

**République Algérienne Démocratique et Populaire**

**Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique  
Université Mouloud MAMMERRI, Tizi-Ouzou**



Faculté de Génie Electrique et d'Informatique  
Département d'Électrotechnique

Mémoire de fin d'études

En vue de L'obtention du diplôme Master Académique

Spécialité : Electrotechnique

Option : Machines Electriques

# *Thème*

**Influence de la nature du matériau et de  
la pollution sur la décharge couronne**

Proposé par :

M<sup>r</sup> M.A. HANDALA

Présenté par :

M<sup>r</sup> OUENDI SMAIL

Dirigé par :

M<sup>r</sup> E. BELHITECHE

*Promotion 2013*

## **Remerciements**

*On dit souvent que le trajet est aussi important que la destination. Les cinq années de maîtrise nous ont permis de bien comprendre la signification de cette phrase toute simple.*

*Ce parcours en effet, ne s'est réaliser sans défis et sans soulever de nombreuses questions pour les quelles les réponses nécessitent de longues heures de travail.*

*Je tiens tout d'abord à remercier Dieu le tout puissant et miséricordieux qui ma donné la force et la patience d'accomplir ce modeste travail.*

*Je remercie vivement mes promoteurs M<sup>r</sup>. M.A. HANDALA, Maitre de conférences à l'UMMTO, et M<sup>r</sup>. E.BELHITECHE, doctorant à l'UMMTO pour leurs orientations et leurs conseils tout le long de ce travail.*

*Mon remerciement s'adresse aussi aux membres de jury qui m'ont fais l'honneur en acceptons de juger ce travail.*

*Tous les enseignants du département d'électrotechnique de l'UMMTO qui ont participé à ma formation durant tout mon cycle universitaire ainsi à tous ceux qui ont contribué de près ou de loin à la réalisation de ce travail, trouvent ici l'expression de mon plus profond remerciement.*

# D é d i c a c e s

A u x ê t r e q u i m e s o n t l e s p l u s c h e r s

« M E S P A R E N T S »

P o u r l e u r s A M O U R l e u r E D U C A T I O N e t l e u r s  
S A C R I F I C E S .

A m e s f r è r e s e t s œ u r s , p o u r q u i j e s o u h a i t e l a  
r é u s s i t e d a n s l e u r s p r o j e t s e n a v e n i r .

A m e s t a n t e s , m e s o n c l e s , m e s c o u s i n s , m e s c o u s i n e s .

A m e s c h e r s a m i s ( e s ) .

A t o u t e m a f a m i l l e .

A m e s n i è c e s C é l i n e , I l y a n a , L y n a .

E n f i n t o u t c e u x e t c e l l e s q u i m e s o n t c h e r s ( e s ) .

O U E N D I S M A I L

## Résumé

Grâce à leurs excellentes propriétés électriques, thermiques, et mécaniques, les matériaux polymères trouvent de nombreuses applications touchant pratiquement tous les domaines technologiques. Malgré leurs avantages, ces matériaux présentent au cours du temps des défaillances sous l'effet de la décharge couronne et cela constitue un obstacle pour leur utilisation dans les systèmes électriques. Dans le présent de travail expérimental, nous étudions l'influence des différents paramètres tels que la pollution et la nature du matériau sur la décharge couronne et la dégradation superficielle du PMMA et du PS.

Les essais ont été réalisés dans l'air à pression atmosphérique en utilisant deux types d'électrodes haute tension, sphère et pointe pour la première étude et pour la deuxième on utilise seulement la sphère.

Les résultats expérimentaux montrent que :

La tension d'apparition de l'effet couronne est plus importante pour le PS comparé à celle de PMMA. Les seuils de cette décharge apparaissent rapidement pour de faibles épaisseurs de ces solides isolants.

Dans le cas des isolants pollués, la décharge couronne apparaît à des tensions plus petites comparées à celles obtenues dans le cas des isolants non pollués.

D'après les analyses MEB, les surfaces des polymères se dégradent après vieillissement. Les dégradations constatées sont l'apparition de cratères et de fissures sur la surface de PS et des arborescences pour le PMMA qui se développent à partir des couronnes blanchâtres à la surface de cet échantillon.

**Mots clés :** décharge couronne, arborescence, PMMA, PS, polymères, isolants solides, dégradation, MEB, contrainte électrique.

---

<b>Introduction générale</b> .....	<b>1</b>
<b>Chapitre I : Généralité sur les polymères</b>	
I. 1. Introduction.....	2
I.2. Polymères .....	2
I.2.1. Classification des polymères.....	2
I.2.1.1. Origine des matériaux .....	2
I.2.1.2. Différents types de polymères .....	3
I.2.1.3. La géométrie de la macromolécule.....	6
I.2.1.4. Propriétés thermiques.....	6
I. 3. Polymérisation .....	7
I.3.1. Divers procédés de polymérisation.....	8
I.4. Les caractéristiques des polymères .....	8
I.5. Vieillissement des polymères .....	9
I.5.1. Vieillissement physique.....	9
I.5.1.1. Vieillissement physique avec transfert de masse .....	10
I.5.1.2. Vieillissement physique sans transfert de masse.....	10
I.5.1.3. Influence du vieillissement physique sur les polymères.....	11
I.5.2. Vieillissement chimique .....	11
I.5.2.1. Oxydation.....	11
I.5.2.2. Hydrolyse .....	11
I.5.2.3. Coupure de chaînes statiques .....	12
I.5.2.4. Réticulation .....	12
I.5.2.6. Vieillissement électrique.....	12
I.5.2.7. Vieillissement climatique.....	12
I.6. La rupture diélectrique des polymères .....	13
I.6.1. L'influence de divers paramètres sur la rigidité diélectrique.....	13
I.6.2. Différents mécanismes de claquage .....	13
I.6.2.1. Claquage d'origine électronique.....	13
I.6.2.2. Claquage thermique .....	14

I.6.2.3. Claquage électromécanique.....	14
I.6.3. Rupture diélectrique .....	14
I.6.3.1. Rupture dans les polymères.....	15
I.6.3.2. Rupture à court terme.....	15
I.6.3.3. Rupture à long terme.....	15
I.7. Conclusion.....	15

## **Chapitre II : Présentation des décharges**

I. Introduction .....	16
II.1. Définition d'une décharge électrique.....	16
II.1.1. Décharge électrique dans la nature .....	16
II.2. Les différentes décharges électriques .....	17
II.2.1. Les décharges partielles.....	17
a. Les décharges internes .....	18
b. La décharge couronne .....	18
b.1. Seuil d'apparition de la décharge couronne .....	19
b.2. Les facteurs influençant sur la décharge couronne .....	20
b.3. Conséquence de l'effet de couronne dans l'air à la pression atmosphérique .	22
b.4. Les moyens utilisés pour limiter l'effet couronne .....	23
II.2.2. Les décharges de surface .....	23
II.2.3. Les décharges arborescentes.....	24
II.2.3.1. Les arborescences électrochimiques.....	25
II.2.3.2. Les arborescences électriques .....	25
II.4. Conclusion.....	25

## **Chapitre III : Etude expérimentale**

III.1. Introduction .....	26
III.2. Présentation du laboratoire de la haute tension.....	26
III.3. Présentation des polymères étudiés .....	27
III.3.1. Le poly méthyle-méthacrylate (PMMA).....	27
III.3.2. Le polystyrène (PS).....	28

III.4. Etude de l'influence des différents paramètres sur la décharge couronne.....	30
III.4.1. Dispositif expérimentale .....	30
III.4.2. Résultats expérimentaux et interprétation .....	31
III.5. Etude de la dégradation des polymères soumis à une décharge couronne .....	38
III.5.1. Montage expérimental.....	38
III.5.2. Analyse microscopique.....	39
III.5.2.1. Microscope électronique à balayage (MEB) .....	39
III.5.2.2. Constitution d'un microscope électronique à balayage (MEB).....	39
III.5.2.3. Observation au microscope électronique à balayage (MEB) .....	41
III.6. Conclusion .....	42
<b>Conclusion générale .....</b>	<b>45</b>

Dans le domaine de génie électrique, les matériaux isolants se présentent sous diverses formes (solide, liquides, gazeux) et ont des propriétés variées, ils 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 conduit à faire plusieurs études sur les effets des contraintes électriques sur les isolants particulièrement les polymères, ces matériaux organiques n'ont cessé d'évoluer, depuis leur découverte au début de siècle dernier [1]. Aujourd'hui, grâce à leurs excellentes propriétés électriques, thermiques, et mécaniques, les matériaux polymères trouvent de nombreuses applications touchant pratiquement tous les domaines technologiques (microélectronique, aérospatiale, optique, métallurgie, biomédicale et agroalimentaire) [2]. Parmi les nombreuses familles qui constituent ce type de matériaux on trouve le poly méthyle méthacrylate (PMMA) et le polystyrène (PS) qui feront l'objet de cette étude. Ce sont des polymères thermoplastiques et amorphes, ils se produisent par polymérisation du méthyle pour le PMMA et de styrène pour le PS.

Malgré leurs avantages, ces polymères présentent au cours du temps des défaillances sous l'effet de la décharge couronne et cela constitue un obstacle pour leur utilisation dans les systèmes électriques.

Le travail rapporté dans ce mémoire comporte trois chapitres répartis en deux parties principales. Les deux premiers chapitres constituent la première partie concernant la recherche bibliographique. Le dernier est réservé à la partie expérimentale.

Le premier chapitre est consacré à l'étude bibliographique sur les polymères et les différents phénomènes qui provoquent leurs dégradations tels que le claquage et le vieillissement.

Dans le deuxième chapitre, nous donnerons un aperçu général sur les décharges électriques, en particulier nous intéresserons à l'étude de la décharge couronne.

Le dernier chapitre est réservé à la partie expérimentale du travail. Nous avons étudié l'influence des différents paramètres sur la décharge couronne et de l'effet de cette décharge sur la surface d'un isolant solide (PMMA, PS). Dans ce chapitre nous présenterons les matériaux utilisés, les schémas des montages et les techniques d'analyse physico-chimique (MEB) ainsi les résultats suivis d'une discussion.

Nous terminons notre travail par une conclusion générale.

## I.1. Introduction

Les bio-polymères existent depuis la nuit des temps, mais le terme polymère n'a été introduit dans l'industrie qu'en 1832 [3]. Bien que leur utilisation industrielle soit relativement récents, les polymères ont très vite trouvé leur place et ont envahi notre vie quotidienne.

Il est maintenant difficile de trouver un aspect de notre vie qui ne soit pas affecté par les polymères. Au cours des cinquante dernières années, les outils de synthèse des polymères se sont développés et l'industrie des plastiques est devenue l'une des industries à plus forte croissance dans le monde. De nos jours, la production totale de polymère s'élève à quelques centaines de millions de tonnes par an.

L'utilisation des matériaux polymères nous offre de grands avantages. Par exemple dans le cas d'un câble haut tension, ils sont moins polluants et plus économiques par rapport aux papiers imprégnés et surtout leur principal avantage est leur facilité de production.

## I.2. Polymères

Le polymère, du mot grec polymères (poly : préfixe qui marque plusieurs éléments du type de suffixe qui suit + mère : suffixe qui définit un composé chimique), est un matériau composé de longue chaîne moléculaire appelées macromolécule. Une macromolécule obtenue par la répétition d'une unité constitutive comportant un groupe d'atomes liés par des liaisons covalentes. L'unité constitutive d'un polymère est appelée monomère. Cette réactivité chimique des monomères résulte de la présence sur ceux-ci de groupes fonctionnels capable de former des liaisons chimiques avec les groupes fonctionnels d'autres molécules de monomères. Et les macromolécules sont connectées les unes aux autres par des liaisons faible de type Van der Waals [3].

### I.2.1. Classification des polymères

Cette classification peut se faire selon :

#### I.2.1.1. Origine des matériaux

##### a. Polymères naturels

Leur importance économique dans les mécanismes vitaux leur a assuré une place de première choix, tels que le caoutchouc naturel, le bois et le cuir.

## b. Polymères synthétiques

Ils sont classés selon le procédé (ou réaction de synthèse) :

-Polycondensation :

Elle met en œuvre des réactions de condensation répétées entre monomères avec ou sans élimination de molécules légères.

-Polymérisation et copolymérisation :

Ce sont des réactions en chaînes s'effectuant à partir d'un centre actif pouvant être des radicaux libres ou des ions positifs ou négatifs.

## c. Polymère de transformation

Ils sont obtenus par modification des chaînes macromoléculaires synthétiques déjà existantes dans différentes réactions (topo chimiques, dégradation par voie thermique, rayonnement ionisant) [4].

### I.2.1.2. Différents types de polymères

Il existe deux types de polymères :

-les homopolymères.

-les copolymères.

#### a. Homopolymères

Les homopolymères sont des polymères qui ne possèdent qu'une seule unité (monomères). Si seulement un type de monomère est utilisé, le polymère résultant est appelé un homopolymère [5]. Ce dernier peut présenter trois structures différentes qui sont les suivantes :

##### a.1. polymères linéaires

Les molécules des polymères linéaires sont formées de longues chaînes de monomères reliées les une après autres par des liaisons chimiques comme le montre la figure I.1 :



Figure I.1 : Structure moléculaire d'un polymère linéaire.

### a.2. Polymère ramifié

Dans les polymères ramifiés, les chaînes linéaires de la macromolécule sont liées aux autres molécules semblables branchées latéralement comme le montre la figure I.2 :

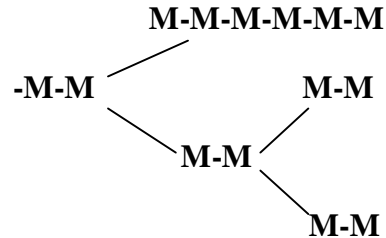


Figure I.2 : Structure moléculaire d'un polymère ramifié [4].

### a.3. Polymère réticulé

Dans les polymères réticulés, plusieurs chaînes sont reliées à des chaînes latérales au niveau des nœuds (figure I.3) [6] :

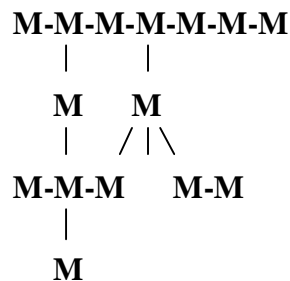


Figure I.3 : Structure moléculaire d'un polymère réticulé.

## b. Copolymères

Les copolymères sont des polymères qui possèdent plusieurs unités. Comme pour les homopolymères, les copolymères peuvent se présenter en plusieurs structures différentes qui sont les suivantes [5] :

### b.1. Copolymères statistiques

Ils sont caractérisés par l'alternance aléatoire des monomères A et B (figure I.4)

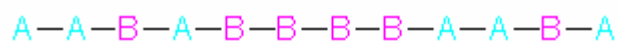


Figure I.4 : Structure moléculaire d'un copolymère statistique.

### b.2. Copolymères alternés

C'est un cas limite du copolymère statistique est le copolymère alterné qui est également un matériau homogène à une phase (figure I.5) :



Figure. I.5 : Structure moléculaire d'un copolymère alterné.

