, presses polytechniques et universitaires de Romandes. INSNB 2-88074-415-6, 2001.

[24] : Laure Lalande «Structure et mécanismes de microdéformation de poly (méthyle-méthacrylates) renforcés au choc». Thèse de doctorat ÉCOLE POLYTECHNIQUE FÉDÉRALE DE LAUSANNE Suisse 2007.

[25] : Oudet. C «Polymères-structure et propriétés-introduction». Edition Masson, Paris 1994.

[26] : Sebastien Rubio. Pablo «Principe de conception et calcul de la structure de grands aquariums de formes complexes en méthacrylate».2007-2008.

[27] : Julien Vitiello «Étude de matériau diélectrique à très faible permittivité déposé par voie chimique en phase vapeur développés pour l'isolation des interconnexions cuivre des circuits intégrés pour les générations technologiques 45 nm et 32 nm». Thèse de doctorat université de Lyon décembre 2006.

[28] : Hamoumeche. K «Étude de l'interaction entre une barrière de papier et une décharge couronne en géométrie pointe-plan». Thèse de magister, UMMTO, décembre 2009.

[29] : M. Handala. Mohand-Amokrane «Étude de la décharge de surface sous tension alternative 50 Hz : effet sur une interface isolante air/solide». Thèse de doctorat d'Etat, UMM T.O, décembre 2007.

[30] : Julien. Jarrige «Étude expérimentale des décharges électriques impulsionnelles. Application au traitement des effluents gazeux et à la décontamination de surface». Thèse de doctorat de l'université de Rouen, février 2008.

[31]: Myriam. Hamel, B.SC.A. «Influence de la variation de la température ambiante sur les vibrations induites par effet de couronne». Thèse de doctorat de l'Université du Québec à Chicoutimi, 1991.

[32] : Carl. Potvin «Comportement et effet de la charge d'espace sur les mécanismes des vibrations induites par effet de couronne». Mémoire d'ingénieur de l'université de Québec, mars 2000.

[33] : Alyen. Abahazem «Études expérimentales des décharges couronnes pour la dépollution des gaz». Thèse de doctorat, l'université de Toulouse III – Paul Sabatier Décembre 2009.

[34] : Claude. Gary «Effet couronne sur les réseaux électriques aériens». Techniques de l'ingénieur, D 4.

[35] : Ibrahima. Ndiaye «Initiation et développement des décharges couronnes sur une surface de glace». Mémoire d'ingénieur, université Québec, mai 2003.

[36] : Lê Vinh HOANG «Comparaison des rendements énergétiques de dégradation de trois composés organiques par plusieurs procédés d'oxydation avancés en milieu aqueux». Thèse de doctorat de l'université de Poitiers, avril 2009.

[37] : Stéphan. Eymerie «Etude expérimentale des décharges atmosphériques générées par impulsions nanosecondes : application aux traitements des particules de suie Diesel». Thèse de doctorat de l'université de Rouen, avril 2003.

[38] : F. Bitam-Megherbi «Etude d'une isolation combinée huile/papier isolant : Approche non destructive». Thèse de doctorat d'état en électrotechnique. UMM, T-O, décembre 2007.

[39] : M. Moisan et J. Pelletier «Physique des plasmas collisionnels : application aux décharges hautes fréquences». EDP, sciences 2006.

[40] : Alexandre. Labergue «Etude de décharges électriques dans l'air pour le développement d'actionneur plasma-application au contrôle de décollements d'écoulement ». Thèse de doctorat de l'université de Poitiers, novembre 2005.

[41] : Flavien. Koliatene «Contribution à l'étude de l'existence des décharges dans les systèmes de l'avionique». Thèse de doctorat de l'université de Toulouse III – Paul Sabatier, le 5 janvier 2009.

[42] : DAILL. Guillaume. FOURNAUD. Benoît «Décharges couronne application et modélisation». Énergétique industrielle ESIP 2004/2005.

[43] : M'hand Mkious «Influence du matériau d'électrode sur une décharge couronne». Thèse de magister UMM, TO 2001.

[44] : M<sup>elle</sup> Laure Martin «Dépollution d'effluents chargés en composés organiques volatils cycliques (toluène et bêta-pinène) par décharge couronne à barrière diélectrique. Marquage isotopique et simulation du procédé». Thèse de doctorat université PARIS VI, 4 juillet 2005.

[45] : Axel. VINCENT «Conception et simulation d'un réacteur fil-cylindre à décharge couronne avec barrière diélectrique adapté au traitement des oxydes d'azote dans des effluents marqués par un isotope». Thèse de doctorat de l'université PARIS VI, Pierre et Marie CURIE, décembre 2002.

[46] : Bourek. Yacine «Détermination des conditions d'ionisation caractérisant le seuil de claquage de l'air par la logique floue». Thèse de magister, université de Batna, 2005.

[47] : Zibin. LU «Etude des mécanismes de dégradation de polymères par décharges électriques de type filamentaire». Thèse de doctorat de l'université PARIS VI, décembre 1991.

[48] : Nicolas DUBUS «Contribution à l'étude thermique d'un réacteur à décharge à barrière diélectrique». Thèse de doctorat de l'université de Poitiers, novembre 2009.

[49] : Ziling.LI «Décharge couronne dans l'hélium liquide et gaz dense sous champ électrique intense : près-claquage, transport de charge, spectroscopie d'émission». Thèse de doctorat université Joseph Fourier, mars 2008.

[50] : M. Pascal Ortega «De la décharge de laboratoire à la décharge atmosphérique». Dossier d'habilitation à diriger des recherches. Université de la Polynésie française, aout 2007.

