

République Algérienne Démocratique et Populaire
Ministère de l'Enseignement Supérieur
Université de Mouloud Mammeri de Tizi-Ouzou



Faculté de Génie Electrique
et de l'Informatique
Département d'Electrotechnique

MEMOIRE DE FIN D'ETUDE

En vue de L'obtention du diplôme Master Académique
Spécialité : Electrotechnique
Option : Machines Electriques

Thème

Étude de l'influence de la géométrie des électrodes sur la contrainte électrique appliquée aux interfaces air/solide

Proposé par :

M^r. M. A HANDALA

Dirigé par :

M^{elle}. F. ZEMBOUDJ

Réalisé par :

M^{elle}. MEZAGUER DEHIA

M^r. TALEB TAHAR

Promotion 2012/2013

Remerciements

Nous remercions le bon DIEU de nous avoir donné le courage et la force de mener à terme notre travail.

*Nous tenons à remercier nos promoteurs **Mr. M.A HANDALA**, Maitre de conférences à l'UMMTO, et **M^{elle}. F. ZEBOUJ**, doctorante à l'UMMTO pour leurs orientations et conseils tout le long de ce travail.*

Nos remerciements s'adresse aussi aux membres des jurys qui nous font l'honneur en acceptons de juger notre travail.

Tous les enseignants du département d'électrotechnique de l'UMMTO qui ont participé à notre formation durant tout notre 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 nos plus profonds remerciements.

Dédicaces

Je rends grâce à Allah de m'avoir donné le courage et la volonte, ainsi que la conscience d'avoir terminé mes études.

Je dédie ce modeste travail à :

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

A mes frères et mes sœurs

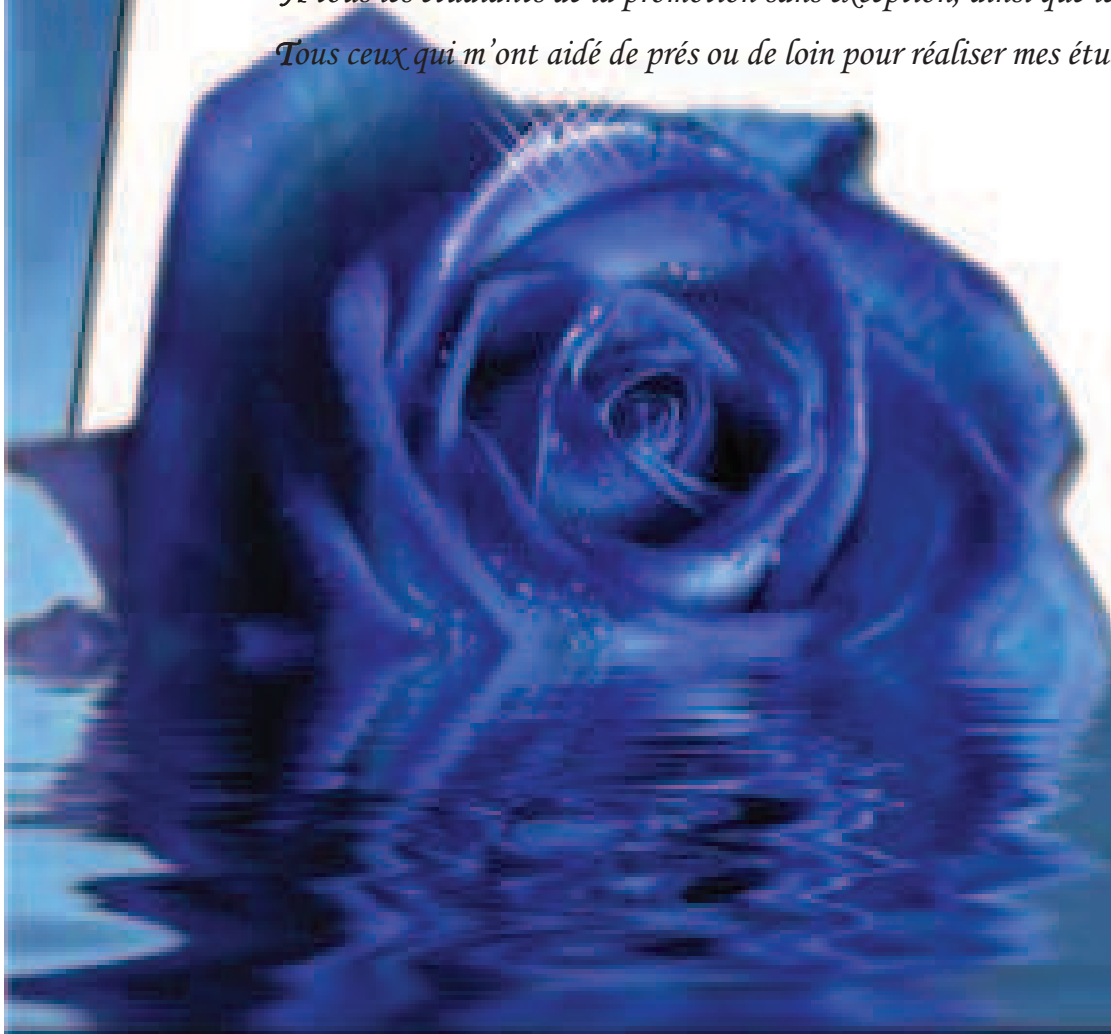
*Ma chère fiancée **Samia***

*Mon binôme **Defia**, pour tous les moments difficiles et de plaisir qu'ont a partagés ensemble, et à toute sa famille.*

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

*A tous les étudiants de la promotion sans exception, ainsi que les résidants de Oude-aissi
Tous ceux qui m'ont aidé de près ou de loin pour réaliser mes études*

TAHAR



Dédicaces

Ce modeste travail de fin d'étude est dédié à tout ceux et celles qui m'ont soutenue tout au long de mon cursus et plus particulièrement :

*Aux personnes les plus chers à mon cœur **mon père et ma mère**, que dieu me les protèges, mes profonds remerciements pour tout ce que vous m'avez donnée, sans votre aide, je ne serais pas ce que je suis aujourd'hui, je vous en serai infiniment reconnaissante.*

*A mes très chères frères : **Mourad, Karim et Massinissa.***

*A mes très chères sœurs : **Siham, Massilia , Samia et son mari Hassen.***

*A ma chère nièce : **Mailiss.***

*A mon binôme : **Taleb Tahar et toute sa familles.***

A toute ma famille et mes meilleurs amis.

DEHIA



Sommaire

SOMMAIRE

Introduction générale.....	1
Chapitre I. Généralités sur les isolants solides	
I.1.Introduction.....	3
I.2.Définitions.....	3
I.2.1.Isolant.....	3
I.2.2.Diélectrique.....	3
I.3.Différents matériaux isolants	3
I.3.1.Isolant gazeux	4
I.3.1.1.Critères de sélection des gaz	4
a. Critères primaires de sélection	4
b. Critères diélectriques.....	6
I.3.2.Isolant solide	6
I.3.2.1.Différentes structures d'un matériau solide	7
a. Structure cristalline.....	7
b. Structure amorphe	7
c. Structure semi-cristalline.....	7
I.3.2.2.Les polymères	7
I.3.2.3.Utilisation des polymères.....	8
I.3.2.4.Structure des polymères	8
I.3.2.5.Familles des polymères.....	11
a. Les thermoplastiques	11
b. Les thermodurcissables	11
c. Les élastomères	11
d. Les polymères naturels.....	12
I.3.2.6.Comportements des polymères	12

I.3.2.7. Les propriétés diélectriques des polymères	13
I.4. Influence de l'humidité et du champ électrique sur la résistance superficielle	16
I.5. Permittivité diélectrique et pertes diélectrique.....	16
I.6. Conclusion	17
Chapitre II: Les Décharges électriques dans les interfaces air /solide	
II.1. Introduction	18
II.2. Rigidité diélectrique	18
II.3. Décharge électrique dans le gaz	19
II.3.1. Généralités	19
II.3.2. Décharge électrique non-autonome	19
II.3.3. Décharge électrique autonome	21
II.3.4. Décharge couronne	21
II.3.5. Décharge de Townsend	22
II.3.6. Tension d'amorçage en champ homogène (loi de PASCHEN)	23
II.3.7. Mécanisme d'un streamer	24
II.4. Les décharges électriques de surface d'un isolant solide	25
II.4.1. Décharge glissante aux interfaces air/ solide.....	25
II.4.2. Décharge à barrière diélectrique	26
II.4.2.1. Décharge volumique	27
a. La décharge silencieuse	27
b. La décharge lumineuse homogène	27
II.4.2.2. Décharge surfacique.....	27
II.4.3. Les décharges partielles	27
II.5. Paramètres influent sur les décharges de surface	28
II.5.1. La résistivité superficielle	28
II.5.2. La permittivité relative	29

II.5.3. Paramètres géométriques	29
II.6. Le vieillissement.....	35
II.6.1.Le vieillissement chimique	35
II.6.2.Le vieillissement physique	36
II.7. Les configurations géométriques des électrodes	37
II.7.1.Configuration pointe –plan	37
II.7.2.Configuration sphère-plan	39
II.8.Conclusion	39

Chapitre III : Dispositifs expérimentaux et le matériau étudié

III.1.Introduction	40
III.2.Le PMMA	40
III.2.1. Différents PMMA	41
a. PMMA choc	41
b. PMMA chaleur.....	41
III.2.2. Structure	41
a. copolymère de méthacrylate de méthyle	41
b. PMMA choc	41
III.2.3. Propriété du poly méthacrylate de méthyle.....	41
a. Propriété physique du PMMA.....	41
b. Propriété mécaniques du PMMA	42
c. Propriétés électriques	43
d. Propriétés thermiques.....	43
e. Propriétés chimiques	43
f. Propriétés optiques.....	44
j. Propriétés acoustiques.....	44
h. Propriétés de mise en œuvre.....	44