### b.3. Copolymères séquencés

Ce sont des molécules linéaires ou radiales, constituées d'une alternance de longues séquences homogènes (figure I.6).



Figure I.6 : Structure moléculaire d'un copolymère séquencé [7].

### b.4. Copolymères greffés

Les copolymères greffés sont des copolymères dans lesquels les branches ont une structure chimique différente de celle de la chaîne principale (figure I.7) :

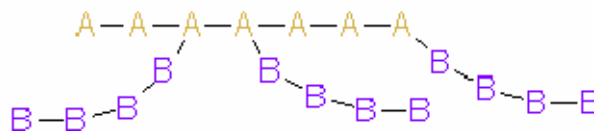


Figure I.7 : Structure moléculaire d'un copolymère greffé.

Parmi ces différents types de polymères, on peut trouver des polymères polaires et d'autres non polaires.

#### -Les polymères polaires

Les polymères polaires sont généralement des matériaux isolants possèdent dans leur molécules en plus du carbone et de l'hydrogène, des atomes généralement électronégatifs tels que : le fluor, le chlore, l'oxygène, l'azote, qui fournissent des dipôles. Ils ont à un degré plus ou moins grand, une permittivité élevée (3,5 à 10) et un indice de pertes élevé de  $10^{-2}$  à 10. Parmi ces polymères on peut citer :

- le poly (chlorure de vinyle) PVC ;
- le poly (fluorure de vinylidène) PVDF ;
- le poly (méthacrylate de méthyle) PMMA ;
- les polycondensats tels que : les polyamides, les polystères.

### **-les polymères apolaires**

Contrairement aux polymères polaires, ces polymères présentent un indice de pertes diélectriques faibles, de l'ordre de  $10^{-4}$  à  $10^{-3}$  et une permittivité quasi constante (2,5 à 3) dans un large domaine de température et de fréquence. Leur formule chimique ne contient que du carbone et de l'hydrogène et s'ils contiennent des atomes électronégatifs tels que le fluor, ces atomes sont placés symétriquement le long de la chaîne carbonée.

Parmi ces polymères on peut citer :

- le polyéthylène PE ;
- le polypropylène PP ;
- le poly (tétrafluoréthylène) PTFE [5].

### **I.2.1.3. La géométrie de la macromolécule**

La géométrie de la macromolécule est caractérisée par l'ordre atomique :

#### **Ø L'ordre atomique**

On distingue selon cette caractérisation plusieurs types :

#### **-polymère amorphe**

Où polymères les atomes sont désordonnés le long de la chaîne du polymère.

#### **-polymère cristallin**

Suite à certaines conditions tel le refroidissement lent après fusion, les polymères peuvent posséder une structure semi ordonnée et donner lieu à une cristallisation partielle.

### **I.2.1.4. Propriétés thermiques**

Les polymères peuvent être divisés en polymères thermoplastiques, polymères thermodurcissables ou polymères élastomères [7].

### **a. Thermoplastiques**

Une matière thermoplastique est une matière qui ne possède pas de liaisons covalentes entre les chaînes, c'est la raison pour laquelle les thermoplastiques se ramollissent au chauffage :

Les liaisons secondaires qui relient les molécules les unes aux autres fondent, et le matériau s'écoule comme un liquide visqueux, ce qui permet sa mise en forme.

La dispersion des masses moléculaires et de l'organisation de la matière fait que les thermoplastiques n'ont pas de point de fusion bien défini.

### **b. Thermodurcissables**

Les polymères thermodurcissables sont fabriqués en mélangeant deux constituants (résine et un durcissant), qui réagissent et durcissent, tantôt à chaud, tantôt à température ambiante. Le polymère qui résulte comporte de nombreuses liaisons covalentes de chaîne à chaîne.

### **c. Elastomères**

Les élastomères sont des polymères à caractère amorphe ou cristallin présentant des propriétés remarquables en élasticité. Un élastomère au repos est constitué de longues chaînes moléculaires repliées sur elles-mêmes. Sous l'action d'une contrainte, les molécules peuvent glisser les unes par rapport aux autres et se déformer. Pour que le matériau de base présente une bonne élasticité il subit une vulcanisation. On introduit dans l'élastomère au cours de la vulcanisation, du soufre, du carbone et différentes agents chimiques [4].

## **I.3. Polymérisation**

La polymérisation est l'association des monomères sous l'action de la chaleur, de la pression, ou de rayons UV ou de amorceur (catalyseur) qui sont les plus souvent des peroxydes. Cette association peut aussi se produire sans intervention extérieure, mais il faut un temps beaucoup plus long (cela explique que la conservation prolongée de certains monomères est difficile) [8].

### I.3.1. Divers procédés de polymérisation

Les différents procédés de polymérisation sont :

#### a. Polymérisation en masse

La polymérisation en masse met en jeu le monomère et un amorceur soluble dans le monomère. Généralement la réaction ne peut avoir lieu que sous des pressions et températures élevées et le polymère obtenu présente une pureté élevée.

#### b. Polymérisation en solution

Dans une polymérisation en solution, le système réactif est constitué du monomère, d'un amorceur soluble dans le monomère et d'un solvant également miscible au monomère. Ce procédé permet d'opérer à des températures plus basses et d'extraire plus efficacement la chaleur de réaction. Comparée à la polymérisation en masse, la polymérisation en solution nécessite une opération supplémentaire : la séparation du polymère et du solvant. Par ailleurs, les impuretés du solvant sont susceptibles de polluer le polymère.

#### c. Polymérisation en émulsion

Elle est caractérisée par le fait que les substances en présence pour la réaction forment deux phases non miscibles. Le polymère se forme soit dans l'une des phases, soit à la surface de séparation des phases.

#### d. Polymérisation par addition

On appelle polymérisation par addition (ou polyaddition) l'assemblage de monomères sans formation d'un produit de réaction.

#### e. Polymérisation par condensation

On parle de polymérisation par condensation ou polycondensation dans le cas où le produit de réaction est formé [4].

### I.4. Les caractéristiques des polymères

#### Ø Rigidité diélectrique

La rigidité diélectrique c'est la valeur maximale du champ électrique que l'on peut appliquer à un isolant sans produire un claquage. On trouve généralement pour les

polymères des valeurs de rigidité diélectrique compris entre : 150 kV/cm et 500 kV/cm. Cette rigidité est influencée par plusieurs paramètres dont les plus importants sont :

- la structure de polymère ;
- le temps d'exposition à la haute tension ;
- la présence de bulles d'air.

### Ø Propriétés électriques superficielles

La résistance à la décharge électrique superficielle est importante dans les applications où une décharge électrique peut endommager le matériau, et en le carbonisant, le rendre conducteur. La résistance superficielle est fortement influencée par l'humidité.

### Ø Résistivité transversale

Elle caractérise le pouvoir isolant du matériau. Pour la majorité des polymères la valeur de la résistivité transversale est supérieure à  $10^{12} \Omega \cdot \text{cm}$  à la température ambiante.

### Ø Propriétés de protection physique et chimique

Ces propriétés englobent les caractéristiques diverses : imperméabilité aux liquides et aux gaz, résistance chimique aux solvants et résistance aux rayons ultraviolets [7].

## I.5. Vieillessement des polymères

Le vieillissement pose des problèmes de plus en plus importants dans l'utilisation grandissante des polymères. Il se traduit au niveau des matériaux par des modifications de structure et par des coupures de chaînes macromoléculaires. On distingue deux types de vieillissement : le vieillissement physique qui est réversible et le vieillissement chimique irréversible.

### I.5.1. Vieillessement physique

Le vieillissement physique (ou relaxation structurale) est un phénomène réversible qui concerne la phase amorphe des polymères. La composition chimique du matériau n'est pas modifiée, le vieillissement physique peut se produire avec ou sans transfert de masse.

### **I.5.1.1. Vieillissement physique avec transfert de masse**

Un solvant peut pénétrer dans le matériau où il peut y avoir plastification accompagnée d'un gonflement ou également, pertes d'adjuvant par extraction ou évaporation. Lorsque le matériau est soumis à des contraintes (mécanique, électrique, etc.).

Le solvant peut provoquer une craquelure : la déformation du polymère se poursuit. Il se développe un phénomène de fissuration.

Avec l'eau il peut exister des gradients de concentration dû à la diffusion, à un gonflement différentiel fibre-polymère pour les matériaux composites ou à un gonflement dû aux hétérogénéités du matériau. Cette pénétration de l'eau dans le matériau contribue à la diminution de la résistance d'isolement.

### **I.5.1.2. Vieillissement physique sans transfert de masse**

Un matériau peut se fissurer sous contraintes en présence d'un composé tensio-actif. Si le matériau est dans un état thermodynamique instable après sa mise en œuvre, il peut en résulter un vieillissement physique interne.

#### **Ø Fissuration sous contrainte en milieu tensio-actif**

En milieu tensio-actif, sous l'action de contraintes mécaniques, des fissurations peuvent se produire dans certains cas comme dans le polyéthylène. Le phénomène de fissuration est lié au développement de forces de tension superficielle à l'interface polymère-liquide, et également à la masse moléculaire du polymère. En effet, une masse moléculaire élevée rend le polymère moins sensible à ce type de fissuration.

#### **Ø Vieillissement par relaxation de volume et d'enthalpie**

Le vieillissement physique se traduit par une augmentation de la capacité du réseau macromoléculaire, autrement dit par une réduction du volume spécifique. Dans les polymères semi-cristallins, certains segments stéréo réguliers (donc capable de cristalliser), qui se trouvaient piégés dans la phase amorphe, vont progressivement diffuser et s'incorporer à des zones-cristallines. Le vieillissement physique se traduit alors par une augmentation du taux de cristallinité (PE, PP).

## Ø Vieillissement par les chocs thermiques

Lors de brusques variations de températures dans un isolant organique, un gradient de température s'instaure dans l'épaisseur du matériau, d'où une dilatation différentielle apparaît. Les chocs thermiques peuvent entraîner des ruptures mécaniques.

### I.5.1.3. Influence du vieillissement physique sur les propriétés du polymère

Le vieillissement physique affecte toutes les propriétés dépendant du volume libre et de la mobilité moléculaire. La masse volumique augmente, le coefficient de dilatation diminue, le facteur de pertes diélectrique diminue, la diffusion des gaz et des liquides diminue. Dans certains cas comme pour le PE les propriétés optiques peuvent également être modifiées.

## I.5.2. Vieillissements chimiques

On appelle vieillissement chimique tout phénomène impliquant une modification chimique du matériau sous l'influence de l'environnement. Dans la pratique, le vieillissement chimique se superpose souvent à un vieillissement physique et les deux phénomènes s'interfèrent. Les isolants peuvent être soumis à différents types de vieillissement chimique.

### I.5.2.1. Oxydation

L'oxydation est une réaction en chaîne amorcée par la rupture d'une liaison en radicaux libres. Elle se traduit par l'accumulation des groupes tels que OH et CO. L'oxydabilité des matériaux dépend de la solubilité et de la vitesse de diffusion de l'oxygène dans le matériau, mais surtout de la quantité, de la qualité et de la répartition de l'antioxydant incorporé.

L'utilisation d'anti oxygènes ou de noir de carbone peut empêcher ou ralentir le phénomène d'oxydation.

### I.5.2.2. Hydrolyse

Sous l'influence de l'humidité ( $\geq 95\%$ ) et de la température (au moins  $100^\circ\text{C}$ ), certains polymères (polyesters, polyuréthanes, etc.) peuvent se dégrader. Ce vieillissement climatique peut dégrader les caractéristiques électriques à la surface d'un isolant et provoquer la formation de cheminements. La réaction d'hydrolyse s'effectue en présence de l'eau.

### **I.5.2.3. Coupure de chaînes statiques**

Les coupures de chaînes statiques se produisent sur des sites distribués de manière aléatoire dans le réseau macromoléculaire. Une grande variété de mécanismes chimiques peut être la cause de coupure statique des chaînes.

Sur le plan de la structure, ces coupures de chaînes provoquent une diminution de la masse moléculaire moyenne dans le cas des polymères linéaires et une diminution du taux de réticulation dans le cas des polymères tridimensionnels. Les coupures de chaînes affectent considérablement les propriétés mécaniques du matériau.

### **I.5.2.4. Réticulation**

Le processus de réticulation est caractérisé par la formation de ponts covalents entre les segments de chaînes voisines, qui réduit la souplesse de l'isolant et son aptitude à l'allongement, ce qui a pour effet de le rendre cassant [8].

### **I.5.2.5. Dépolymérisation**

C'est la réaction inverse de la polymérisation, un cas particulier de la réaction de coupure de chaînes. Elle crée un site actif qui déstabilise la liaison monomère-monomère voisine et entraîne l'élimination séquentielle de molécules de monomère [9].

### **I.5.2.6. Vieillessement électrique**

Si le matériau est soumis à des décharges partielles dont les effets se traduisent par la formation de radicaux libres, ces composés réagissent rapidement avec l'oxygène. Il en suit une dégradation généralisée ou localisée (arborescences électriques) des isolants en présence d'humidité, d'impuretés ioniques sous l'influence de la température. Des réactions électrochimiques peuvent également conduire à une dégradation des propriétés du matériau. Dans certaines circonstances il peut apparaître des arborescences électrochimiques.

### **I.5.2.7. Vieillessement climatique**

Le vieillissement climatique résulte de l'exposition directe des matériaux au rayonnement solaire, aux intempéries et à diverses pollutions (marine, industrielle...etc.) : la température joue également un rôle important, tel que l'oxyde de zinc et l'oxyde de titane, absorbeur UV. Ce vieillissement climatique peut dégrader les caractéristiques électriques et la surface d'un isolant et provoquer la formation de cheminements [8].

## **I.6. La rupture diélectrique des polymères**

### **I.6.1. Influence de divers paramètres sur la rigidité diélectrique**

De nombreux phénomènes sont susceptibles d'altérer un diélectrique au cours du vieillissement provoquant en particulier la diminution de la rigidité diélectrique. La tension appliquée influe en premier suivant sa fréquence et sa forme d'onde. La rigidité diélectrique diminue quand la fréquence augmente, par ailleurs, elle est plus élevée pour les ondes de chocs [10].

### **I.6.2. Différents mécanismes de claquage**

La rupture de l'isolant, ou claquage, peut être due à différents mécanismes tels que claquage d'origine électronique, claquage thermique, claquage électromécanique.

#### **I.6.2.1. Claquage d'origine électronique**

Pour qu'un claquage purement électronique puisse survenir, une condition nécessaire mais non suffisante, c'est qu'il existe des électrons pouvant être accélérés et acquérir ainsi dans le champ une énergie comparable à l'énergie d'ionisation des atomes constitutifs (5 à 10 eV). On distingue le claquage intrinsèque, le claquage par avalanche et celui associé au volume libre [6].