[51] : Rafael Diez Medina «Alimentation de puissance d'une lampe exciplexe à décharge à barrière diélectrique, en vue du contrôle du rayonnement». Thèse de doctorat de l'université Toulouse, octobre 2008.

[52]: Mouatsi. Abdelmalek «Etude de l'effet de l'humidité sur les propriétés électriques de la surface d'un polymère». Thèse de magister de l'université Mentouri de Constantine.

[53] M. Lalmas, K. Hadidi, H. Champain ET A. Goldman «Corona discharges long-term behaviour and delayed spark breakdown in SF<sub>6</sub> under DC voltages». 4<sup>th</sup> Int. Symp. On High Pressure, Low Temperature Plasma Chemistry, pp 189-193, Bratislava 1993.

[54] : Hakim. Yala «Calcul numérique du champ électrique en géométries fil-cylindre et fil-plan lors de la décharge couronne positive dans l'air». Thèse de magister, université, A .Mira de Bedjaia 2001.

[55] : E. Nasser, J. Appl. Phys. pp, 416-426.

[56]: J. Koller, V. Kriha, J. Pichal, L. Aubrecht «Corona discharge light emission et electric field intensity comparison». Czechoslovak Journal of Physics, Vol. 54, 2004.

[57] : Junhong. Chen ET Jane H. Davidson «Model of the Negative DC Corona Plasma: Comparison to the Positive DC Corona Plasma». Plasma Chemistry and Plasma Processing, Vol. 23, No. 1, Mars 2003.

[58] : YA LL B.SC.A «Contribution à l'étude de l'influence des décharges de couronne sur la perte de volume d'une aspérité de glace portée à un potentiel élevé». Thèse pour l'obtention du grade de maîtrise en ressources et systèmes. Université de Québec à Chicoutimi. Avril 1993.

[59]: I. D. Kostyrya and V. F. Tarasenko«Formation of a volume discharge in air at atmospheric pressure upon application of nanosecond high-voltage pulses».Russian Physics Journal, Vol. 47, No. 12, 2004

[60] : Paul-Quentin ELIAS (DAFE) « Interaction plasma-écoulement en régime supersonique : stabilisation d'une instationnarité de choc par une décharge de faible puissance». 5<sup>èmes</sup> Journées des Doctorants MFE/IDF-Nord de l'ONRA, Châtillon janvier 2007.

[61]: Yu. S. Akishev, I. V. Kochetov, A. I. Loboïko, et A. P. Napartovich «LOW-TEMPERATURE PLASMA : Numerical Simulations of Trichel Pulses in a Negative Corona in Air». PLASMA PHYSICS REPORTS Vol. 28. N<sup>o</sup>. 12. pp. 1049–1059. 2002.

[62] : M.P. Panaget « Étude en laboratoire des effets physico-chimique induits par les pertes électriques des lignes de transport à haute tension». Thèse de doctorat de l'université Pierre et Marie Curie 1997.

[63] : C. Gray «Les propriétés diélectriques de l'air et les très hautes tensions», Édition, Eyrolles, Paris 1986.

[64]: Samantha PAVÓN «Interaction Between a surface Dielectric Barrier Discharge and Transonic Airflows». Thèse de doctorat de l'ÉCOLE POLYTECHNIQUE FÉDÉRALE DE LAUSANNE. Octobre 2008.

[65] : Cédric. Noël «Plasma micro-onde d'Argon à la pression atmosphérique : diagnostics et applications au nettoyage des surfaces». Thèse de doctorat d'I.N.P.L. Nancy-université, mai 2009.

[66] : Diane. DUBOIS «Réalisation et caractérisation d'un réacteur plasma de laboratoire pour des études sur la dépollution des gaz d'échappement». Thèse de doctorat de l'université de Toulouse III – Paul Sabatier, septembre 2006.

[67] : Alban Sublet «Caractérisation de décharges à barrières diélectriques atmosphériques et sub-atmosphériques et application à la déposition de couches d'oxyde de silicium». Thèse de doctorat. ÉCOLE POLYTECHNIQUE FÉDÉRALE DE LAUSANNE. Juin 2007.

[68] : Alexandre Valt «Etude de deux procédés de polymérisation d'un précurseur gazeux dans un plasma radiofréquence basse pression et liquide déposé sur un substrat activé par décharge à barrière diélectrique à pression atmosphérique : application aux propriétés antifouling». Thèse de doctorat de l'université de Pierre et Marie Curie, septembre 2008.

[69] : Lagmich. Youssef «Diagnostic et modélisation d'une décharge à barrière diélectrique pour le contrôle d'écoulemen ». Thèse de doctorat de l'université de Toulouse III – Paul Sabatier, novembre 2007.

[70] : Najia. Aggadi «Etude de la réactivité de suies modèles de n- Hexane sous décharge couronne pulsée à pression atmosphérique». Thèse de doctorat de l'université Paris VIII, mars 2006.

[71] : Tarik. Hammi «Etude de méthodes de mesures et réalisation d'un banc de test pour l'évaluation des propriétés électrostatiques des textiles». Thèse de doctorat de l'université des sciences et technologies de Lille, avril 2005.

[72] :Y.N.JAFFRE «Maitrise des décharges couronne dans un gaz en écoulement : vers le traitement des gaz d'échappement». ECL, AMPERE CNRS UMR 5005 –36 avenue Guy de Collongue, 69134 Ecully, France. ICGE'08 Lyon 16-17 décembre 2008.