III.2.4. Utilisation de PMMA	45
III.2.5. Les avantages et les inconvénients du plexiglas	45
III.2.5.1. Avantages	45
III.2.5.2. Inconvénients	45
III.3. Laboratoire de la haute tension	46
III.4. Montage expérimental destiné pour la mesure des courants de décharges	47
III.4.1. Montage expérimentale	47
III.4.2. Présentation du logiciel.....	50
III.5. Microscope électronique à balayage (MEB)	51
III.5.1. Montage expérimental	51
III.6. Analyse microscopique	52
III.6.1. Constitution d'un microscope électronique à balayage (MEB)	52
III.6.2. Principe de fonctionnement du MEB	54
III.7. Conclusion.....	55
Chapitre IV : Résultats et discussions	
IV.1. Introduction	56
IV.2. Courant de décharge.....	56
IV.2.1. Essais préliminaires.....	56
IV.2.2. Forme du courant.....	57
IV.2.2.2. Forme du courant associé en polarité positive	57
IV.2.2.2. Forme du courant associé en polarité négative	58
IV.2.3 Résultats expérimentaux et interprétation.....	59
IV.2.3.1 Influence de la tension appliquée sur courant maximum de décharge	59
a. Résultats obtenus pour le système pointe- plan.....	60
b. Résultats obtenus pour le système sphère- plan	60

IV.2.3.2 Courant maximum de décharge pour différents systèmes d'électrodes en fonction de la tension	61
IV.3 Analyse microscopique	62
IV.3.1 Résultats expérimentaux et discussion.....	62
IV.3.1.1 Influence de l'épaisseur de la couche d'air et le temps de vieillissement électrique sur la dégradation de PMMA	62
a. PMMA vierge.....	62
b. PMMA Vieilli pendant 1h30.....	63
c. PMMA Vieilli pendant 3h	66
d. PMMA Vieilli pendant 4h30.....	70
e. PMMA Vieilli pendant 6h.....	73
IV.4 Conclusion	74
Conclusion générale	75
Bibliographie	
Annexe(Stage pratique)	

Introduction générale

Introduction générale

Les évolutions technologiques et industrielles de ces dernières décennies dans le génie électrique nécessitent l'amélioration des matériaux utilisés dans l'isolation électriques. C'est ainsi que les polymères, connus pour leurs grandes capacités d'isolations électriques, ont envahi le domaine de l'isolation électrique. En effet les matériaux polymères trouvent une large application : lignes de transport d'énergie électrique, condensateurs, alternateurs, câbles, moteurs électriques et systèmes électroniques. Ces nombreuses applications font appel aux propriétés isolantes des polymères dont la résistivité transversale est généralement très élevée [1].

Malgré leurs avantages, les polymères demeurent sujets au vieillissement sous champ électrique qui mène à leur dégradation.

Pour étudier le vieillissement électrique, plusieurs systèmes d'électrodes peuvent être utilisés : citons par exemple : le plan, la sphère, la pointe, la lame, ...etc.

Dans notre étude, nous avons choisi deux systèmes d'électrodes : pointe-plan et sphère-plan afin de répondre à la question : quelle est l'influence de la géométrie des électrodes sur la forme des courants de décharge et la dégradation du matériau.

Le présent mémoire comporte quatre chapitres. Dans le premier chapitre, nous décrivons dans un premier temps les isolants gazeux et les différents critères de sélection de gaz, puis les isolants solides mis en œuvre dans le domaine de l'ingénierie électrotechnique. Notre intérêt sera spécialement orienté vers les matériaux polymères.

Le deuxième chapitre sera réservé à l'étude des phénomènes de claquage dans les interfaces air/solide ainsi que les nombreux phénomènes qui sont susceptibles d'altérer un diélectrique au cours du temps (vieillissement), provoquant en particulier une diminution de la rigidité diélectrique.

Dans le troisième chapitre, nous donnerons un aperçu général sur le PMMA puis nous présenterons les dispositifs expérimentaux utilisés pour étudier les courants de décharge et la dégradation de surface du PMMA.

Au quatrième chapitre, nous interpréterons les résultats expérimentaux obtenus pour la mesure des courants de décharge enregistrés et l'effet de dégradation de surface du PMMA pour les deux configurations d'électrodes pointe-plan et sphère-plan. L'influence de divers paramètres sur le vieillissement et les courants associés aux décharges seront traités.

En fin, nous terminerons notre travail par une conclusion générale

Introduction générale

Nous avons joint au présent mémoire une annexe dans laquelle nous avons rendu compte du stage que nous avons effectué auprès du centre de stockage et de transfert de GPL (CSTF) de la région de HASSI R'MEL, qui est filiale de Sonatrach .

Chapitre I

**Généralités sur les isolants gaz et
solide**

I.1. Introduction

Les isolants solides sont des éléments de base des isolations à haute tension. Ils comportent en plus par rapport aux autres isolants, la particularité d'assurer la rigidité mécanique des matériels électriques. Du point de vue microscopique, les diélectriques sont constitués d'atomes pour lesquels les forces de liaison dues à la structure du milieu rendent difficile le déplacement des porteurs de charges. Sous l'effet du champ électrique suffisamment intense appliqué, l'énergie ionique sera suffisante pour que les électrons puissent passer de la bande de valence à la bande de conduction.

Les isolants électriques sont étudiés depuis de nombreuses années. La plupart d'entre eux sont de nature organique (thermoplastique, thermodurcissable ou élastomère). Ce chapitre est consacré à l'étude des polymères utilisés dans l'isolation électrique, ces derniers sont en effet largement utilisés dans l'industrie électrique en raison de leurs performances mécaniques, leur bonne tenue électrique, leur facilité de mise en œuvre et leur faible coût. Les équipements haute et moyenne tensions comportent le plus souvent des structures mixtes, combinant au moins deux phases : solide/liquide ou solide/gaz. Ce type d'isolations est présent dans des appareillages comme les transformateurs et condensateurs de puissance, les disjoncteurs et les câbles ainsi que dans les lignes aériennes (isolateurs de support et de traversée).

I.2. Définitions

I.2.1. Isolant

Un isolant est une substance ayant une conductivité électrique suffisamment faible pour être utilisé pour séparer des pièces conductrices portées à des potentiels différents. On peut considérer comme isolant, tous les matériaux dont la résistivité est supérieure à $10^{10} \Omega \cdot \text{cm}$ [2].

I.2.2. Diélectrique

Un diélectrique est défini comme un milieu matériel dans lequel les bandes de conduction et de valence sont séparées par une énergie supérieure à 5eV et ayant une résistivité très élevée (10^8 à $10^{15} \Omega \cdot \text{m}$). On le définit aussi comme un milieu dans lequel tout volume de la substance possède un moment dipolaire (polarisation permanente) ou susceptible d'en acquérir sous l'action d'un champ électrique (polarisation induite) [3].

I.3. 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, et dans notre travail on s'intéresse aux isolants solides et gazeux ainsi que leur interfaces.

I.3 .1. Isolant gazeux

Le gaz le plus abondant et le plus utilisé dans l'isolation électrique (lignes aériennes , électrostatiques , postes classiques ...) est l'air .cependant , d'autre gaz tels que l'azote (N_2),le dioxyde de carbone (CO_2) et surtout l'hexafluorure de soufre (SF_6) connaissant un succès grandissant dans le domaine des système haute tension (postes blindés ,câbles à isolation gazeuse, etc..) Leur utilisation a permis d'améliorer la fiabilité des systèmes et d'en réduire leurs poids et dimensions en diminuant la distance entre les conducteurs, et par conséquent, l'espace occupé par ces systèmes. Cela est remarquable en comparant un poste classique (isolé à l'air) à un poste blindé (isolé au gaz SF_6).

I.3.1.1. Critères de sélection des gaz

Compte tenu des enjeux écologiques et de certaines liées à l'utilisation des gaz isolants, on va déterminer certains critères de sélection de gaz, qui respectent l'environnement d'une part et les exigences diélectriques et sanitaires d'autre part .Ces critères peuvent être classés en deux groupes à savoir les critères primaires de sélection (indépendants des propriétés diélectriques) et les critères diélectriques (par comparaison au SF_6).

a. Critères primaires de sélection

Il s'agit entre autres de :

- **Non toxicité** : les gaz doivent être non toxiques pour le personnel d'entretien et technique ainsi que pour les équipements avec lesquels ils interagissent.il existe deux catégories de toxicité : la toxicité aigue et la toxicité à long terme.

- **Température de liquéfaction** : frontière entre la phase gazeuse et liquide, elle doit être inférieure à la température minimale (T_{min}) de fonctionnement de l'équipement à la pression de fonctionnement choisie p (minimum en dessous de zéro degré Celsius 0,1 MPa) la température de liquéfaction (T_{liq}) dépend de la pression du gaz utilisé, elle peut être déduire de la température d'ébullition (T_{eb}) à la pression atmosphérique par une expression

approximative de la forme :

$$T_{liq}(p) = T_{eb} + 27 \ln (p)$$

Ou T_{liq} et T_{eb} sont en degré Celsius et p en bar .Cette relation peut être dérivée de l'équation de Clausius –Clapeyron pour la courbe de pression de vapeur et laisse apparaître le critère de non liquéfaction sous forme de limite supérieure au point d'ébullition (T_{eb}) :

$$T_{eb} < T_{min} - 27 \ln(p) \text{ [bar]} - 20 \text{ }^\circ\text{C} \text{ (supposant } p > 1,2 \text{ et } T_{min} < - 20 \text{ }^\circ\text{C)}.$$

- **Stabilité chimique** : elle peut être exprimée sous forme de deux critères, le premier critère la température de décomposition T_{dec} du gaz qui doit être supérieure à la température maximale qui pourrait se produire dans l'équipement sous test (en général autour de 200 °C aux points chauds, $T_{dec} > 200 \text{ }^\circ\text{C}$). Pour le second critère, le gaz ne doit pas prendre feu (non inflammabilité) dans une réaction de décomposition provoquée par une décharge partielle produisant des étincelles qui peuvent avoir des températures supérieure à 10000 °K.