##### **a. Claquage intrinsèque**

Lorsque le champ électrique appliqué à un matériau de telle manière que sa température reste pratiquement inchangée en maintenant ce champ pendant une courte durée et en utilisant des électrodes permettant l'évacuation de la chaleur. On peut assister à un claquage brutal qui n'est pas précédé par une augmentation progressive de la température c'est ce qu'on appelle le claquage intrinsèque [11].

##### **b. Claquage associé au volume libre**

Artbauer est le premier à utiliser la notion de volume libre dans le claquage et ceci en considérant que les électrons peuvent acquérir suffisamment d'énergie avec le champ électrique en traversant le volume libre pour causer la rupture diélectrique [6].

### c. Claquage par avalanche

Lors de la collision ionisante avec un atome du matériau, l'électron incident peut céder, à l'atome assez d'énergie pour l'ioniser sans être piégé. L'atome se charge positivement en libérant un nouvel électron, de sorte qu'on a alors 2 électrons libres qui peuvent acquérir dans le champ assez d'énergie pour provoquer chacun une nouvelle collision ionisante donc 2 électrons et ainsi de suite. Chaque électron libre accéléré produirait une avalanche exponentielle d'ions positifs fixes et un nuage d'électrons libres balayé par le champ. Le claquage par avalanche est caractérisé par seuil de  $10^8$  V/m nécessaire pour que des collisions puissent se produire et le processus qui en découle est rapide [6].

#### I.6.2.2. Claquage thermique

Lorsqu'un courant traverse un matériau isolant, la conductivité augmente avec la température. Par suite la température s'élève, le courant augmente à son tour et ainsi de suite.

Si la chaleur accumulée ne s'évacue pas suffisamment vite, le processus peut conduire à un emballement thermique, c'est ce qu'on appelle le claquage thermique [10].

#### I.6.2.3. Claquage électromécanique

Le claquage électromécanique est provoqué par la pression électrostatique exercée par les électrodes sur l'isolant. Une pression trop importante entraîne une diminution de l'épaisseur de l'isolant et ainsi une augmentation du champ électrique, ce qui amplifie encore l'effet. Si la pression exercée devient supérieure à la résistance à la compression, la rupture intervient. La pression électrostatique étant en  $\epsilon E^2/2$ , des champs de l'ordre du MV/mm seraient nécessaires pour vaincre une résistance à la compression de 100 MPa comme celle de l'époxy à l'état vitreux. De tels niveaux de champs ne seraient envisageables que sur des couches très minces [12].

### I.6.3. Rupture diélectrique

Dire qu'une rupture diélectrique s'est produite dans un échantillon isolant, c'est dire qu'au moins un chemin conducteur s'est établi entre les électrodes. On peut donc considérer le claquage diélectrique comme une percolation induite par le champ appliqué, or le claquage n'est qu'un exemple particulier du phénomène de percolation.

### **I.6.3.1. Rupture dans les polymères**

Contrairement à des isolants gazeux ou liquides la rupture des polymères a bien un caractère irréversible et conduit donc à la mise hors service définitive du système isolé [10].

### **I.6.3.2. Rupture à court terme**

Dès qu'un chemin conducteur est établi entre les électrodes, le courant qui le traverse crée un échauffement menant éventuellement à la formation d'un plasma. C'est la densité du diélectrique qui détermine si les chemins de rupture sont temporaires ou permanents. Sous des champs de 1 à 10 MV/cm, les temps de rupture restent inférieurs à la seconde : c'est la rupture diélectrique à court terme [5].

### **I.6.3.3. Rupture à long terme**

Il est difficile de faire une distinction entre le claquage à court terme et le claquage à long terme. Dans le cas de la rupture à long terme, on parle plutôt de vieillissement électrique du matériau, cette rupture peut être différée dans le temps, de quelques secondes à quelques heures voire quelques années [6].

La rupture se résumant à un transfert d'énergie entre le champ électrique et les porteurs de charge, une théorie de rupture à long terme doit pouvoir expliquer comment sous un champ relativement faible, les porteurs peuvent gagner l'énergie de quelques électronvolts nécessaires à la rupture des liaisons dans isolant. Un modèle a été développé par Jonsher et Locoste qui s'applique aussi bien à la rupture aux temps courts qu'aux temps longs. Le modèle repose sur deux hypothèses qui résultent d'une analyse détaillée des caractéristiques générales de la rupture dans une large gamme de matériaux de structures différentes [5].

## **I.7. Conclusion**

Dans ce chapitre nous avons donné quelques généralités sur les polymères qui sont des isolants solides présentant de bonnes propriétés physico-chimiques qui les rendent plus utilisés dans les domaines de l'industrie. En pratique aucun isolant n'est parfait, c'est pourquoi il est nécessaire de définir certaines propriétés comme la rigidité diélectrique, ainsi que les différents types de vieillissement et les mécanismes de claquage.

## **I. Introduction**

Lorsqu'un milieu isolant est soumis à une tension électrique suffisante, un courant de particules chargées électriquement devient possible par l'ionisation partielle du milieu. On parle de décharge électrique. Ce phénomène est particulièrement intéressant, car bien que rencontré dans l'expérience commune et utilisé dans de nombreuses applications technologiques [13]. La compréhension de ce phénomène dans les grands intervalles d'air présente un grand intérêt du point de vue industriel et de l'environnement. On peut citer parmi les principales raisons, les problématiques relatives à l'isolation et à la protection des réseaux de transport et de distribution de l'énergie électrique ainsi les composants associés [14]. Dans ce chapitre nous étudions les différents types de décharge électrique.

### **II.1. Définition d'une décharge électrique**

On désigne par l'expression décharge électrique, ou simplement décharge, le passage de courant dans un isolant.

#### **II.1.1. Décharge électrique dans la nature**

Deux phénomènes naturels connus mettent en jeu les éléments que nous étudions.

- **La foudre** : lorsque de l'air froid recouvre de l'air chaud, les conditions sont favorables au déclenchement des orages. De violents courants d'air verticaux entraînent l'humidité, les fragments de glace, les grêlons et les gouttelettes d'eau à l'intérieur des nuages. On ne connaît pas encore exactement les mécanismes à l'origine de la tension qui se forme dans les nuages d'orage, mais cette tension est influente sur des dizaines, voire des centaines de kilomètres. Lorsque la tension est suffisante, on peut observer des éclairs entre les nuages et le sol (25% d'entre eux) ou entre les nuages eux-mêmes. Ces arcs ont des vitesses de propagation de l'ordre de 200 km/s. Leur tension est de l'ordre de 100 millions de volts et ils sont parcourus un courant de 30000 Ampères [15]. Ce sont donc des phénomènes développant beaucoup de puissance et très visibles pour l'homme.



Figure II.1 : Foudre (Photo Fédération Française de Montagne et d'Escalade).

- **Aurore polaire** : les aurores polaires apparaissent, vues depuis la Terre, comme des taches ou des bandes de lumière, souvent striées, un peu comme des rideaux lumineux se balançant dans un courant d'air. Elles sont surtout de couleur verte ou rouge. On peut les observer pendant plusieurs dizaines de minutes. On les observe à des latitudes voisines de 70 degrés, c'est à dire en Scandinavie, au Nord de la Sibérie, au Canada, en Alaska, ou - au Sud - aux abords du continent Antarctique. Ces lumières aurorales sont émises à des altitudes comprises entre 80 et 150 kilomètres, dans l'ionosphère. La lumière des aurores provient des collisions entre des particules rapides provenant de la magnétosphère et les atomes et ions de l'ionosphère. Les aurores boréales sont les aurores polaires que l'on observe dans l'hémisphère Nord ; les aurores australes sont observées dans l'hémisphère Sud.



Figure II.2: Aurore boréale (Photo Vincent Génot) [15].

## II.2. Les différentes décharges électriques

### II.2.1. Les décharges partielles

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

Les décharges partielles (DP) sont des décharges électriques qui apparaissent dans les

diélectriques solides, liquides ou gazeux présentant des défauts (cavité, décollement,...) dès qu'une tension suffisante est appliquée. Ces décharges correspondent à une rupture des gaz occlus dans les défauts, et elles sont appelées 'partielles' car elles ne court-circuitent pas l'ensemble de l'isolation [16].

On peut distinguer plusieurs types de décharges partielles auxquelles sont soumis effectivement les matériaux isolants dans les isolations en service.

#### a. Les décharges internes

Les décharges partielles internes se produisent dans les inclusions gazeuses emprisonnées dans la masse d'un isolant solide. Lorsque les isolants sont soumis à une certaine tension alternative à fréquence industrielle, on constate que le champ électrique est plus élevé dans les vacuoles gazeuses que dans l'isolant, alors il peut y avoir des décharges internes dans les vacuoles de gaz qui peuvent provoquer le claquage du matériau. Parmi les facteurs contribuant à l'apparition des décharges internes on a :

- La permittivité relative des isolants solides étant toujours plus élevée que celle des gaz. Par conséquent le champ électrique dans les vacuoles est plus grand que le champ dans les isolants solides.

- La rigidité diélectrique des gaz est nettement plus basse que celle des isolants solides. Les décharges internes apparaissent dans les vacuoles des isolants solides pour des tensions faibles entraînant alors la perforation du diélectrique solide [15].

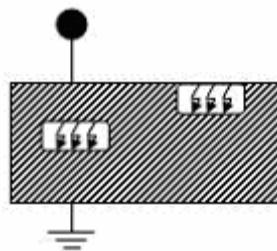


Figure II.3 : Décharge interne

#### b. La 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. 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.

### b.1. Seuil d'apparition de la décharge couronne

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

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

$$E_c = E_0 \delta m_1 m_2 \left( 1 + \frac{0.308}{\sqrt{\delta r}} \right) \quad (\text{II.1})$$

Avec :

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

$r$ : Rayon du conducteur en cm.

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

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

$\delta$  : Densité de l'air.

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

$p$  : Pression au tour du conducteur.

$p_0$  : Pression normale qui est égale à 760 mmHg.

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

$t$  : La température atmosphérique en degrés Celsius.

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 [1].

Pour une configuration pointe-plan, Labergue a établi une expression du champ électrique  $E(x)$  en fonction du potentiel appliqué à la pointe.

$$E(x) = \frac{V}{\left(x + \frac{r}{2}\right) \ln\left(\frac{2d+r}{r}\right)} \quad (\text{II.3})$$

Avec :

$E(x)$  : Champ électrique ( $V \cdot m^{-1}$ ).

$U$  : Tension appliquée à la pointe (V).

$x$  : Distance à la pointe sur l'axe pointe-plan (m).

$r$  : Rayon de courbure de la pointe (m).

$d$  : Distance inter-électrode (m).

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

Le champ critique  $E_0$  d'un conducteur imparfaitement poli s'exprime alors sous la forme [17] :

$$E_0 = m E_c \quad (\text{II.4})$$

## **b.2. Les facteurs influençant sur la décharge couronne**

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

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

### **b.2.1. 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 II.5.

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.

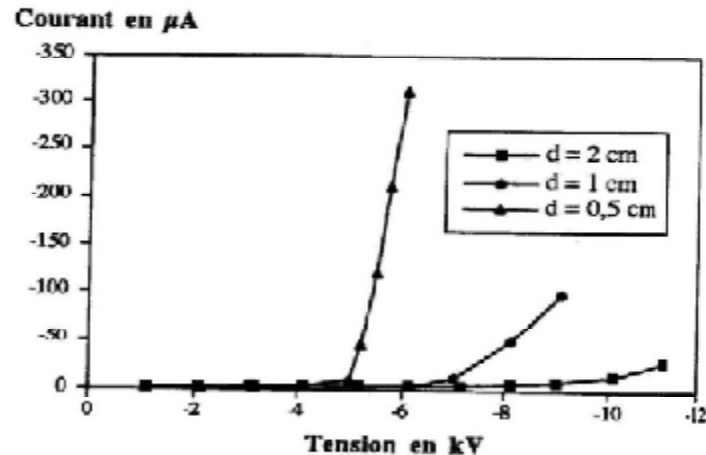


Figure II.5 : Influence de la distance inter-électrodes sur le courant de la décharge couronne [1].

## b.2.2. 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 [1].

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

Pour les systèmes d'électrodes à champ non uniforme, l'humidité a une grande influence sur la tension de décharge [14].

Quand le taux d'humidité  $H$  augmente, la tension de décharge augmente. En effet, les molécules de vapeur d'eau s'attachent aux électrons libres et freinent ainsi le développement de la décharge.

La tension de décharge est proportionnelle à la densité de l'air.

Des facteurs de correction doivent être appliqués :

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

$$K_d = \left(\frac{p}{p_0}\right)^m \left(\frac{t_0+273}{t+273}\right)^n \quad (\text{II.5})$$

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

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

$p$  : La pression atmosphérique en mbar.

t : La température atmosphérique en degrés Celsius.

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

$$k_h = k^w \quad (\text{II.6})$$

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

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

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

$$Ud_n = Ud \frac{k_h}{k_d} \quad (\text{II.7})$$

### 3. La pression

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

#### b.2.3. Facteurs électriques

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

Les différents modes d'émission de charges qui ont été décrits en tension alternative sont observés également en tension continue, la seule différence est que l'effet couronne en tension alternative implique que la concentration des émissions de charges correspond à la crête de la sinusoïde du courant, tandis qu'en continu l'émission de charges est permanente [1].

### b.3. Conséquences de l'effet de couronne dans l'air à la pression atmosphérique

#### 1. Pertes

Dans une décharge couronne, une grande partie de l'énergie électrique est perdue dans les collisions entre les molécules neutres du gaz. Ainsi les pertes dépendent principalement de la quantité de charge produite. De plus elles sont fortement influencées par l'état de surface du conducteur et par les conditions climatiques. En effet, la valeur moyenne annuelle des pertes par effet de couronne est relativement faible soit de l'ordre de quelques kW/cm.

Mais par mauvais temps on peut atteindre une valeur maximum de pertes par effet de couronne plus de vingt fois plus grande que la valeur moyenne. Ces augmentations ont une influence sur la livraison d'énergie surtout pendant les périodes de pointe. Pour ces raisons les concepteurs de ligne déterminent le diamètre et le nombre de conducteurs par phase en considérant le champ critique d'apparition de l'effet de couronne et de l'intensité de précipitation.

## 2. Interférences radio télévision

La décharge couronne est à l'origine des parasites ou interférences radio télévision qui peuvent être captées par les antennes des récepteurs qui se trouvent proches des lignes de transport d'énergie (moins de 100 m). Outre l'effet de couronne, les étincelles ou les petits arcs électriques sont également responsables de perturbations.

## 3. Bruit audible

L'effet de couronne est à l'origine d'une onde sonore produite par une variation locale de la pression qui se propage dans l'air environnant. La principale source de bruit audible provient des gouttes suspendues ou des gouttes passant à proximité des conducteurs. Il a été observé aussi que le givre est un générateur de bruit audible. De plus, en présence de la vibration induite par effet de couronne sous pluie, les bruits irréguliers sont parfois modulés à la fréquence de vibration mécanique des conducteurs.

## 4. Vibrations mécaniques

Lors de la pluie et en présence d'un champ électrique, les conducteurs des lignes de transport d'énergie électrique se mettent à vibrer à la fréquence naturelle de la portée. Ce type de vibration est associé à la décharge par effet de couronne des gouttes d'eau suspendues en-dessous des conducteurs [18].

### b.4. Les moyens utilisés pour limiter l'effet couronne

Pour limiter l'effet couronne on utilise des conducteurs creux ou en faisceaux comme on utilise des câbles avec un noyau en acier [14].

### II.2.2. Les décharges de surface

La décharge électrique de surface, désigne une décharge qui se produit en contact avec la surface d'un diélectrique solide placée dans un gaz ou un liquide isolant [16]. On peut distinguer deux catégories de décharges se produisant à la surface d'un solide isolant :

- Les décharges à barrière diélectrique (DBD) (figure II.1) où les isolants gazeux et solide sont généralement en série entre les deux électrodes, la décharge se développe d'abord dans le volume du gaz avant qu'elle se propage sur la surface du solide [17].

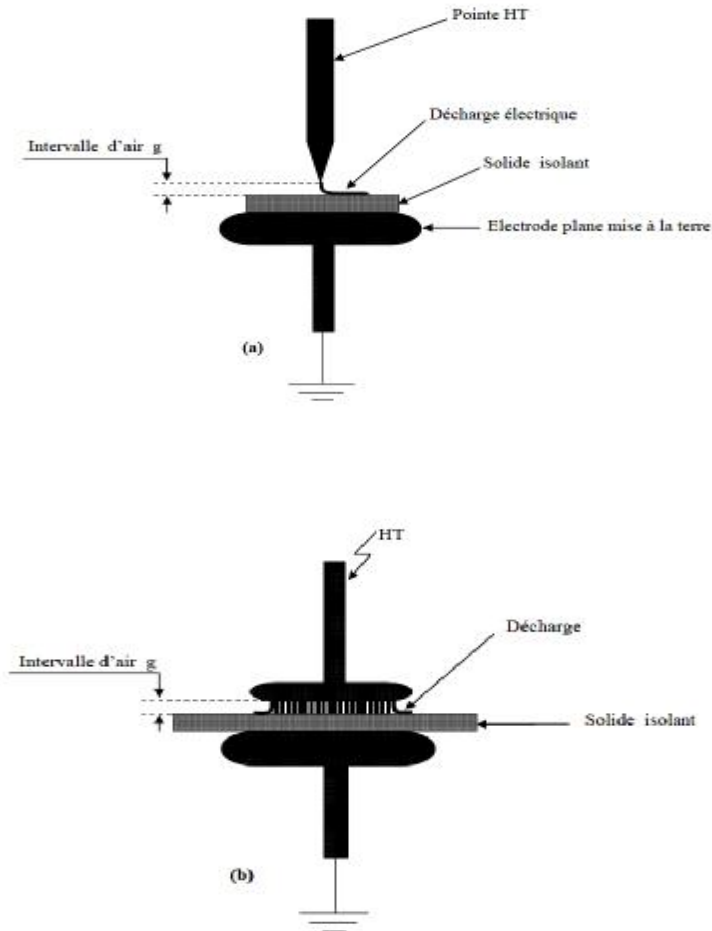


Figure II.1 : Décharges à barrière diélectriques

- a) Système pointe-plan
- b) Système plan-plan

- les décharges glissantes (figure II.2) où les deux électrodes sont en contact avec la surface du diélectrique solide. La décharge électrique prend naissance et se développe dans le gaz en restant en contact avec la surface du solide isolant sur laquelle elle se propage [17].

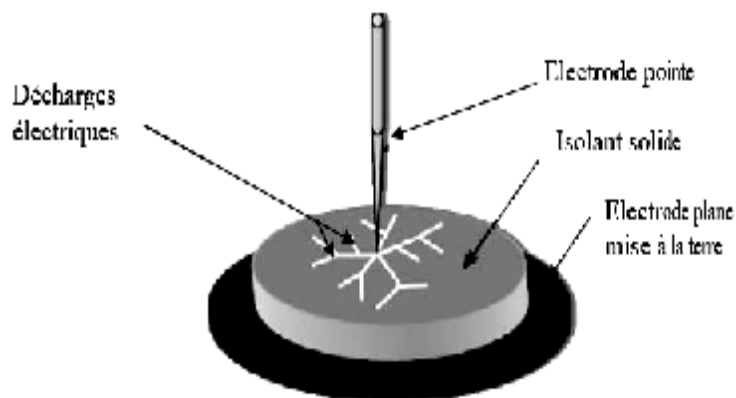


Figure II.2 : Système à décharges glissantes

### **II.2.3. Les décharges arborescentes**

Les isolants solides utilisés en haute tension, ne sont pas parfaits, ils contiennent toujours des impuretés et des défauts microscopiques, ces défauts sont à l'origine de la distorsion et la concentration locale du champ électrique qui conduit à la formation des canaux appelées « arborescences ».

L'arborescence est un phénomène de dégradation d'un isolant, il se manifeste par des formations rappelant une forme d'arbre.

Ces arborescences sont en relation avec :

- les caractéristiques du matériau isolant ;
- la mise en oeuvre de l'isolation et des protections.

On distingue deux types d'arborescences :

- les arborescences électrochimiques ;
- les arborescences électriques.

#### **II.2.3.1. Les arborescences électrochimiques**

Les arborescences croissent au cours du temps provoquant un claquage dès que leur taille est suffisante. La présence d'humidité dans certains polymères semble favoriser l'apparition de ce type d'arborescences. La présence simultanée de l'eau et d'un champ électrique intense provoque l'apparition d'arborescences d'eau qui a tendance à suivre les lignes du champ électrique.

#### **II.2.3.2. Les arborescences électriques**

Les arborescences électriques sont des structures filamenteuses constituées de micro canaux creux susceptibles de se propager sur des distances de plusieurs millimètres en volume de l'isolant. Elles constituent une dégradation permanente des matériaux et sont étroitement associées au claquage. Elles ont pour origine des défauts dans l'isolation, (vacuoles, particules organiques ou minérales) [19].

### **II.4. Conclusion**

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

### III.1. Introduction

Les polymères isolants tels que le PMMA et le PS disposent d'atouts importants par rapport aux isolants classiques grâce à leurs propriétés mécaniques meilleures, leur facilité de mise en œuvre, d'être légers et avoir une mouillabilité très faible. Malgré cela ces polymères présentent l'inconvénient d'être plus vulnérables à l'action des décharges de surface qui provoquent leur dégradation. Une décharge qui se produit à la surface du polymère constitue un facteur de vieillissement responsable de la destruction de l'isolation dont les processus physico-chimiques ne sont pas encore bien connus [20].

Dans la première partie de ce chapitre, on va étudier la décharge couronne et les différents paramètres influençant sur elle, dans la seconde partie on va étudier la dégradation des isolants solides PMMA, PS sous l'effet de cette décharge, en utilisant pour les différentes analyses le microscope électronique à balayage (MEB).

### III.2. Présentation du laboratoire de la haute tension

Le laboratoire de la haute tension (figure III.1) comprend une plate-forme d'essais délimitée par une cage en grillage mise à la terre, appelée « cage de Faraday », à l'intérieur est placé un transformateur d'essai de tension secondaire variable de 0 à 100 kV.

Le pupitre de commande se trouve à l'extérieur de la cage et comprend les appareils de la commande, de protection, de mesure ainsi qu'un autotransformateur alimentant le primaire de transformateur de haute tension par une tension variable de 0 à 400 V.



Figure III.1 : Laboratoire de la haute tension

### III.3. Présentation des polymères étudiés

Nous avons mené notre étude sur deux polymères qui sont le poly méthyle-méthacrylate (PMMA), le polystyrène (PS). Ces polymères sont largement utilisés dans l'industrie du génie électrique en tant qu'isolant grâce à leurs excellentes caractéristiques diélectriques et mécaniques ainsi qu'à la facilité de leurs recyclages. Les principales applications de ces polymères sont données par le tableau II.1.

Notre choix pour ces deux polymères est dicté par le fait que peu d'informations sont disponibles concernant leurs comportements sous contrainte électrique. Ces polymères sont des thermoplastiques ayant des caractéristiques thermomécaniques différentes. En effet, le PMMA est un polymère amorphe et polaire. En revanche, le PS est un polymère amorphe et non polaire.

Polymères	Applications
PMMA	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Fibres optiques</li> <li>- Panneaux solaires</li> <li>- Appareillage électrique et électronique</li> <li>- Nano composites</li> </ul>
PS	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Condensateurs de puissance et pour filtres</li> </ul>

Tableau III.1 : Principales applications des polymères choisis.

#### III.3.1. Le poly méthyle-méthacrylate (PMMA)

##### III.3.1.1. Synthèse

Le PMMA est un thermoplastique linéaire amorphe dont le monomère est le méthacrylate de méthyle (MMA). Il est essentiellement produit par polymérisation radicalaire du méthyle comme le montre la figure III.2.

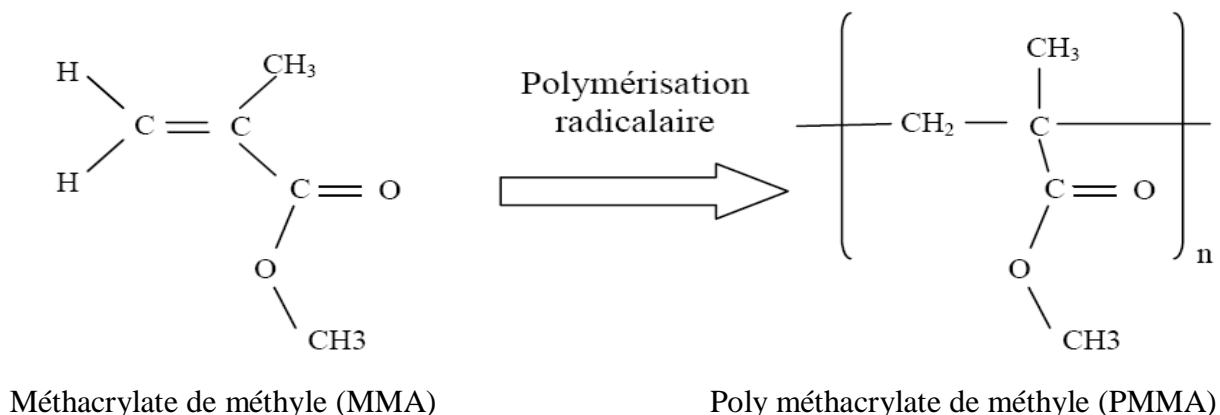


Figure III.2 : Synthèse du PMMA

### III.3.1.2. Caractéristiques du PMMA

La température de transition vitreuse ( $T_g$ ) du PMMA pur est de 85,5 °C, mais peut atteindre 129,2 °C avec un ajout de dopant.

Les caractéristiques électriques du PMMA sont données par le tableau III.2.

Permittivité relative	50 ou 60 Hz	3.0 à 4.0
	1 kHz	3.0 à 3.5
	1 MHz	2.7 à 3.2
Angle de pertes tg	50 ou 60 Hz	$4 \cdot 10^{-2}$ à $5 \cdot 10^{-2}$
	1 kHz	$3 \cdot 10^{-2}$ à $5 \cdot 10^{-2}$
	1 MHz	$2 \cdot 10^{-2}$ à $3 \cdot 10^{-2}$
Rigidité diélectrique	15 à 20 kV/mm	
Résistivité superficielle	$10^{15}$ à $10^{16} \Omega$	
Résistivité transversale	$10^{15}$ à $10^{16} \Omega \cdot \text{cm}$	

Tableau III.2 : Caractéristiques électriques du PMMA.

### III.3.2. Le polystyrène (PS)

#### III.3.2.1. Synthèse

Le polystyrène est un composé aromatique thermoplastique et amorphe. Son monomère est le styrène qui est le monomère principal des polymères styréniques. Le styrène se présente comme une molécule d'éthylène dans laquelle un atome d'hydrogène est remplacé par un anneau benzénique comme le montre la figure III.3.

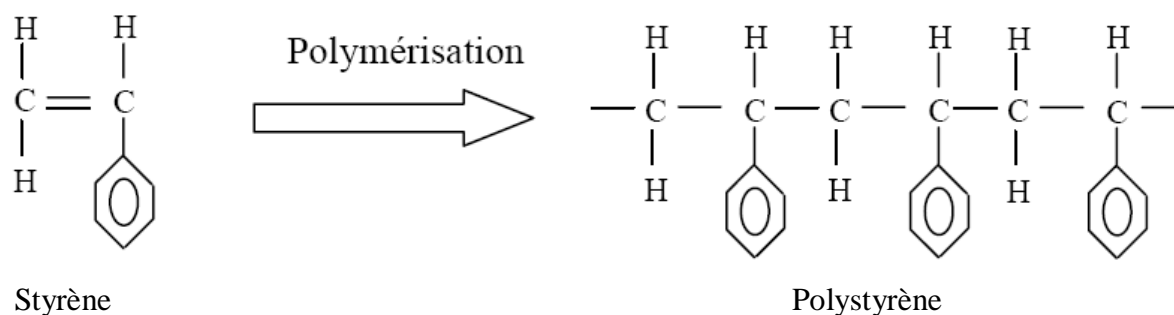


Figure III.3 : Synthèse du polystyrène

La molécule du styrène est obtenue par déshydratation de la molécule d'éthylbenzène obtenue par la combinaison d'éthylène avec le benzène.

La polymérisation radicalaire du styrène seul donne une homopolaire, le polystyrène standard cristal, produit amorphe, transparent et cassant.

Des modifications du PS par copolymérisation peuvent améliorer ou apporter des propriétés particulières telles que la résistance aux chocs et une meilleure tenue thermique.

Bien qu'elle présente une grande dissymétrie à cause des anneaux benzéniques, la molécule du PS est non polaire. Ceci est dû au fait que les moments dipolaires permanents, orientés aléatoirement, sont incapables de s'aligner sous l'effet d'un champ extérieur.

Le PS est très utilisé dans la fabrication des condensateurs grâce à ses bonnes caractéristiques diélectriques (faible conductivité et faible angle de pertes) et sa thermo-rétractabilité (étirage à chaud).

### III.3.2.2. Caractéristiques du PS

Le PS a été commercialisé pour la première fois en 1930. Il présente plusieurs propriétés remarquables : dureté, rigidité et transparence ; toutefois, sa fragilité et sa basse température de ramollissement (85 °C) limitent ses usages.

Les principales caractéristiques du PS sont données par le tableau III.4.