Une moyenne sûre est de faire en sorte que le gaz choisi soit un composé exothermique (c'est-à-dire qui a son enthalpie inférieure à zéro)

- **Critères environnementaux** : les paramètres critiques qui ont le plus d'impact sur l'environnement sont le potentiel de dégradation de l'ozone (PDO) et le potentiel d'échauffement global (PEG). Ce dernier caractérise l'accumulation à long terme d'un gaz dans l'atmosphère. Le PEG du gaz doit de préférence être inférieur de 100 fois à celui du SF₆. Tous les gaz contenant du chlore ou du brome sont à proscrire car susceptibles de détériorer la couche d'ozone.

Le SF₆ est un produit industriel obtenu à travers la synthèse directe du fluor et du soufre fondu. Le produit obtenu est raffiné en le nettoyant, en le fissurant et en le séchant. Puis il vient liquéfier par compression afin d'éliminer les éléments non-condensables (tels qu'oxygène et azote atmosphérique ou tétrafluorure de carbone).

b. Critères diélectriques

- Le champ critique E_{cr} (rigidité diélectrique intrinsèque) qui mesure la capacité d'isolation d'un diélectrique. Il sera exprimé par rapport à la valeur du SF (référence)
- Non formation de produits de décomposition, au cours de la décharge, dont le dépôt sur les isolants solides de la structure (par exemple : buse dans un disjoncteur HT) pourrait créer des surfaces conductrices et favoriser l'amorçage d'étincelles.
- Critères de commutation : ces critères englobent entre autres les propriétés suivantes :
 - ✓ Bonnes propriétés de coupure d'arc et d'isolation (stabilité à la formation d'arc, faible constante de temps d'arc ...)
 - ✓ Electronégativité pour permettre la capture d'électrons libres et prévenir le phénomène d'avalanche à l'origine de l'amorçage de la décharge.
 - ✓ Grosse section efficace, stabilité chimique et thermique avec dissociation des molécules réversible (recombinaison) si possible pour une grande efficacité de coupure.
 - ✓ Grande énergie de dissociation pour un refroidissement optimal de l'arc.
 - ✓ La réaction des produits d'érosion d'arc (souvent inévitable) dus aux matériaux proches de l'arc ne doit pas former de dépôts conducteurs tels que les couches de carbone ,de métal ou de semi-conducteur qui induiraient des conductivités parasites pouvant mener à la formation d'étincelles.[4].

I.3.2. Isolant solide

Le rôle principale des isolants solides est de s'opposer au passage du courant électrique, mais ils servent aussi à maintenir mécaniquement les conducteurs dans des conditions bien déterminées (par exemple : isolants de tête de ligne).

Le taux d'utilisation de ces isolants varie selon le besoin dans certains cas la quantité d'isolants solides utilisée est très réduite (lignes aériennes en conducteurs nus), mais la préoccupation de réduire l'encombrement des systèmes électriques, amène à rapprocher les conducteurs, et par conséquent à augmenter leurs isolations et les maintenir rigidement en place pour éviter qu'ils se mettent en contact sous l'effet de leurs propres poids, des déformations, ou des forces extérieures. Les isolants solides peuvent être employés seuls (câble à isolation synthétique extrudée), en association de plusieurs solides (bobinage réalisé en fil émaillé

imprégné de résine thermodurcissable) ou en association d'un solide et d'un liquide (isolation en papier imprégné d'huile minérale pour les transformateurs à haute tension).

Afin d'assurer l'isolation des différents systèmes électriques, divers isolants sont utilisés (verre, porcelaine, matériaux composites,.....etc.)[5].

I.3.2.1. Différentes structures d'un matériau solide

L'arrangement des atomes dans les solides peut prendre un caractère ordonné ou désordonné et conduire à plusieurs types de structures :

a. Structure cristalline

La structure cristalline est caractérisée par une distribution périodique régulière de particules constituant le matériau (ordre à longue distance, réseau cristallin).

L'ensemble des matériaux métalliques et un grand nombre de céramiques ont une structure cristalline.

b. Structure amorphe

La structure amorphe est une structure dense et peu ordonnée. Elle est de type pelote statique dans laquelle on ne distingue aucun ordre à grande échelle. Cette structure rencontrée dans certaines céramiques ainsi que dans de nombreux polymères organiques tels que le polyméthyl méthacrylate (PMMA), le styrène acrylonitrile (SAN) et le polystyrène (PS).

c. Structure semi- cristalline

Cette structure est une structure complexe caractérisée par la coexistence de phases amorphes et cristallines en proportion variable (présence de cristallinité). Cette structure est rencontrée dans de nombreux polymères organiques tels que le Polypropylène (PP) et le polyéthylène (PE) [6].

I.3.2.2. Les polymères

Dans le présent travail on s'intéresse aux interfaces air \ polymère .les polymères isolants communément « matières plastiques ». On appelle polymère une grande molécule constituée d'unités fondamentales appelées monomères (ou motifs monomères) reliées par des liaisons covalentes.

Un monomère est un composé constitué de molécules simples pouvant réagir avec d'autres monomères pour donner un polymère. Contrairement au polymère, un monomère a une faible masse moléculaire. Le terme macromolécule est souvent utilisé à la place de polymère .La

polymérisation est la réaction qui, à partir des monomères, forme en les liants des composés de masse moléculaire plus élevée, les polymères ou macromolécules. Les noyaux des monomères sont le plus souvent constitués d'un atome de carbone (molécules organiques) ou d'un atome de silicium (polymères siliconés).

Un homopolymère est un polymère qui comporte des motifs monomères tous identiques.

Un copolymère est un polymère qui comporte des motifs monomères de deux ou plus sortes différentes.

Les polymères peuvent être d'origine naturelle (animale ou végétale) ou d'origine synthétique. Les macromolécules naturelles sont les caoutchoucs, les polysaccharides, le glycogène, l'ADN, les protéines.... Les macromolécules synthétiques sont représentées par exemple par le polyéthylène, le polypropylène, le polystyrène, le PVC, le PTFE, les polyesters, les polycarbonates, les polysiloxanes, les polyamides.

I.3.2.3. Utilisation des polymères

On rencontre les polymères dans les petits objets usuels de la maison, les appareils électroménagers, et aussi en tant que matériaux de construction, en revêtements et peintures, dans les emballages, les pneus, les fibres textiles, les produits médicaux, chirurgicaux, prothèses, produits d'hygiène, articles de loisirs, pièces de structures dans les véhicules de transport, les équipements électriques, les circuits électroniques, les matelas-mousses, les colles. Ils s'infiltrent aussi dans l'alimentation, les produits cosmétiques, le ciment, etc.

I.3.2.4. Structure des polymères

Les polymères peuvent présenter des architectures extrêmement variables. Ils peuvent être linéaires, ramifiés ou réticulés. Le plus souvent, ils sont amorphes, parfois ils peuvent être, au moins partiellement cristallisés.

- **Polymères linéaires**

Les polymères linéaires sont constitués de grandes chaînes de monomères reliés entre eux par des liaisons covalentes. Ces macromolécules sont liées entre elles par des liaisons secondaires qui assurent la stabilité du polymère. Ces liaisons secondaires sont des liaisons ou ponts hydrogène ou des liaisons de Van der Waals. Lorsque ces liaisons existent, le matériau devient rigide et présente un comportement de solide.

Si la température s'élève, l'agitation moléculaire qui en résulte va rompre progressivement ces liaisons secondaires. Le matériau va pouvoir s'écouler sous son propre poids : il présente

alors le comportement d'un liquide visqueux.

La température à laquelle se produit cette évolution s'appelle la température de transition vitreuse.

La transition vitreuse correspond à l'apparition de mouvements de longs segments de chaîne et marque le passage de l'état vitreux à l'état caoutchouteux.

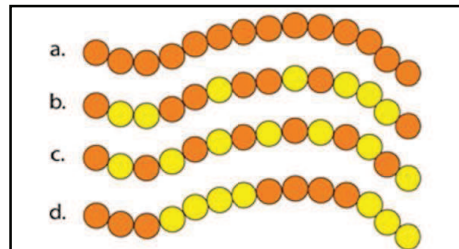


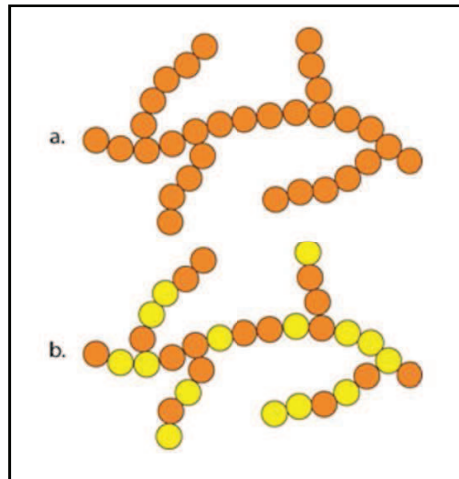
Figure (I.1): polymères linéaires

- a. homopolymère,
- b. copolymère statistique,
- c. : copolymère alterné,
- d. : copolymère séquencé

Les propriétés mécaniques des copolymères varient en fonction du type et de la disposition des monomères. Les rotations de la chaîne sont facilitées ou au contraire rendues plus difficiles en fonction de la nature, de la disposition et de l'encombrement de chacun des monomères.