		PS cristal	PS choc
Permittivité relative $\epsilon_r$	50 ou 60 Hz	2.4 à 2.6	2.4 à 4.7
	1 kHz	2.4 à 2.6	2.4 à 4.5
	1 MHz	2.4 à 2.6	2.4 à 3.8
Angle de pertes $\text{tg}\delta$	50 ou 60 Hz	$1 \cdot 10^{-4}$ à $5 \cdot 10^{-4}$	$4 \cdot 10^{-4}$ à $2 \cdot 10^{-3}$
	1 kHz	$1 \cdot 10^{-4}$ à $5 \cdot 10^{-4}$	$4 \cdot 10^{-4}$ à $2 \cdot 10^{-3}$
	1 MHz	$4 \cdot 10^{-4}$ à $1 \cdot 10^{-3}$	$4 \cdot 10^{-4}$ à $2 \cdot 10^{-3}$
Rigidité diélectrique		15 à 20 kV/mm	
Résistivité superficielle		$10^{15}$ à $10^{16} \Omega$	
Résistivité transversale		$10^{17} \Omega \cdot \text{cm}$	$10^{16}$ à $10^{17} \Omega \cdot \text{cm}$
Température de fusion		150 à 170 °C	
Température de transition vitreuse $\text{tg}$		80 °C	
Température de ramollissement		70 à 105 °C	
Température de début de dégradation		350 °C	
Absorption d'eau %		0.4 à 0.7	0.4 à 0.7

Tableau III.4 : Caractéristiques du PS [21].

### III.4. Etude de l'influence des différents paramètres sur la décharge couronne

#### III.4.1. Dispositif expérimental

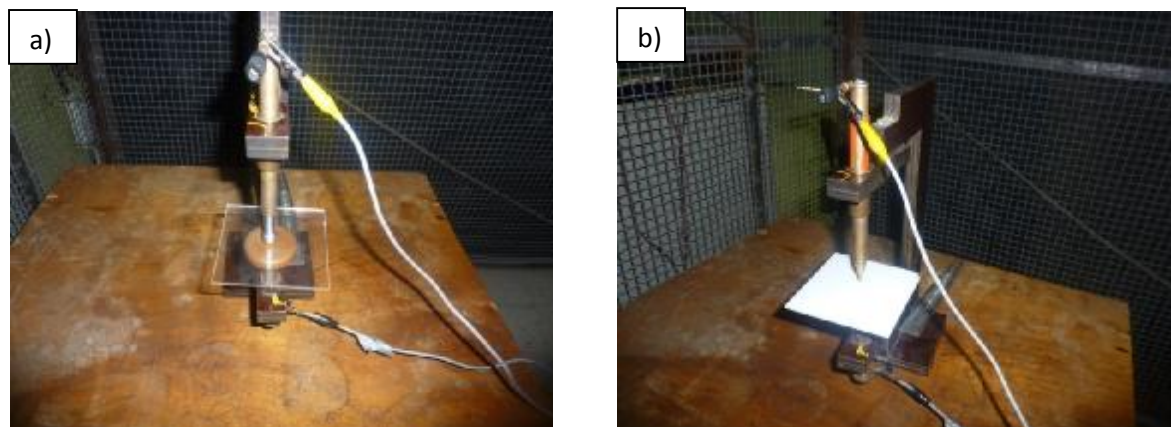
Les essais électriques ont été effectués au laboratoire de haute tension. Le schéma du dispositif expérimental que nous avons utilisé est montré dans la figure III.4. L'alimentation haute tension est assurée par un transformateur d'essai monophasée 100 kV, 10 kVA, 50 Hz, la variation de la tension se fait à l'aide d'un autotransformateur qui se trouve au niveau du pupitre de commande.

Les décharges couronne sont obtenues à l'aide de deux systèmes d'électrodes, pointe-plan et l'autre sphère-plan. L'électrode sphère (ou pointe) est reliée à la borne haute tension du transformateur d'essai, et l'électrode plane sur laquelle est posé le solide isolant est mise à la terre. L'ensemble est placé dans l'air à pression atmosphérique.

L'électrode haute tension pour le système pointe-plan est un cylindre de 3mm de diamètre qui se termine par une pointe de 0,3 mm de rayon de courbure, par contre pour le système sphère-plan on utilise une électrode sphère de rayon de 6mm.

Dans nos essais, nous avons utilisé des échantillons de PMMA d'épaisseur de 3 mm et du PS d'épaisseur de 0,5 mm, 1,5 mm et 3 mm. Ces échantillons de deux isolants solides sont de forme d'un carrée (10 cm × 10 cm).

Avant de procéder aux essais, chaque échantillon est bien nettoyé à l'éthanol puis séché dans le but de réduire les poussières et les impuretés fixées sur la surface.



Système d'électrodes : a) sphères-plan, b) pointe-plan

Figure III.4 : Dispositif expérimental

### III.4.2. Résultats expérimentaux et interprétation

#### III.4.2.1. Effet couronne

Les figures III.5 et III.6 représentent la tension d'apparition de l'effet couronne en fonction de l'épaisseur de l'intervalle d'air pour deux plaques d'isolants solides, une de PMMA et l'autre de PS de même épaisseur 3 mm avec le système sphère-plan.

On constate que la tension de l'effet couronne mesurée et celle calculée augmentent avec l'augmentation de l'épaisseur de l'intervalle d'air (g).

La courbe de la tension d'effet couronne mesurée et celle calculée ont la même forme et les deux sont presque identiques, la courbe mesurée se situe en dessus de la courbe calculée, ce la est dû aux erreurs de mesures et aux conditions de l'essai qui sont différentes de celles de peek, qui sont prises dans des conditions spécifiés.

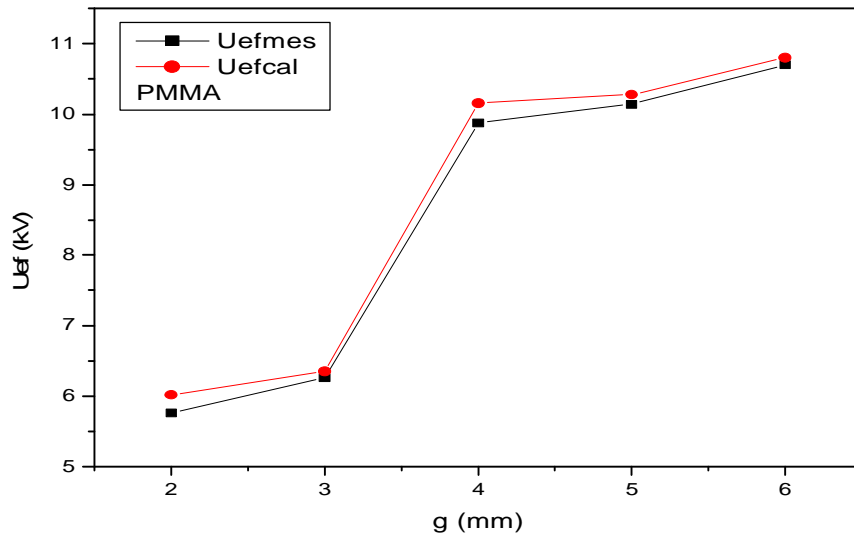


Figure III.5 : Tension d'apparition de l'effet couronne en fonction d'épaisseur de l'intervalle d'air pour une plaque de PMMA de 3 mm d'épaisseur : sphère-plan.

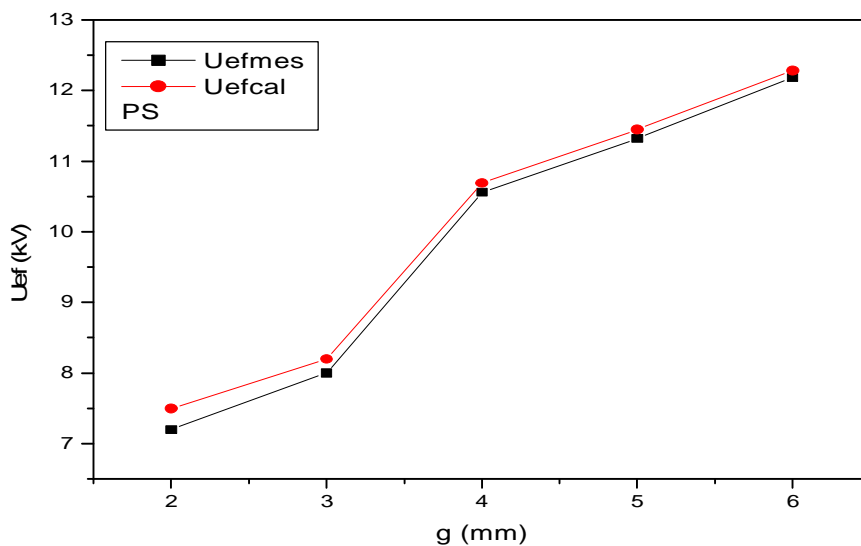


Figure III.6 : Tension d'apparition de l'effet couronne en fonction d'épaisseur de l'intervalle d'air pour une plaque de PS de 3 mm d'épaisseur : sphère-plan.

### III.4.2.2. Influence de l'épaisseur d'isolant solide sur la décharge couronne

Les figures III.7 et III.8 montrent clairement que pour les deux systèmes d'électrodes sphère-plan et pointe-plan, plus l'épaisseur de l'isolant solide (PS) est grande, plus la tension d'apparition de l'effet couronne est plus intense.

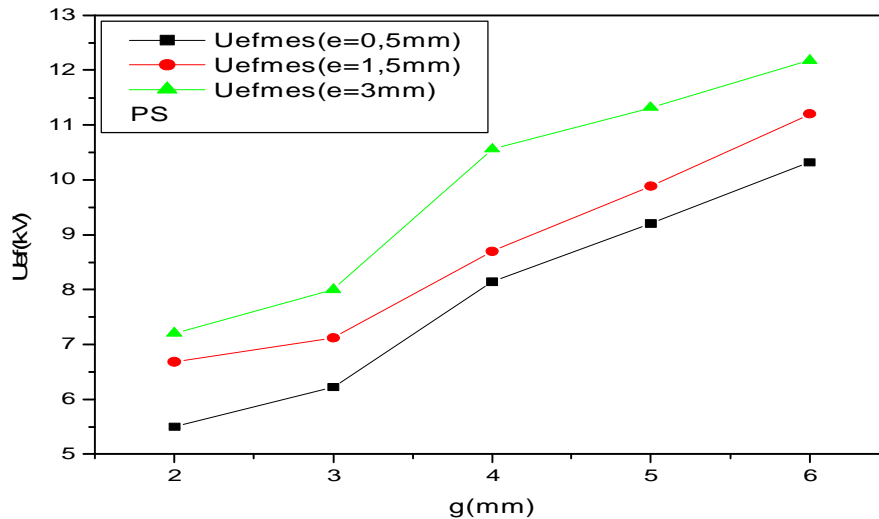


Figure III.7 : Tension d'apparition de l'effet couronne en fonction d'épaisseur de l'intervalle d'air pour les différentes épaisseurs de PS : sphère-plan.

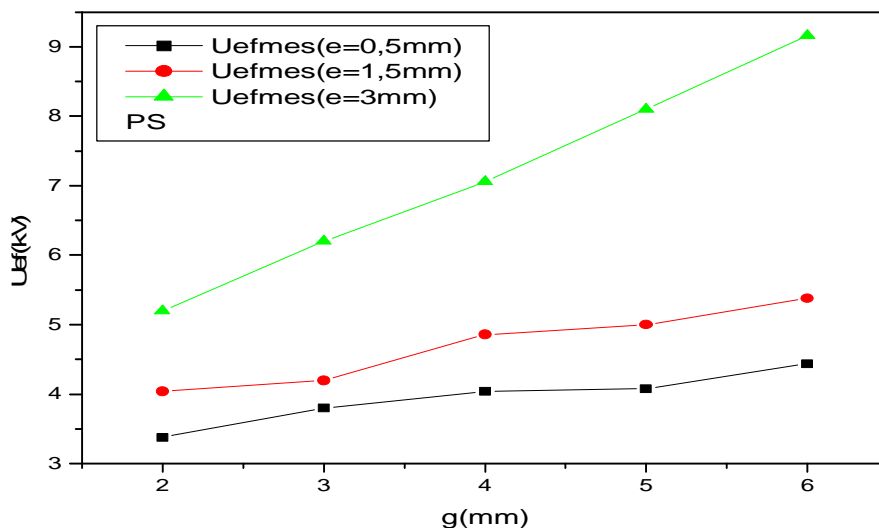


Figure III.8 : Tension d'apparition de l'effet couronne en fonction d'épaisseur de l'intervalle d'air pour les différentes épaisseurs de PS : pointe-plan.

### III.4.2.3. Influence de type d'isolant solide utilisé sur la décharge couronne

La tension d'apparition de l'effet couronne est plus importante pour le PS comparativement à celle de PMMA avec les deux systèmes d'électrodes, cela est dû à la différence qui existe entre leurs caractéristiques électriques et thermiques. (Figures III.9 et III.10).

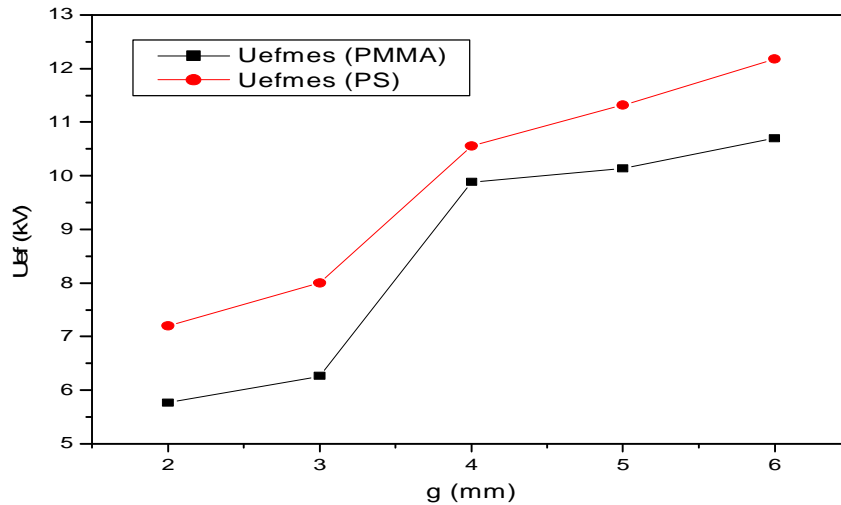


Figure III.9 : Tension d'apparition de l'effet couronne en fonction d'épaisseur de l'intervalle d'air pour les différents isolants solides : sphère-plan.