- **Polymères ramifiés**

Des chaînes homopolymériques ou copolymériques peuvent se greffer sur d'autres chaînes au cours de la polymérisation. Au-dessus de la température de transition vitreuse, ces matériaux présenteront un comportement visqueux plus marqué que les polymères linéaires.



Figure(I.2) : Homopolymère ramifié (a) et copolymère ramifié (b)

- **Polymères réticulés**

La réticulation correspond à la formation de liaisons chimiques suivant les différentes directions de l'espace au cours d'une polymérisation, d'une polycondensation ou d'une polyaddition, et qui conduit à la formation d'un réseau.

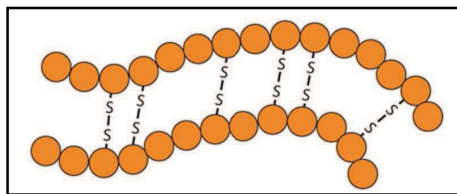


Figure (I.3): Polymère réticulé avec ponts disulfures reliant deux chaînes

- **Polymères amorphes et polymères cristallisés**

Les chaînes macromoléculaires peuvent être organisées de façon aléatoire dans l'espace et constituer ainsi une phase amorphe. La phase amorphe est, en théorie équivalente à un liquide « figé », sans ordre moléculaire à grande distance. Il existe néanmoins des orientations macromoléculaires préférentielles. Elles peuvent être rangées régulièrement avec la constitution d'un ordre responsable d'une propriété caractéristique de l'état cristallin : l'aptitude du matériau à diffracter les rayons X selon des angles définis. Ces structures peuvent aussi être objectivables en lumière polarisée.

Dans un polymère, les deux états ordonnés et désordonnés peuvent exister dans un même matériau qui est alors de nature semi-cristalline.

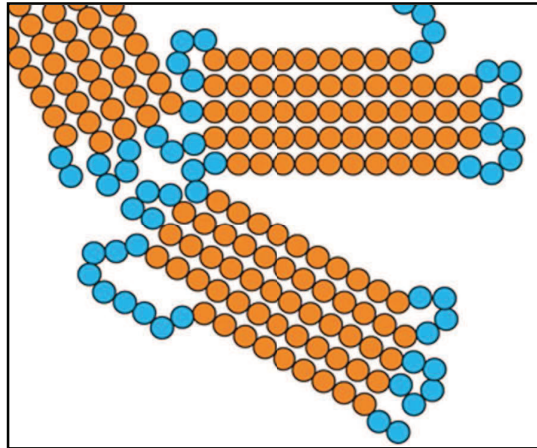


Figure (I.4): Représentation schématique d'un polymère semi-cristallisé

I.3.2.5. Familles des polymères

Il existe une grande variété de polymères utilisés dans l'industrie, comme les peintures, les caoutchoucs, les plastiques, les fibres de synthèse, le papier, etc. Ils sont souvent classés selon leurs propriétés thermomécaniques, et on distingue :

a. Les thermoplastiques

Les polymères thermoplastiques sont des polymères linéaires sans pont d'une molécule à l'autre, et c'est pour cette raison qu'ils se ramollissent au chauffage et leur mise en œuvre est facile. Parmi les thermoplastiques, on a : Polyéthylène (PE), Polypropylène (PP) et Polystyrène (PS).

b. Les thermodurcissables

Ils sont fabriqués en mélangeant deux constituants (une résine et un durcissant), qui réagissent et durcissent, tantôt à chaud, tantôt à température ambiante. Le polymère obtenu comprend de nombreuses liaisons covalentes de chaînes à chaînes. Sous l'action de la chaleur, la structure du polymère se ramollit mais ne fond pas.

Les thermodurcissables types comprennent les résines époxydiques, les polyesters et les plastiques formaldéhydes

c. Les élastomères

Les matériaux en caoutchouc ou élastomères sont des solides souples et gonflables formés de chaînes peu compactées et (à température ambiante) très mobiles. Pour assurer une stabilité de forme indispensable, diminuer leur propension au fluage et prévenir une souplesse

excessive, les caoutchoucs sont généralement réticulés, c'est-à-dire que leurs chaînes sont liées entre elles par des liaisons primaires et stables.

Parmi les élastomères, on trouve : Poly – isoprène, Polybutadiène, Polychloroprène.

d. Les polymères naturels

Les principaux polymères naturels utilisés sont: le poly isoprène (caoutchouc), la cellulose et la lignine constituants principaux du bois et de la paille; les protéines de la laine et la soie [7].

I.3.2.6. Comportements des polymères

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". 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. 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.

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 .

I.3.2.7. Les propriétés diélectriques des polymères

Les polymères isolants possèdent plusieurs modes de polarisation (électronique, ionique, dipolaire, ...etc.). Aux fréquences industrielles, seule la polarisation électronique a un rôle déterminant.

La permittivité relative des polymères est comprise entre 2 et 10.

L'humidité est également un facteur déterminant pour la qualité de l'isolation, elle influence notamment la résistance superficielle des polymères solides. Les polymères employés pour l'isolation ont une résistivité suffisamment élevée pour être considérés, sur ce plan comme de bons diélectriques.

- **Rigidité diélectrique**

La rigidité diélectrique d'un matériau isolant est la valeur maximale du champ électrique que l'on peut lui appliquer sans produire de claquage. Dans le cas d'un champ uniforme la rigidité est donnée par :

$$E = \frac{V}{d}$$

Avec : V : tension maximale appliquée.

d : épaisseur de l'isolant.

- **Rigidité intrinsèque**

La rigidité intrinsèque est dépendante de la structure chimique du matériau. Pour la mesurer le champ doit être le plus uniforme possible de bords négligeables est les défauts existant dans le volume de l'isolant doivent réduits.

- **Rigidité pratique**

Elle est très importante pour les applications industrielles. Elle est généralement obtenue en appliquant la procédure décrite dans la norme (CEI243), qui décrit deux grandes familles de méthodes d'essai qui sont :

- Rigidité diélectrique transversale : le champ électrique est appliqué perpendiculairement à la surface du matériau.

- Rigidité diélectrique longitudinale : Le champ électrique est appliqué parallèlement à la surface du matériau.

La rigidité intrinsèque des polymères et des solides en général peut atteindre plusieurs

centaines de kV / mm, mais leur rigidité pratique est souvent limitée à quelques dizaines de kV/mm. Elle varie pour les polymères les plus utilisés de 10 à 24 kV/mm. En pratique, le claquage se produit à points faibles tels que les inclusions de gaz, les défauts à la surfaces des électrodes ou les interfaces gaz /solide.

La rigidité diélectrique dépend de :

- ✓ La fréquence, la forme et durée d'application de la tension.
- ✓ La température, la pression et l'humidité de l'atmosphère.
- ✓ La présence d'impuretés dans l'isolant (bulles d'air, humidité,...)

- **Résistance et résistivité transversale (volumique)**

La résistance transversale (volumique) R_t est le quotient de la tension continu appliqué entre deux électrodes placées sur deux faces opposées d'une éprouvette, par le courant circulant en régime établi entre ces électrodes, à l'exclusion du courant circulant en surface et ne tenant pas compte des phénomènes de polarisation éventuels sur les électrodes.

$$R_t = \frac{V}{I}$$

Avec : R_t : S'exprime en ohm [Ω]

V : Tension appliquée [V]

I : Intensité de courant [I]

La résistivité transversale ρ_t est le quotient du gradient de potentiel par densité de courant qui traverse l'isolant.

$$\rho_t = R_t \frac{S}{e}$$

Avec : e : épaisseur de l'échantillon

s : surface de l'électrode.

- **Résistance superficielle :**

La résistance superficielle est le quotient de la tension continue appliquée entre deux électrodes placées sur la même face d'une éprouvette. Par le courant circulant entre les électrodes après une durée d'application donnée sans tenir compte des phénomènes de polarisation éventuels sur les électrodes.

$$R_s = \frac{V}{I}$$

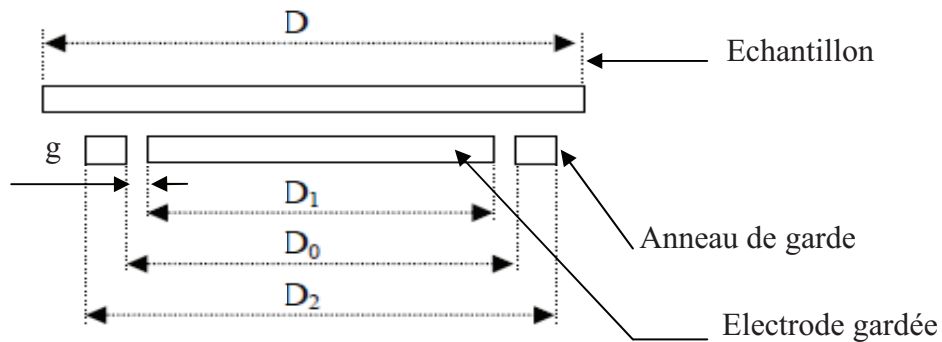
- **Résistivité superficielle :**

En tension continue la résistivité d'un diélectrique. ρ_s est le quotient du gradient de potentiel en surface par le courant par unité de largeur.

La relation entre la résistance superficielle R_s et la résistivité correspondante ρ_s est donnée par la formule :

$$\rho_s = R_s * P/g$$

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



Figure(I.5) : Dimensions des électrodes [9].