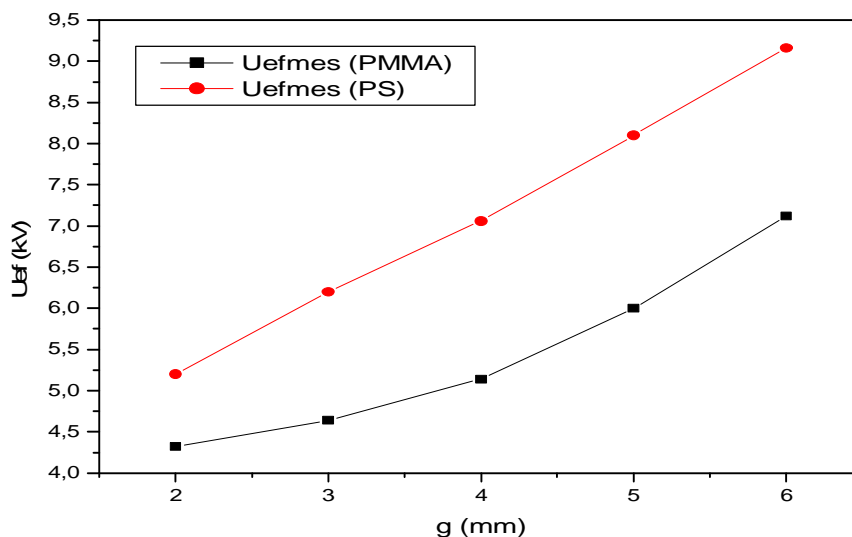


Figure III.10 : Tension d'apparition de l'effet couronne en fonction d'épaisseur de l'intervalle d'air pour les différents isolants solides : pointe-plan.

#### III.4.2.4. Influence de la géométrie des électrodes sur la décharge couronne

Il apparaît clairement pour les deux isolants solides PS et le PMMA que la tension d'apparition de l'effet couronne est plus intense en configuration sphère-plan qu'en pointe-plan, ce qui pourrait s'expliquer par le fait que le champ électrique est important au voisinage de la pointe part rapport à celui de la sphère. (Figures III.11 et III.12).

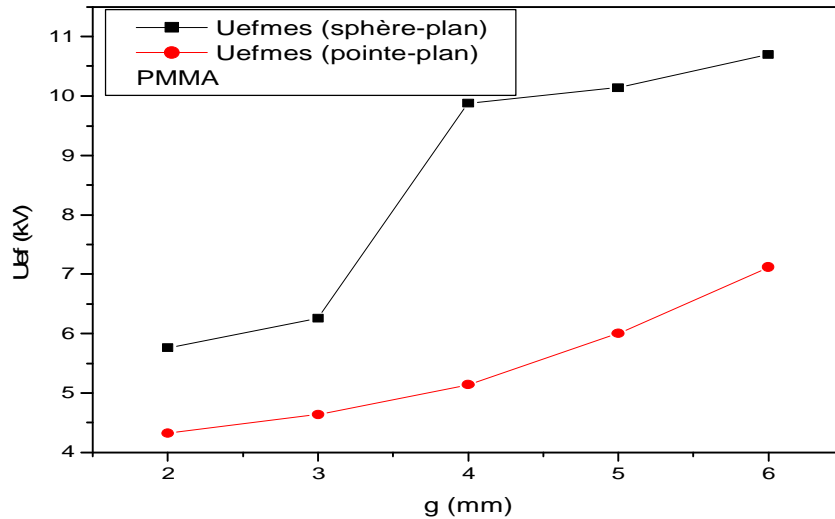


Figure III.11 : Tension d'apparition de l'effet couronne en fonction d'épaisseur de l'intervalle d'air pour une plaque de PMMA de 3mm d'épaisseur.

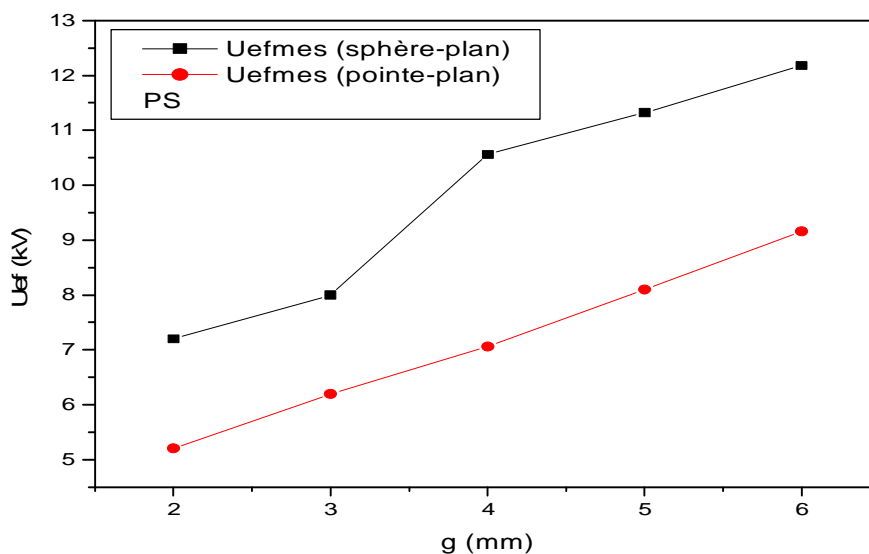


Figure III.12 : Tension d'apparition de l'effet couronne en fonction d'épaisseur de l'intervalle d'air pour une plaque de PS de 3mm d'épaisseur.

#### III.4.2.5. Influence de la pollution sur la décharge couronne

Les figures III.13 et III.14 montrent que dans le cas des isolants solides pollués la tension d'effet couronne apparaît rapidement, ce n'est pas le cas pour les isolants solides non pollués. Donc on peut dire que les surfaces polluées favorisent l'apparition de la décharge couronne.

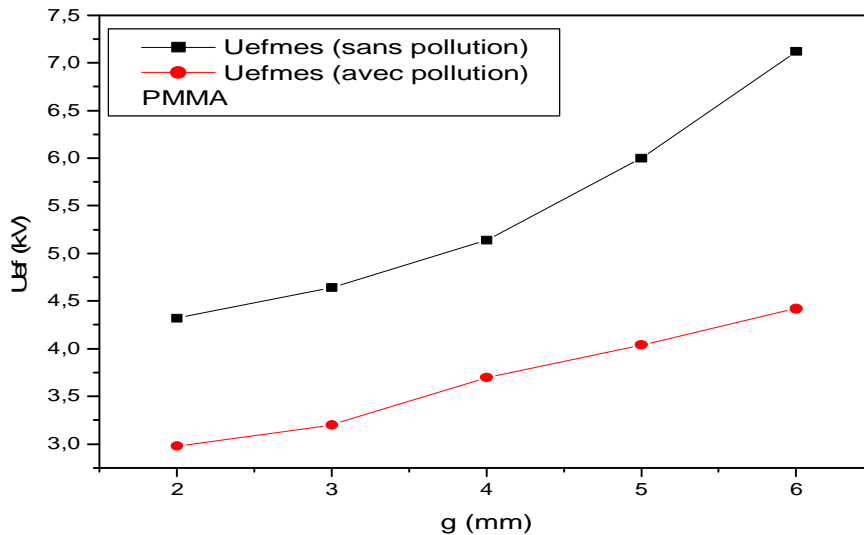


Figure III.13 : L'influence de la pollution dans le cas de PMMA sur la décharge couronne :  
pointe-plan.

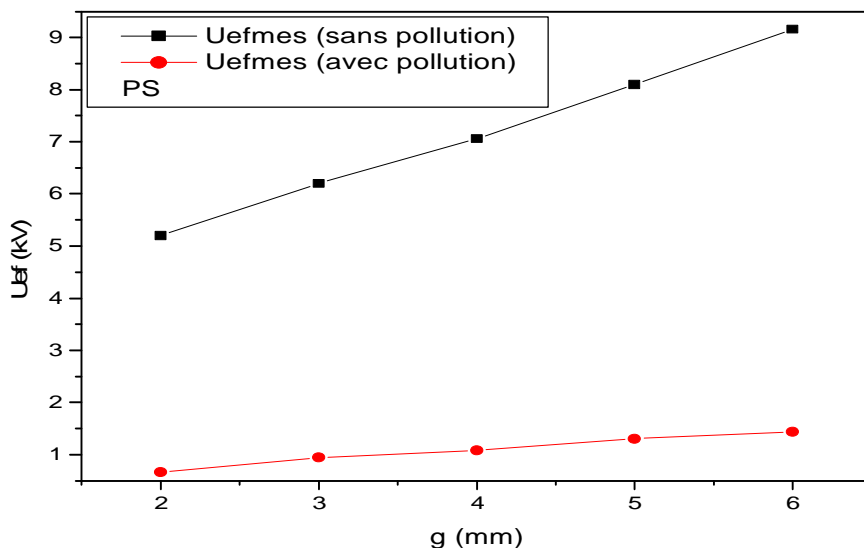


Figure III.14 : L'influence de la pollution dans le cas de PS sur la décharge couronne :  
pointe-plan.

#### III.4.2.6. Champ électrique

La figure III.15 représente le champ électrique en fonction de l'épaisseur de l'intervalle d'air pour les différents isolants solides avec le système pointe-plan.

On constate que les deux champs électriques pour les différents isolants solides tels que le PS et le PMMA diminuent avec l'augmentation de l'épaisseur de l'intervalle d'air ( $g$ ) et qu'ils ont la même allure qui se rapprochent d'une parabole. On peut dire que le champ électrique est loin d'être uniforme, il est maximum au voisinage de l'électrode sous tension.

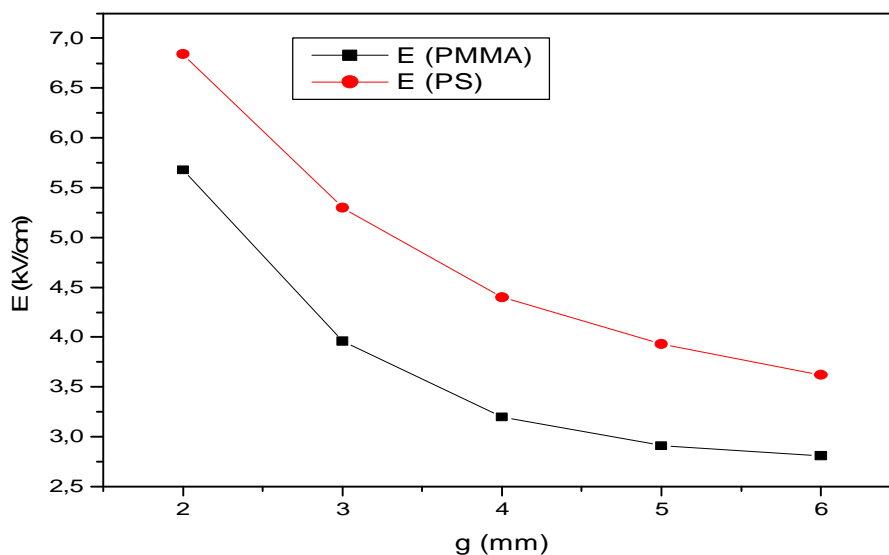


Figure III.15 : Champ électrique en fonction de l'épaisseur de l'intervalle d'air pour les différents isolants solides : pointe-plan.

#### III.4.2.7. Claquage électrique

Les figures III.16 et III.17 représentent la tension de claquage en fonction de la distance inter-électrode avec les deux systèmes sphère-plan et pointe-plan.

On remarque que les valeurs de la tension de claquage mesurée presque les mêmes que celles corrigée, les deux courbes se rapprochent d'une droite qui monte avec l'augmentation de la distance inter-électrode.

Pour la configuration pointe-plan, les valeurs de la tension de claquage sont inférieures aux valeurs trouvées pour le système sphère-plan.

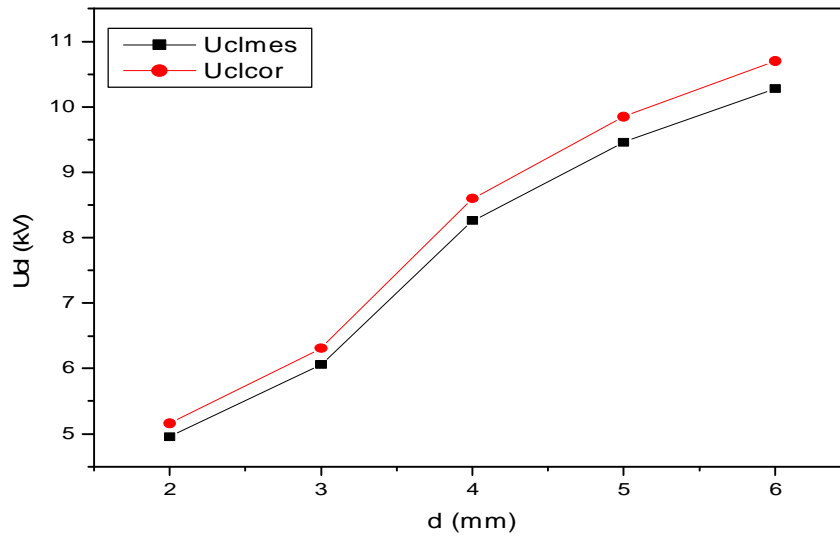


Figure III.16 : Tension d'apparition de claquage électrique en fonction de la distance inter-électrode : sphère-plan.

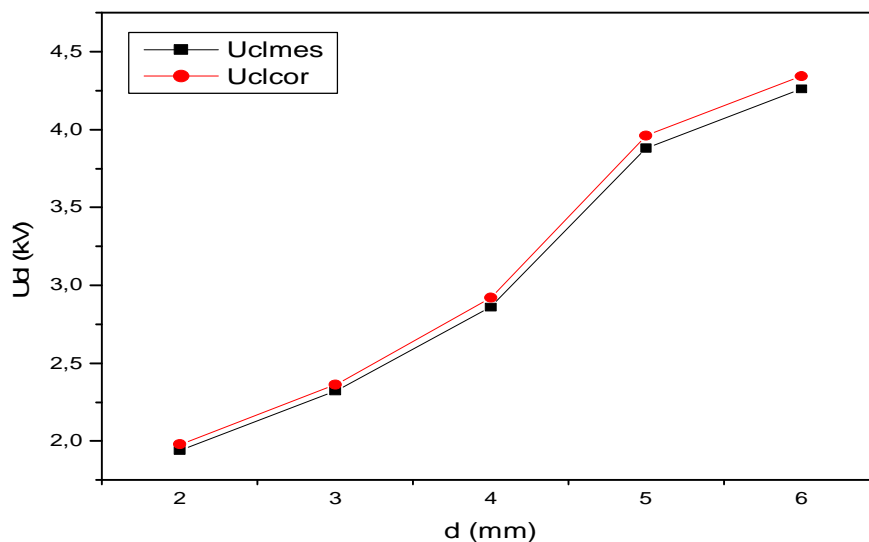


Figure III.17 : Tension d'apparition de claquage électrique en fonction de la distance inter-électrode : pointe-plan.

### III.5. Etude de la dégradation des polymères soumis à une décharge couronne

#### III.5.1. Montage expérimental

Le schéma du dispositif expérimental que nous avons utilisé est montré dans la figure III.18.

L'alimentation haute tension est assurée par un transformatriceur d'essai monophasé 100 kV, 10 kVA, 50 Hz.