I.4. Influence de l'humidité et du champ électrique sur la résistance superficielle

La résistance superficielle dépend de la température, de l'humidité, du champ appliqué du temps d'application de la tension et d'autres paramètres concernant les électrodes (nature et géométrie).

- **Influence de L'humidité**

L'humidité est le paramètre qui a la plus forte influence sur la résistance superficielle des matériaux isolants. La résistivité superficielle dépend de la teneur en eau du matériau mais, à teneur en eau donnée, elle dépend surtout de l'humidité relative de l'air ambiant.

La présence d'humidité fait diminuer la résistivité de l'isolant car les impuretés présentes dans l'eau dissocient les molécules en ions, comme elle peut former à la surface un fil conducteur d'une électrode à l'autre.

- **Influence du champ électrique appliqué**

En champ faible, les matériaux isolants suivent en général la loi d'ohm, en d'autres termes, leur résistivité est indépendante du champ appliqué. En revanche en champ fort, on constate généralement une décroissance de la résistance lorsque le champ appliqué augmente. Cela s'explique par l'injection d'électrons aux électrodes et par la présence d'impuretés ou de défauts dans le matériau.

- **Résistance d'isolement**

La résistance d'isolement est quotient de la tension continu appliquée entre deux électrodes en contact avec l'échantillon par le courant totale qui traverse, à un moment donné. Après application de cette tension ce rapport dépend à la fois de la résistance superficielle et transversale de l'éprouvette [8].

I.5. Permittivité diélectrique et pertes diélectriques

Le rôle des matériaux diélectriques, du point de vue du génie électrique, est celui d'exercer une fonction isolante dans tout matériel soumis à une tension électrique, exception faite pour certains matériaux polaires. Ils sont capables de stocker l'énergie électrique, puisqu'ils permettent au champ électrique de les pénétrer, cette propriété est caractérisée par leur permittivité diélectrique.

Les matériaux diélectriques idéaux sont des matériaux qui ne sont pas conducteurs du courant

électrique puisqu'ils ne contiennent pas de charges libres dans leurs structures, à moins qu'ils soient soumis à l'action des facteurs ionisants externes provoquant la perte de leurs propriétés diélectriques. Aussi, les charges de signes différents dans les atomes et les particules des diélectriques sont liées. Lorsque ces charges sont soumises aux forces induites par le champ électrique, certaines de ces liaisons ne se rompent pas mais seules de légers déplacements élastiques apparaissent. Toutes les charges positives se déplacent vers la direction conforme à celle du champ, et les charges négatives dans la direction opposée, ce qui crée une polarisation du diélectrique.

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

La polarisation et la conductivité, en un mot toute mobilité de porteurs de charge, induisent des pertes diélectriques. Tous les phénomènes dans les diélectriques soumis à un champ électrique dépendent de la fréquence du champ, de la température et de la structure du diélectrique [10].

I.6. Conclusion

Dans ce chapitre nous avons rappelé les connaissances actuelles liées aux isolants gaz et solide 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 couts raisonnable. 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.

Chapitre II

**Les décharges électriques dans les
interfaces air/solide**

II.1. Introduction

Les structures isolantes mixtes gaz/solide présentes dans des nombreux appareillages à haute tension, elles sont aussi utilisées dans les systèmes de traitement de surface et de dépollution. Dans certains composants, comme les disjoncteurs isolés au gaz, par exemple, les isolants solides sont utilisés comme enveloppe de l'appareil et comme support pour les électrodes, le gaz est utilisé pour ses propriétés isolantes et pour le soufflage de l'arc.

On pourrait croire que les phénomènes d'amorçage à l'interface d'une isolation mixte gaz/solide sont connus depuis longtemps, car certains mécanismes élémentaires tels que l'ionisation par collision, photo ionisation, mobilité ionique,... sont maintenant assez bien compris. Mais en réalité, dans une décharge disruptive, tous ces phénomènes élémentaires se combinent de façon extrêmement complexe ce qui a fait l'objet de nombreuses études.

Durant l'exploitation, les équipements électriques sont exposés aux différents types de contraintes : mécanique, thermique, électrique, chimique et environnementales. Dans cette étude, nous nous intéressons plus particulièrement aux contraintes électriques. En présence d'un champ électrique, divers phénomènes peuvent prendre naissance dans le volume ou à la surface des matériaux constituant l'isolation mixte. En effet, au-dessus d'une certaine valeur dite de seuil du champ électrique, des décharges volumiques ou surfaciques peuvent prendre naissance et se développer jusqu'à la rupture diélectrique [11].

Dans ce chapitre, nous expliquerons les mécanismes d'une décharge électrique dans les interfaces solide/air.

II.2. Rigidité diélectrique

En élevant la tension graduellement entre deux électrodes séparées par un isolant, on provoque un éclatement entre les deux électrodes sous forme d'étincelles qui perforent cet isolant.

La tension perforant un isolant par unité d'épaisseur est appelée « rigidité diélectrique ». On parle aussi de tension de perforation ou de tension disruptive ou de claquage de l'isolant. La rigidité diélectrique G d'isolant est définie par le rapport entre la tension V à laquelle se produit le claquage et la distance L entre les électrodes entre lesquelles est appliquée la tension.

$$G = \frac{V}{L}$$

G est généralement exprimé en kV/mm.

Par rapport aux positions relatives de la direction de champ électrique et des surfaces principales de l'isolant, la rigidité diélectrique peut être transversale ou longitudinale.

La valeur de la rigidité peut être influencée par plusieurs paramètres dont l'épaisseur de l'isolant, la forme des électrodes et leurs polarités, ainsi que la forme et la durée d'application de la tension. Elle dépend aussi de la fréquence, la température, la pression et l'humidité de l'atmosphère, la présence d'impuretés dans l'isolant (bulle d'air, humidité).

II.3. Décharge électrique dans le gaz

II.3.1. Généralités

Les gaz sont en général, de bons isolants électriques. Ils présentent un grand avantage, celui d'être une isolation régénératrice. Certains gaz, tel que l'azote, le CO₂ et le SF₆ permettent de diminuer sensiblement les dimensions, donc l'encombrement et le coût des installations électriques et ceci d'autant plus que la pression à laquelle ils sont utilisés est grand.

Le vide poussé est aussi de plus en plus utilisé pour ses bonnes caractéristiques isolantes particulièrement dans la technique de coupure (disjoncteurs).

A l'état naturel, les gaz peuvent présenter une certaine conductibilité. Celle-ci s'explique par l'existence d'électrons libres produits par une ionisation due aux rayons cosmiques ou aux substances radioactives ou à un échauffement.

II.3.2. Décharge électrique non-autonome

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

Si nous appliquons une tension V entre les électrodes, aucun courant ne passe. Par un procédé thermique directe ou indirecte, ou par un rayonnement ultraviolet, provoquons une émission thermoélectronique ou photoélectrique à la cathode. Les électrons sont émis et forment une Charge

Chapitre II Les décharges électriques dans les interfaces air/solide

d'espace près de la cathode. Si on augmente V , on collecte de plus en plus d'électrons (partie A de la figure II.1) jusqu'au moment où, pour une émission donnée, on a saturation (partie B de la figure II.1). Le caractère essentiel de cette décharge est qu'elle n'est pas auto-entretenu et que le courant cesse dès que la production soit arrêtée par un processus extérieur.

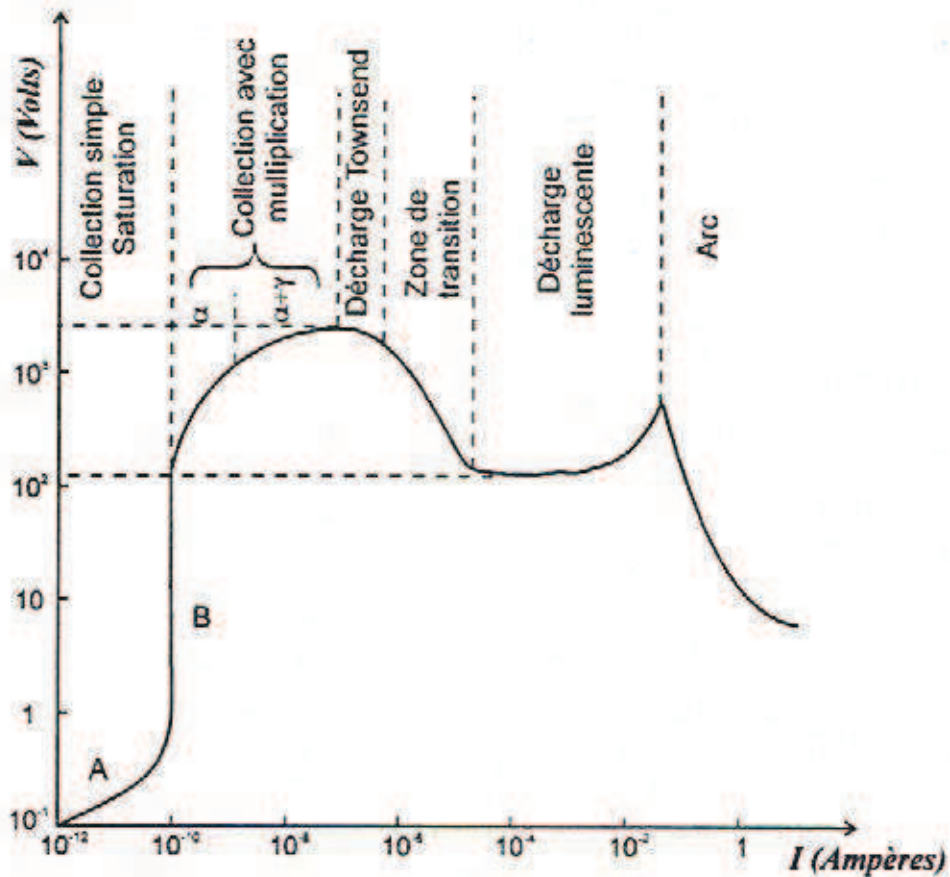


Figure II.1 : Caractéristique schématique de la décharge.