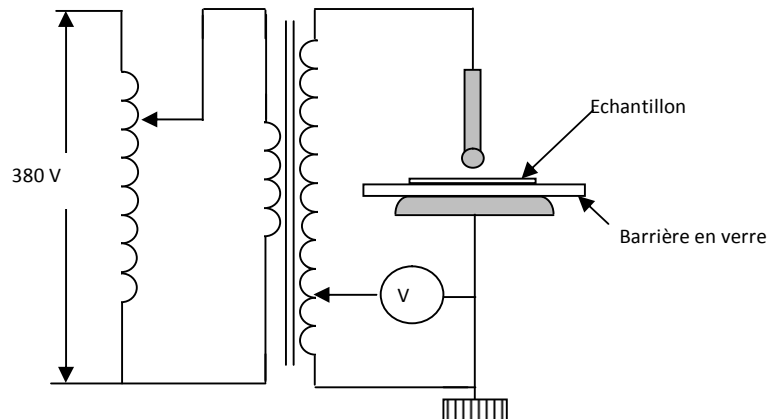


Figure III.18 : Dispositif expérimental

Dans nos essais, nous avons utilisé un échantillon de PMMA et un autre de PS en forme de disque de 3 mm d'épaisseur. Pour les soumettre à la contrainte électrique, nous avons placé l'échantillon de PMMA et de PS sur un disque de verre d'épaisseur 5mm. Ce disque constitue une barrière diélectrique dont le rôle est d'éviter le passage à l'arc de la décharge électrique entre les deux électrodes. On applique une tension de 12 kV à l'électrode haute tension en forme de sphère de 6 mm de rayon, l'électrode plane étant mise à la terre. L'échantillon de PMMA (PS), placé en série avec un intervalle d'air de 4 mm, est ainsi soumis à des décharges couronne dans un système sphère-plan.

### III.5.2. Analyse microscopique

#### III.5.2.1. Microscope électronique à balayage (MEB)

Le microscope électronique à balayage MEB ou SEM (Scanning Electron Microscopy) est basé sur le principe de l'interaction électrons avec la matière. Il permet d'obtenir des images de la surface des échantillons avec une grande résolution et de fournir rapidement des informations sur la morphologie et la composition chimique d'un objet solide.

#### III.5.2.2. Constitution d'un microscope électronique à balayage (MEB)

La figure III.19 montre les différentes parties constitutives du MEB et qui sont :

- ü Une colonne maintenue sous vide ;
- ü Une source d'électrons ;
- ü Un dispositif haute tension pour l'accélération des électrons ;
- ü Un ensemble de lentilles électroniques pour former le pinceau fin et intense ;

- ü Un condenseur final (objectif) et un diaphragme de petit diamètre qui permet de focaliser le pinceau fin sur la surface à examiner ;
- ü Un dispositif de réflexion piloté par un générateur de balayage ;
- ü Un platine porte objet mobile ;
- ü Un détecteur d'électrons et un dispositif d'amplification du signal rapide et à faible bruit ;
- ü Un système de visualisation d'image ;
- ü Un détecteur d'électrons rétro diffusés et d'un détecteur de rayons X ;

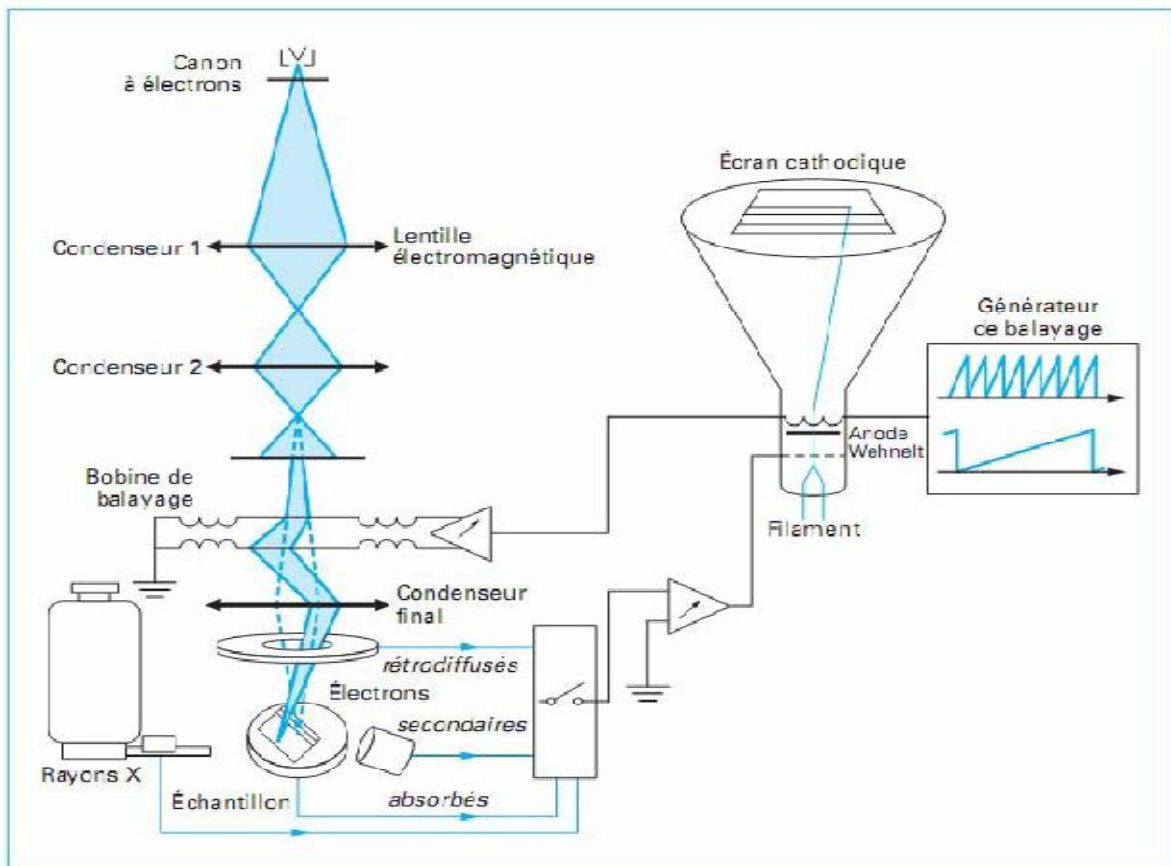


Figure III.19 : Schéma de principe d'un microscope électronique à balayage (MEB).

Dans notre étude nous avons utilisé le microscope électronique à balayage environnemental (ESEM) représenté par la figure III.19, dans cet appareil l'échantillon reste à la pression atmosphérique. Il permet d'analyser les surfaces isolantes sans qu'elles soient métallisées. Les tensions d'accélération du faisceau électronique peuvent varier de 0,2 à 30kV selon la profondeur d'analyse désirée.

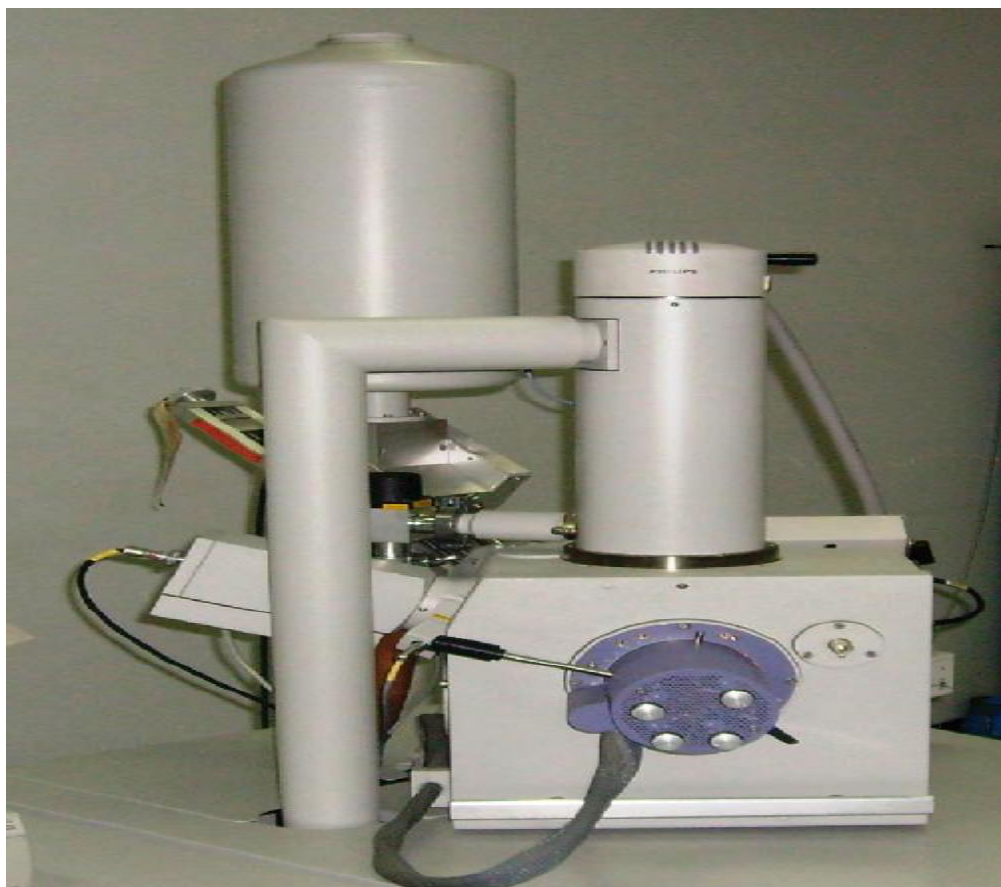
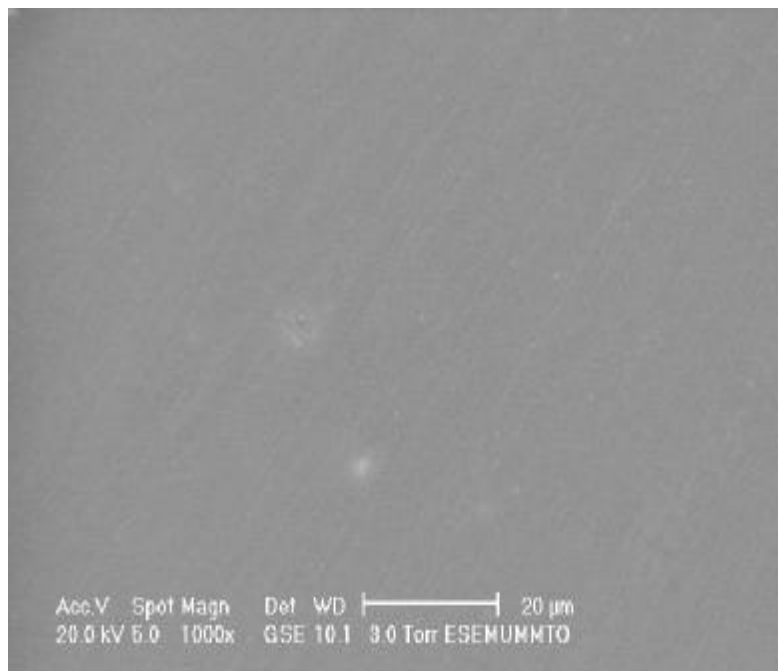


Figure III.20 : Photographie du microscope électronique balayage ESEM XL 30 Philips [21].

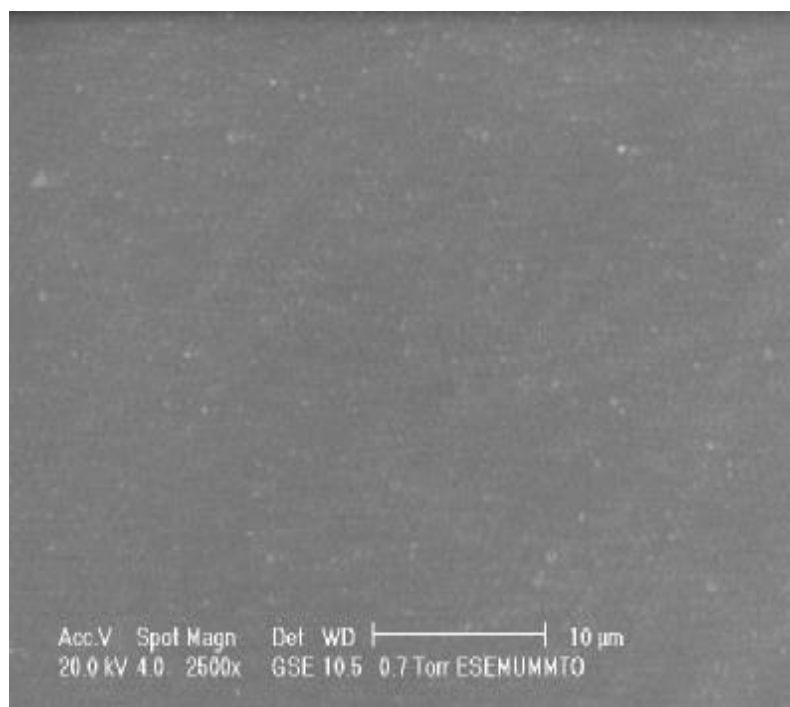
### III.5.2.3. Observation au microscope électronique à balayage (MEB)

Les micrographies d'échantillons de PMMA, PS sont représentés par la figure III.21, avec un agrandissement variant de 150x à 2500x. Les échantillons vierges présentent une surface lisse, homogène exempte de toute dégradation. Pour les échantillons soumis aux décharges couronne sous une tension de 12 kV durant 6h, nous pouvons observer la topographie des zones ayant subi des dégradations qui se traduit par l'apparition de cratères de quelques  $\mu\text{m}$  de diamètre pour le PS et des arborescences pour le PMMA qui se développent à partir des couronnes blanchâtres à la surface de cet échantillon. On explique la forme de ces arborescences par le fait qu'après avoir traversé l'intervalle d'air, chaque décharge en effluve constituerait un prolongement de l'électrode haute tension qui se pose telle une pointe sur l'échantillon de PMMA à la surface du quel se développent les arborescences.