II.3.3. Décharge électrique autonome

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

Au-delà de cette valeur, le gaz devient, le siège d'un ou plusieurs phénomènes produisant les électrons nécessaires à l'entretien de la décharge sans intervention d'un agent ionisant extérieur.

La nature et les conditions d'établissement d'une décharge autonome dépendent de la pression du gaz. Townsend a étudié la transition de la décharge dite non autonome à la décharge autonome, en considérant un ensemble de processus susceptible d'être à l'origine de ce phénomène (figure II.1) [12].

II.3.4. 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 couronnes [13]. 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 naturelle. Elle apparaît lorsque la valeur maximale du champ électrique atteint celle de 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 [14].

Dans une décharge couronne, comme dans toutes les décharges électriques, les espèces créées sont les ions, les électrons, les photons et les espèces excités ou métastables.

La tension d'apparition de l'effet couronne appelée V_0 augmente avec la distance de l'intervalle inter-électrode d et avec le rayon de courbure de la pointe. Pour des grandes valeurs de d , l'augmentation de V_0 est très significative.

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 [15].

II.3.5. La décharge de Townsend

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'électrons obtenu par ionisation est alors accéléré par le champ électrique et peut à son tour ioniser de nouvelles molécules. En 1914, Townsend a proposé l'introduction d'un coefficient d'ionisation α (appelé premier coefficient de Townsend) pour traduire mathématiquement ce phénomène d'ionisation.

Ce coefficient dépend du champ réduit E/N (avec N désignant la densité du gaz) et de $1/\alpha$ 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 $e^{\alpha d}$ électrons au niveau de l'anode. Ce processus est appelé «avalanche électronique».

La relation de Townsend s'écrit alors :

$$I = I_0 e^{\alpha d}$$

Avec:

I : Courant (A).

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

d : Distance inter électrodes (m).

α : Premier coefficient de Townsend (m^{-1}).

La probabilité de produire des électrons secondaires se traduit par l'introduction d'un second coefficient de Townsend γ . Le critère d'auto-entretien de la décharge s'écrit alors:

$$\gamma (e^{\alpha d} - 1) = 1$$

C'est le critère de Townsend.

II.3.6. Tension d'amorçage en champ homogène (loi de PASCHEN)

La tension d'alimentation minimale pour déclencher la décharge est appelé tension de claquage.

Paschen a établi une loi empirique de comportement des gaz, connue sous le nom de loi de Paschen. Cette dernière n'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 [16].

La loi de Paschen est définie par la fonction (figure II.2) :

$$V_d = f(p.d)$$

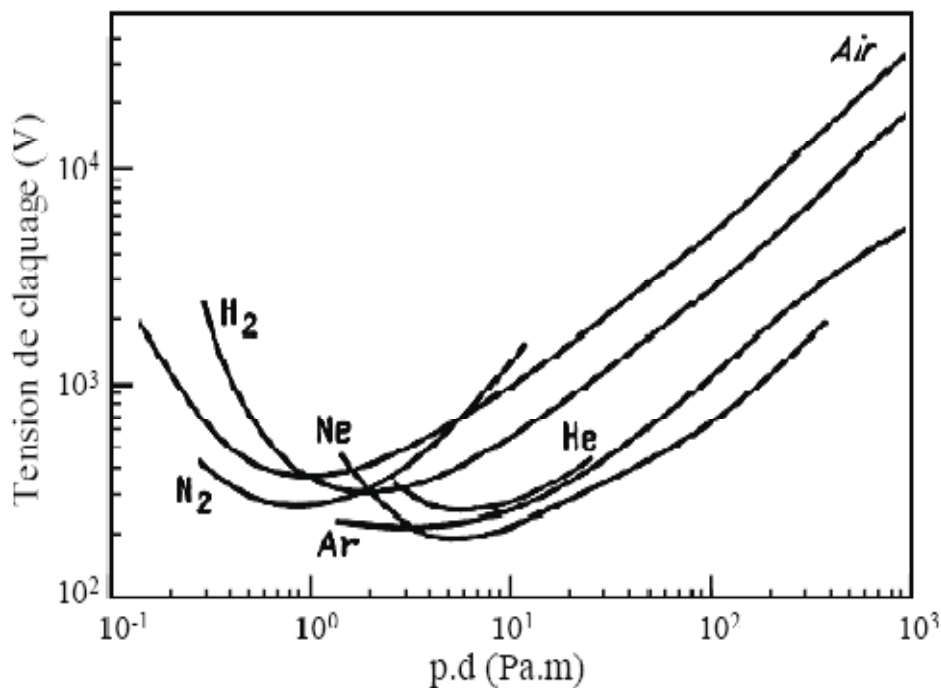


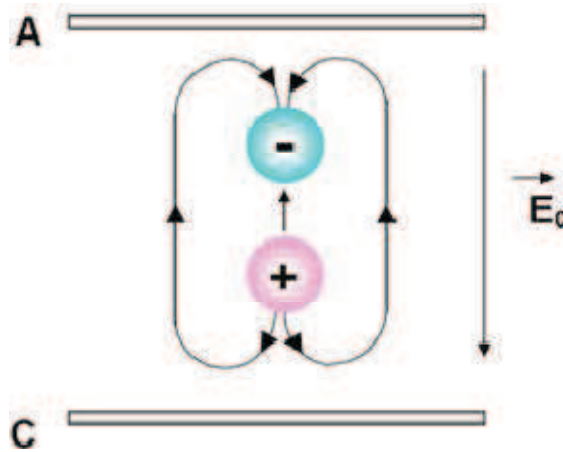
Figure (II.2) : Tension de claquage pour différents gaz en fonction du produit (p.d).

Nous pouvons constater que pour un gaz à pression atmosphérique les courbes passent par un minimum pour une distance inter-électrode d'environ 10 μm (p.d = 0,5 à 5 environ). Cela signifie que, pour la production de décharges à pression atmosphérique dans des conditions d'utilisation usuelles (d ≥ 1 mm), la tension de claquage est une fonction croissante de la distance inter-électrode.

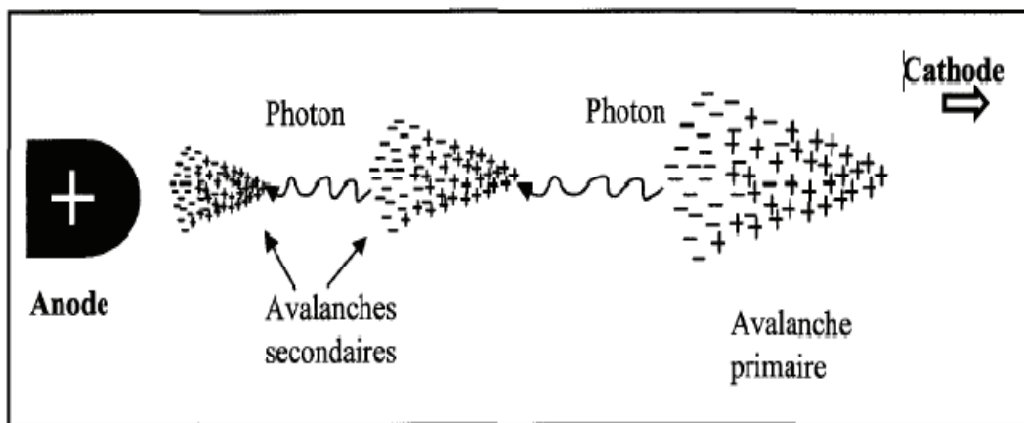
La tension minimale (minimum de Paschen) d'initiation d'une décharge dans l'air en champ uniforme reste inchangée (≈320V) quelle que soit l'augmentation de la température. Cela signifie que ce minimum est « universel » [16].

II.3.7. Mécanisme d'un 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 II.3)[17].



(a)



(b)

Figure (II.3) : Génération d'avalanches secondaires dans un processus de décharge positive (a), (b).

Vers 1940, Graggs, Meek et Raether ont établi une théorie des streamers(ou théorie des décharges filamenteaire) complétées après par les nombreuses approches à caractères essentiellement expérimental.

Chapitre II Les décharges électriques dans les interfaces air/solide

Une avalanche initiée par un électron multiplie exponentiellement le nombre d'électrons en tête de cette avalanche. Ces électrons diffusent et la longueur de l'avalanche s'étend, entraînant une croissance du champ électrique induit par la charge d'espace.

Pour une certaine valeur critique de cette longueur, le champ électrique induit devient comparable au champ électrique extérieurement appliqué. Dès lors, l'avalanche électronique se transforme en streamer.

Les mécanismes de base de cette théorie sont :

- La création d'une avalanche primaire de type Townsend par un électron germe.
- Le renforcement du champ électrique local par la charge d'espace positive laissée par la 1^{ère} avalanche.
- La transition avalanche-streamer lorsque le champ de charge d'espace devient de l'ordre de grandeur du champ électrique appliqué.

II.4. Les décharges électriques de surface d'un isolant solide

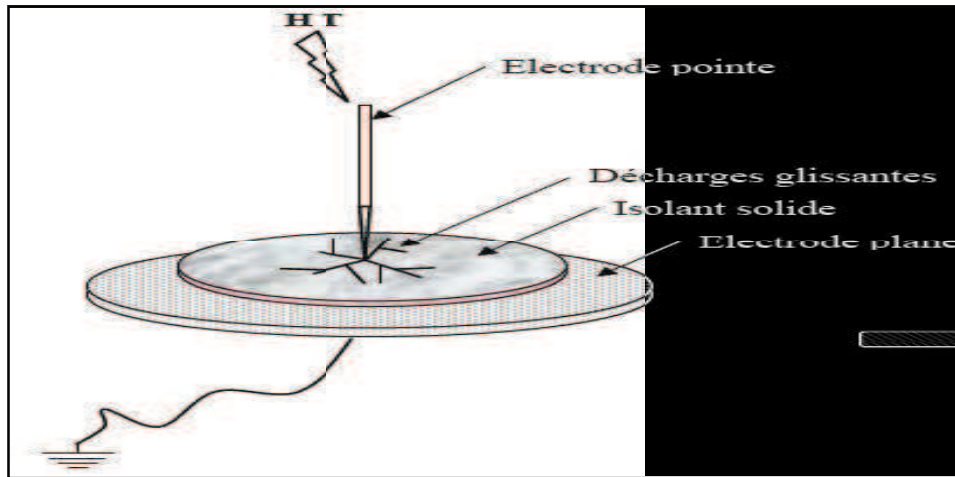
II.4.1. Décharge glissante aux interfaces air/ solide

Lorsque l'épaisseur du polymère est assez grande pour empêcher une perforation en volume ou lorsque ce dernier est utilisé comme barrière dans un intervalle d'air, des décharges peuvent se propager sur la surface du diélectrique solide et contourner. En se propageant, ces décharges peuvent creuser la surface de solide et laisser des traces telles des canaux ramifiés de faible diamètre appelées dans la forme globale « figure de Lichtenberg ». Ces figures prennent toujours naissance du côté de l'électrode acérée.

De point de vue technique, les décharges glissantes sont très nuisibles aux matériaux car la résistivité superficielle diminue pour un certain niveau de tension [18].

Les modalités d'apparition des décharges glissantes dépendent de :

- La structure du champ électrique qui est due à la géométrie du système composé des deux diélectriques (solide et gazeux) et les électrodes.
- La polarité et la forme de la tension appliquée.
- La nature et l'état des deux diélectriques utilisés :

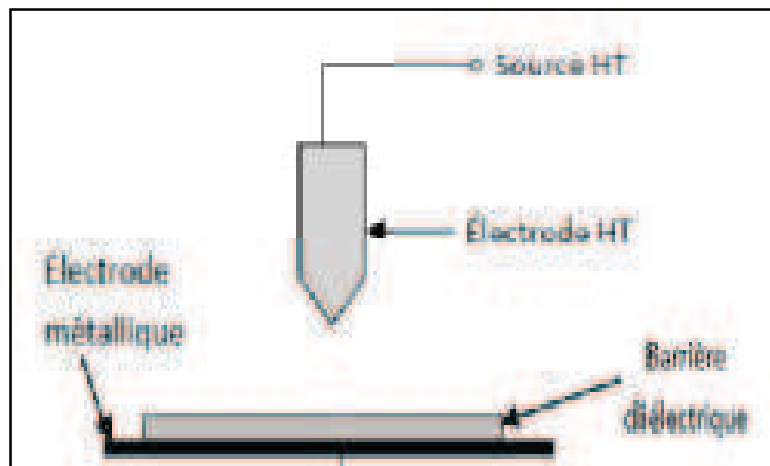


Figure(II.3.a) : Système à décharges glissantes [19].

II.4.2. Décharge à barrière diélectrique

On appelle décharge à barrière diélectrique(DBD), toute configuration de décharge pour laquelle, l'une ou les deux électrodes sont recouvertes d'un diélectrique. Celui-ci peut être constitué de verre, de céramique, ou d'une matière polymère.

De manière générale, dans ce type de décharge, l'une des deux électrodes est reliée à la terre, l'autre est reliée à l'alimentation électrique. En configuration diélectrique simple, c'est l'électrode est reliée à la terre qui supporte le diélectrique.



Figure(II.3.b) : Décharge à barrière diélectrique, système pointe-plan

Deux types de (DBD) peuvent être distingués.

II.4.2.1. Décharge volumique

Les décharges à barrière diélectrique volumique utilisent généralement des tensions alternatives à valeur moyenne nulle. Elles s'établissent entre deux électrodes séparées l'une de l'autre par un isolant.

a. La décharge silencieuse

La DBD, également appelée décharge silencieuse, peut créer un plasma non thermique très actif dans une large gamme de pression et a été largement utilisée comme source d'UV. Le diélectrique joue le rôle d'un condensateur en série avec le plasma, ce qui a un effet stabilisateur conduisant à un grand nombre de micro décharges et de petites impulsions dans tout l'espace inter-électrodes.

b. La décharge lumineuse homogène

Les décharges luminescentes à pression atmosphérique, ont récemment attiré l'attention des chercheurs parce qu'elles présentent un intérêt particulier dans beaucoup de disciplines scientifiques comme la chimie analytique, la biologie, la médecine et les technologies de reproduction d'images. Ce type de décharge peut être obtenu dans l'air à pression atmosphérique en appliquant des champs électriques de quelques dizaines de kV/cm à des fréquences de l'ordre du kHz et avec des distances inter-électrodes de 0.5 à 3cm.

II.4.2.2. Décharge surfacique

A la fin des années aux Etats-Unis, Roth, a mis au point une nouvelle configuration de décharge à barrière diélectrique de surface. L'objectif est d'appliquer sa décharge comme actionneur pour contrôler un écoulement. Cette décharge est établie entre au moins deux électrodes placées de part et d'autre d'un diélectrique : elle est dite surfacique car il n'y a plus, comme précédemment, d'espace gazeux entre les électrodes (le diélectrique occupe tout l'espace inter-électrodes).

Les électrodes sont des plaque très fines est distantes de quelques millimètres. Une haute tension sinusoïdale à valeur moyenne nulle est appliquée entre les électrodes posées sur la face supérieure du diélectrique et l'électrode de face inférieure reliée à la terre [11].

II.4.3. Les décharges partielles

Dans un isolant qui comporte des cavités, des décharges électriques peuvent se manifester pour une tension qui excède une valeur critique : on parle alors de décharges partielles. Donc une décharge

partielle est une décharge électrique dont le trajet se développe sur une partie seulement de l'intervalle isolant séparant des conducteurs placés à des potentiels différents. Elles prennent naissance aux bord des électrodes ou dans des inclusions ou cavités gazeuse que peut renfermer le matériau dès que la tension appliquée atteint la tension seuil correspondant au minimum de Paschen du gaz en présence (air ou autre).

Leur action peut conduire à des transformations chimiques radicales entraînant la dégradation progressive de l'isolation [9].

Si on applique aux bornes de l'isolant une tension, la différence de potentiel aux bornes de la cavité dépend de la valeur de la tension appliquée à l'ensemble, de la nature même du matériau, de la géométrie du défaut, des conductivités superficielle et volumique de l'isolant.

II.5. Paramètres influent sur les décharges de surface

Des études expérimentales ont montré que plusieurs paramètres peuvent influencer le développement de la décharge superficielle dans un système d'électrode.

II.5.1. La résistivité superficielle

Il s'agit là d'une des principales caractéristiques des matériaux, car la variation de ce paramètre a des conséquences importantes au niveau des pertes diélectrique.

Pour définir ce paramètre, on est amené à définir la résistance superficielle. En effet, la résistance superficielle (R_s) mesurée entre les deux électrodes est le rapport de la tension continu appliquée par le courant qui parcourt la mince couche de l'humidité qui pourrait exister à la surface de l'isolant, et dans les couches superficielles de ce dernier. D'où la définition de la résistivité d'un matériau isolant comme étant une résistance superficielle par unité de surface, elle s'exprime en $\Omega.cm$

$$\rho_s = R_s \cdot S/d$$

Ou :

R_s : Résistance superficielle [Ω]

S : Section de l'électrode [cm^2]

d : Distance inter électrode [cm]

II.5.2. La permittivité relative

La permittivité relative caractérise les propriétés macroscopiques du matériau, lorsqu'un diélectrique est soumis à l'action du champ électrique, il se produit à l'échelle moléculaire diverses modification, qui ont pour effet de créer un champ électrique extérieur comme dans le cas d'un milieu conducteur. Dans la deuxième loi de Toepler, il existe une relation entre l'épaisseur et la permittivité du diélectrique de la plaque isolante. Lorsque la tension appliquée sur l'électrode pointe dépasse un certain seuil(V_s), celle-ci est en fonction de la capacité surfacique du matériau diélectrique qui suit une loi de forme :

$$\varepsilon_r = \frac{C \cdot e}{\varepsilon_0}$$

ε_r : Permittivité relative.

C : Capacité (F).

e : Epaisseur du matériau (m).

ε_0 : Permittivité de vide (F /m)

II.5.3. Paramètres géométriques

➤ L'état de surface des électrodes

Après une multitude de décharges, une électrode plane peut présenter des rugosités qui se résultent par les impacts de la décharge ou par l'oxydation du métal. Ces anomalies qui peuvent atteindre 10 μm , renforcent le champ électrique au voisinage de la surface, ce qui a pour effet d'augmenter localement l'efficacité d'ionisation et d'excitation du gaz. Un manque de nettoyage de la surface des électrodes, pendant les manipulations, peut créer des aspérités sur le métal ou un dépôt de particules conductrices.

Du point de vue de la modélisation des défauts de surfaces, les aspérités sont habituellement représentées par des forme géométrique simple : hémisphériques, semi-elliptiques, en lame de rasoir, etc. Ceci afin de faciliter le calcul du champ électrique.