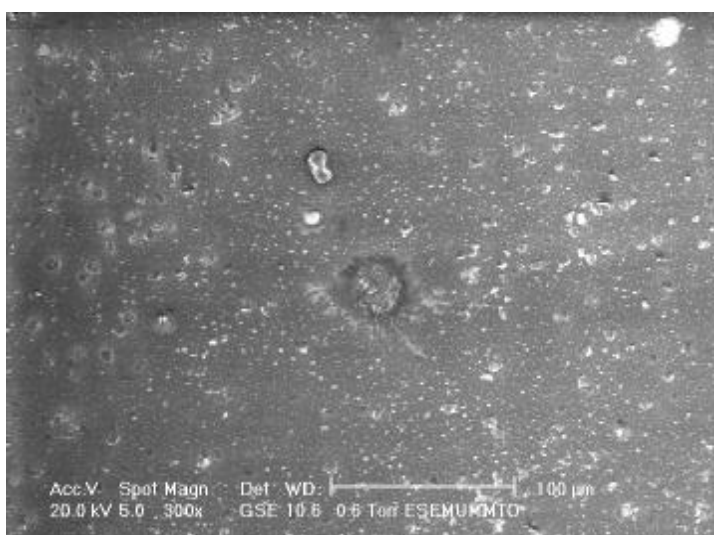
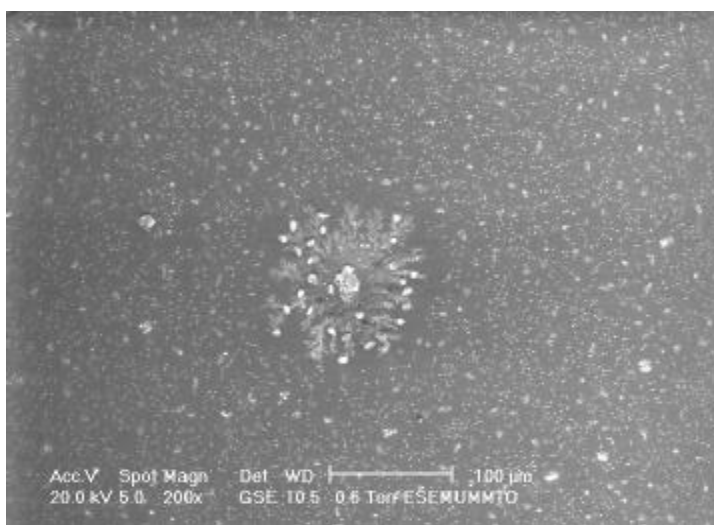
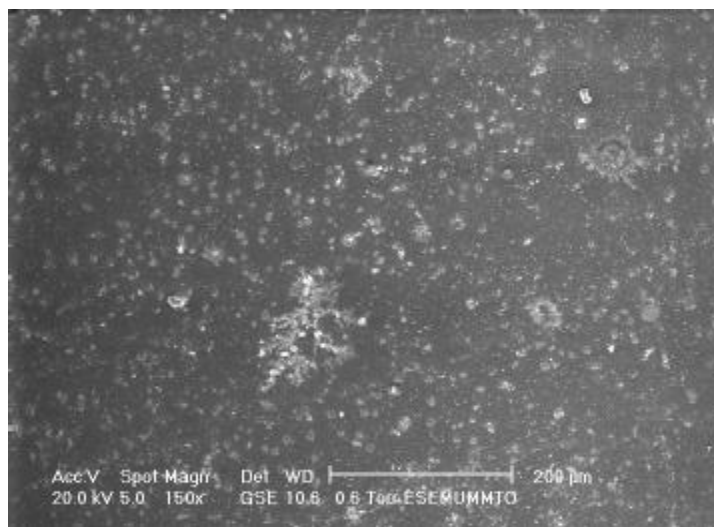
**a. PMMA vierge**

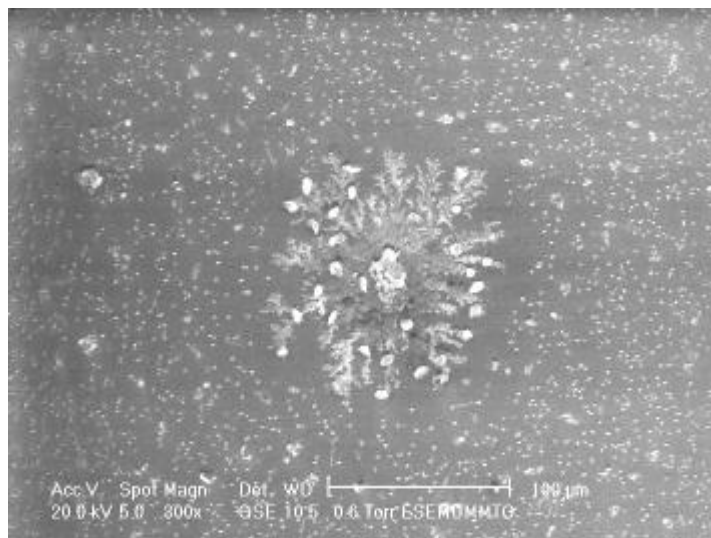


**b. PS vierge**

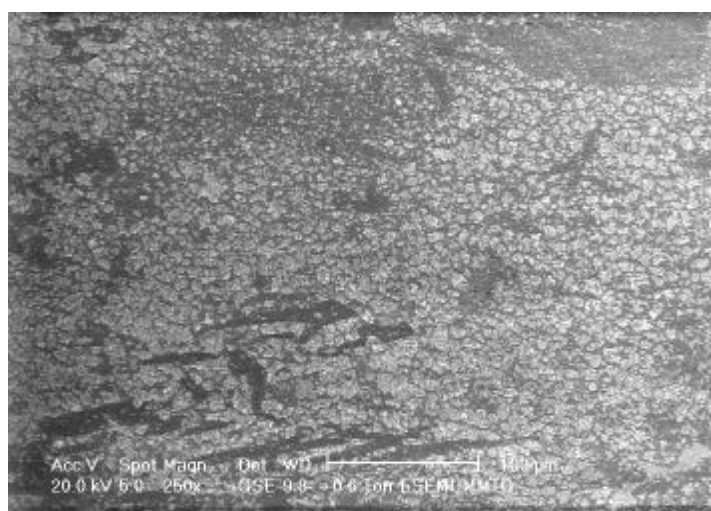
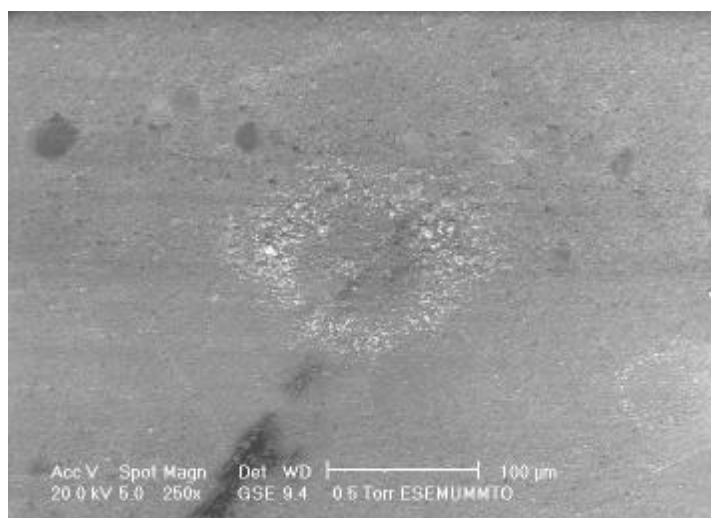


c. PMMA vieilli pendant 6h





**d. PS vieilli pendant 6h**



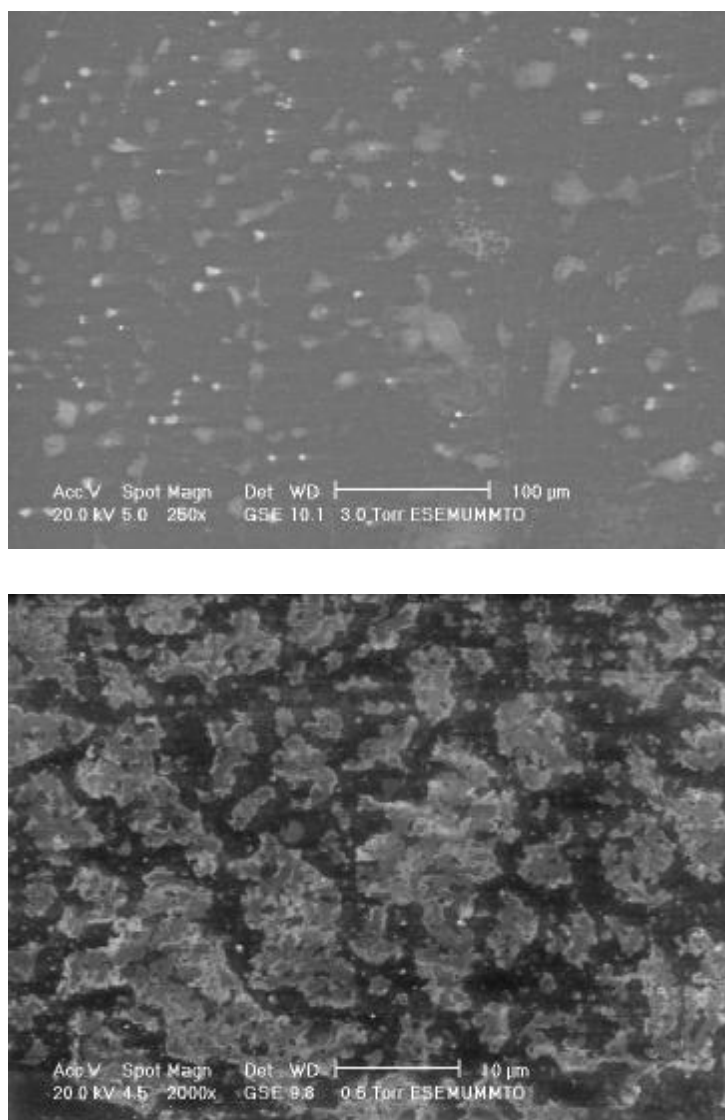


Figure III. 21 : Les micrographies d'échantillons de PMMA et de PS

### III.6. Conclusion

Les résultats obtenus lors des différents essais ont permis la confirmation de l'influence de certains paramètres sur la décharge couronne comme : la géométrie des électrodes, l'épaisseur et le type d'isolant solide utilisé, la pollution de la surface de polymère.

Les essais que nous avons fait ont montré que le claquage électrique est proportionnel à la distance inter-électrode.

L'observation visuelle d'échantillons de PMMA, PS montre qu'ils sont endommagés par le vieillissement électrique, leurs surfaces deviennent rugueuses et non homogènes.

Au terme de notre travail qui a pour objectif, d'étudier l'influence de la nature du matériau et de la pollution sur la décharge couronne. Nous avons vu les différents facteurs influençant sur l'apparition de la décharge couronne (la géométrie des électrodes, l'épaisseur et le type d'isolant utilisé, la pollution) et les effets de cette décharge sur les matériaux isolants. Nous avons d'une part, étudié les caractéristiques des décharges de surface et d'autre part, analysé avec le microscope électronique à balayage (MEB) les dégradations subies par le solide isolant sous l'action de ces décharges.

La couche d'air entre l'électrode haute tension et la surface d'isolant solide influe sur la décharge couronne. Plus l'épaisseur de l'intervalle d'air est grande, plus la tension d'apparition de l'effet couronne est importante.

L'étude pratique qui a été menée au cours de ce travail a montré que la tension d'apparition de l'effet couronne est plus importante pour le PS comparativement à celle de PMMA. De plus, les seuils de cette décharge apparaissent rapidement pour de faibles épaisseurs de ces solides isolants.

Pour la configuration sphère-plan, la tension d'effet couronne est plus intense par rapport à celle de la pointe-plan, ce qui pourrait s'expliquer par le fait que le champ électrique est important au voisinage de la pointe par rapport à celui de la sphère.

Nous avons mis en évidence l'effet de la pollution sur la décharge couronne, en effet dans le cas des isolants pollués, la décharge couronne apparaît à des tensions plus petites comparées à celles obtenues dans le cas des isolants non pollués.

Les résultats des analyses MEB (SEM) ont montré que les surfaces des polymères se dégradent après vieillissement. On peut dire que les décharges agissent sur le solide isolant en transformant ses propriétés. Les dégradations constatées sont l'apparition de cratères sur la surface de PS et des arborescences pour le PMMA qui se développent à partir des couronnes blanchâtres à la surface de cet échantillon.

- [1] S. Djedjiga, « Effet de la décharge couronne sur les surfaces isolantes et les surfaces métalliques », mémoire de Magister en Electrotechnique, UMMTO, 2011.
- [2] E. Belhiteche, L. Dirami, N. Ferhaoui, F. Zeboudj, N. Kireche, M.A. Handala, « Effet du temps de vieillissement sur l'hydrophobicité de polymères soumis à une décharge couronne », Article, CNHT, 09 Laghouat 2013.
- [3] M. Taleb, « Phénomènes aux interfaces des isolants », Thèse de Doctorat, Université Toulouse III. Paul Sabatier, Juin 2011.
- [4] P. Robert, « Matériaux de l'électrotechnique », Volume II, Edition Dunod, 1987.
- [5] M. Abdelmalek, « Etude de l'effet de l'humidité sur les propriétés électroniques de la surface d'un polymère », mémoire de Magister en Electronique, UMMTO, 2009.
- [6] M. Yesli, M. Ahmane, M Tezkraat, « Vieillissement électrique du polyuréthane », mémoire d'ingénieur UMMTO, 2001.
- [7] Z. Zina, « Etude de la tension de retour des matériaux diélectrique utilisés dans l'isolation électrique », mémoire de Magister en Electrotechnique, UMMTO, juin 2012.
- [8] B. Hocine et M. Laziz, « Etude de l'influence du vieillissement électrique sur la conduction électrique du polypropylène (pp) et du polystyrène (ps) », mémoire d'ingénieur, UMMTO, 2009.
- [9] D. Labbaci et N. Saidoun, « Influence du vieillissement thermique cyclique sur les propriétés du PRC utilisé dans les câbles MT », Mémoire d'ingénieur UMMTO, 2002.
- [10] B. Nadia, « Effet du vieillissement thermique sur la tenue diélectrique du polyester-imide utilisé dans les machines électriques », mémoire de Magister en Electrotechnique, UMMTO, 2012.
- [11] A. S. Zohra, « Vieillissement électrique du polyester-imide et du polyamide imide utilisés dans les machines électriques », mémoire de Magister, UMMTO, 2012.
- [12] C. Chauvet, « Mise au point d'une méthodologie sur des essais de rupture à court terme en vue de la caractérisation des câbles H.T », Thèse de doctorat, Toulouse, 1992.
- [13] R. Jean Hubert, « Modélisation de la décharge négative dans les grands intervalles d'air-application à la foudre », Thèse de Doctorat, L'école de Lyon, 2008.

- [14] M. Mekious, « Influence du matériau d'électrode sur la décharge couronne », Thèse de magister, UMMTO, 2001.
- [15] M.Salanne Jeane-philippe, « Contrôle du point de fonctionnement des décharges électriques par l'intermédiaire de leur alimentation », Thèse de Doctorat, Ecole doctorale GEET Toulouse, 2005.
- [16] M.A. Handala, « Etude de la décharge de surface sous tension alternative 50 Hz », Thèse de Doctorat, UMMTO, 2007.
- [17] B. El Hadi, « Etude de la dégradation d'un solide isolant soumis aux décharges électriques de surface », Mémoire de Magister en Electrotechnique, UMMTO, 2012.
- [18] M. Hamel, « Influence de la variation de la température ambiante sur les vibrations induites par effet de couronne », Thèse de Doctorat, Université du Québec, 1991.
- [19] F. Lounes, « Contribution à l'étude du vieillissement électrique d'interfaces isolantes air –solides », mémoire de fin d'études, UMMTO, 2007.
- [20] E.Belhiteche, Kireche, F. Zeboudj, H. Goudjil, M.A. Handala, « Effets du vieillissement électrique sur les propriétés diélectriques de solides isolants », Article, Annaba, 2013.
- [21] M.Moudoud, « Etude de la conduction électrique dans les polymères isolants », Thèse de Doctorat, UMMTO, 2010.