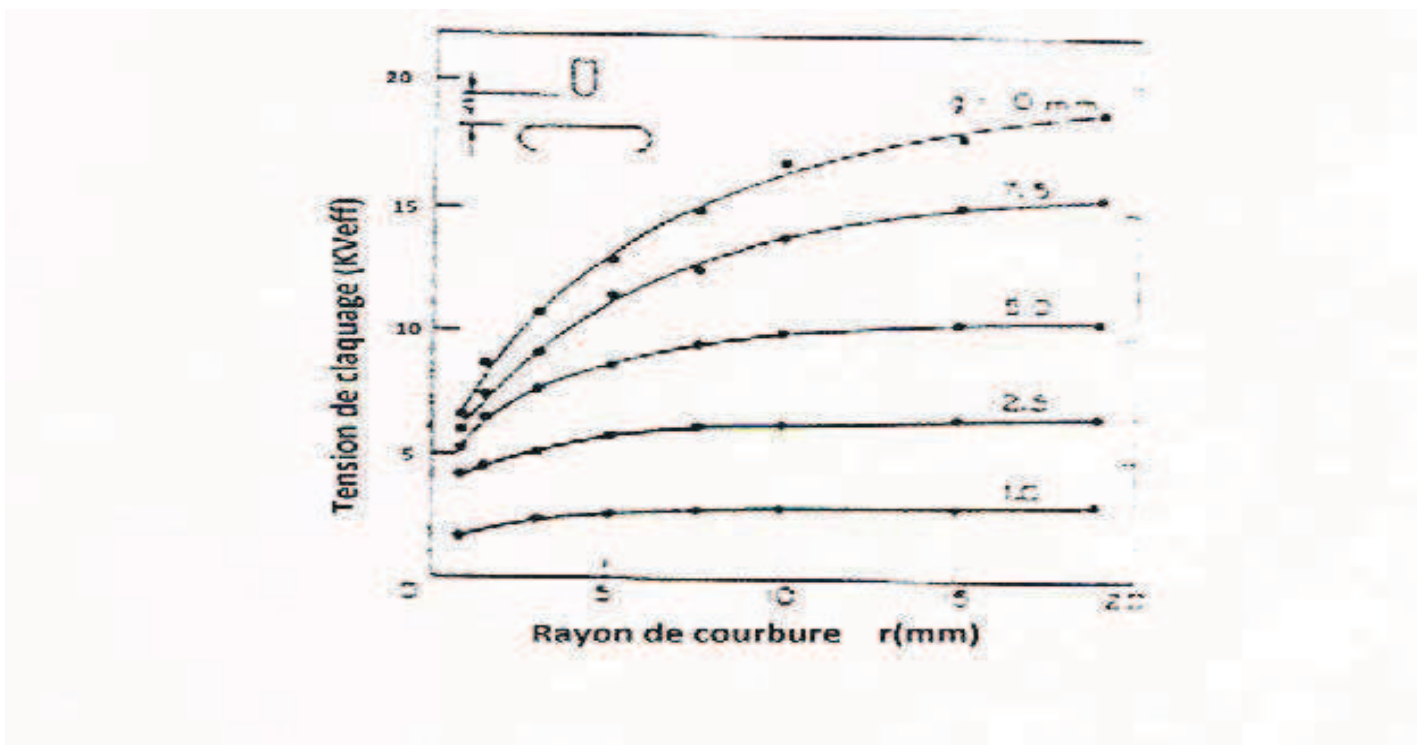
La taille de ces protubérances étant forcément variable, ce sont les plus importantes qui vont constituer un passage préférentiel pour le courant de décharge.

Chapitre II Les décharges électriques dans les interfaces air/solide

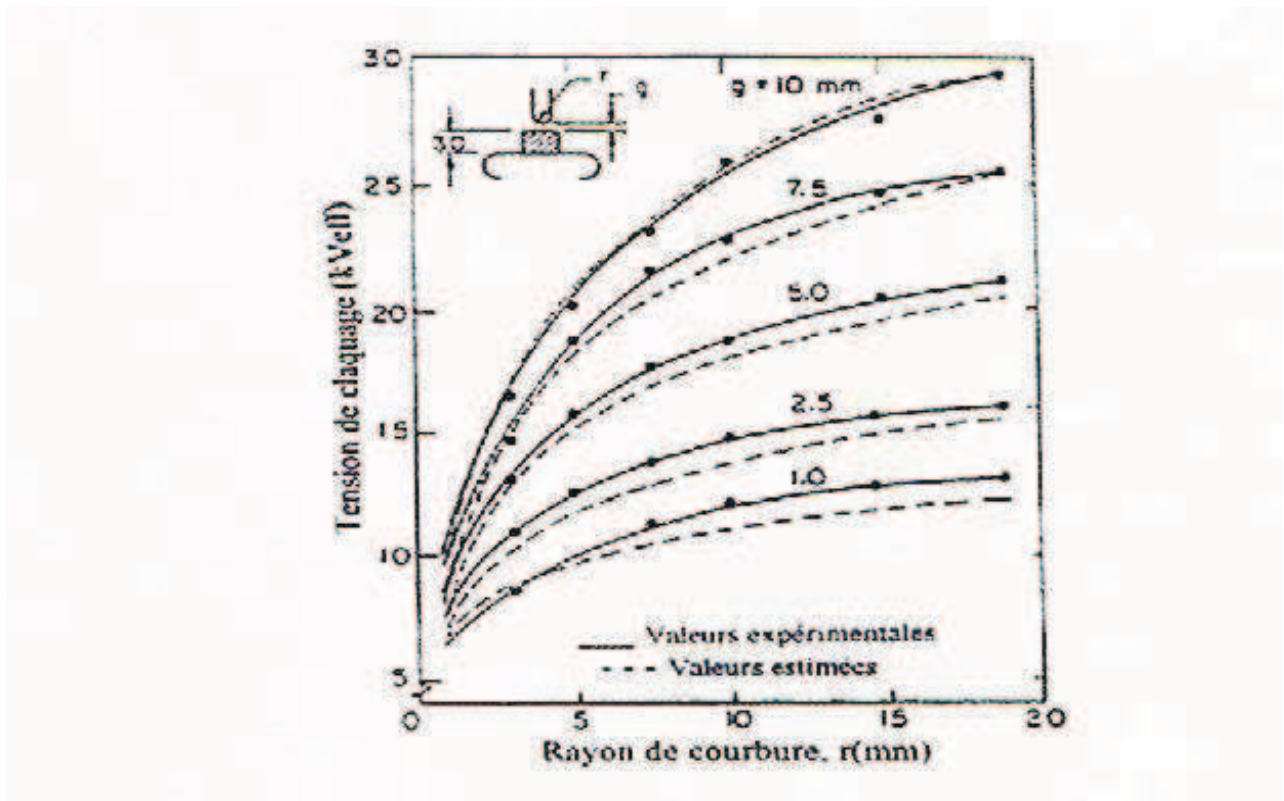
Tout se passe alors comme si l'espace inter électrodes étant court-circuité par quelques décharges intensives.

➤ Rayon de courbure de la pointe

La rigidité diélectrique d'un intervalle d'air, avec et sans isolant solide est améliorée avec l'augmentation du rayon de la pointe, ceci est dû au fait que le champ électrique, au niveau de la pointe, est d'autant plus faible que le rayon de courbure de la pointe est grand. On montre ça dans les figures (II.4.a) et (II.4.b).



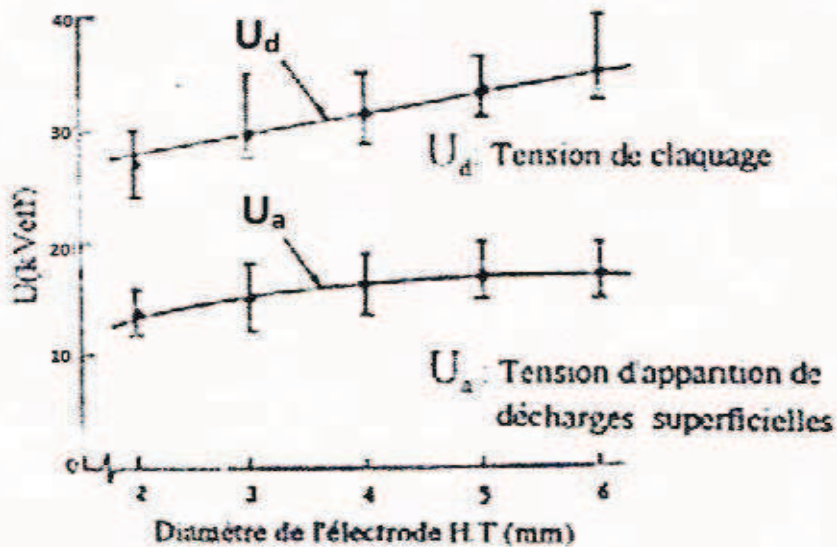
Figure(II.5.a) : Influence du rayon de la pointe sur la rigidité diélectrique d'un intervalle d'air



Figure(II.4.b) : Influence du rayon de courbure de la pointe sur la rigidité diélectrique d'une isolation composé solide/air

➤ **Diamètre de l'électrode haute tension**

La figure (II.5) illustre bien la variation de la tension de décharges superficielles et la tension de claquage en fonction de diamètre de l'électrode active dont on constate que ces tensions évoluent avec le diamètre. Cette augmentation serait due à la diminution de la concentration du champ avec le diamètre de l'électrode active.



Figure(II.5) :L'influence du diamètre de l'électrode HT sur la rigidité diélectrique du système solide/air

➤ La distance inter électrode

La tension de claquage des intervalles air seul et air / solide varie avec l'augmentation de l'espace inter électrode, les variations dans la tension de claquage sont beaucoup plus prononcées dans l'interface air / solide que dans l'intervalle d'air seul.

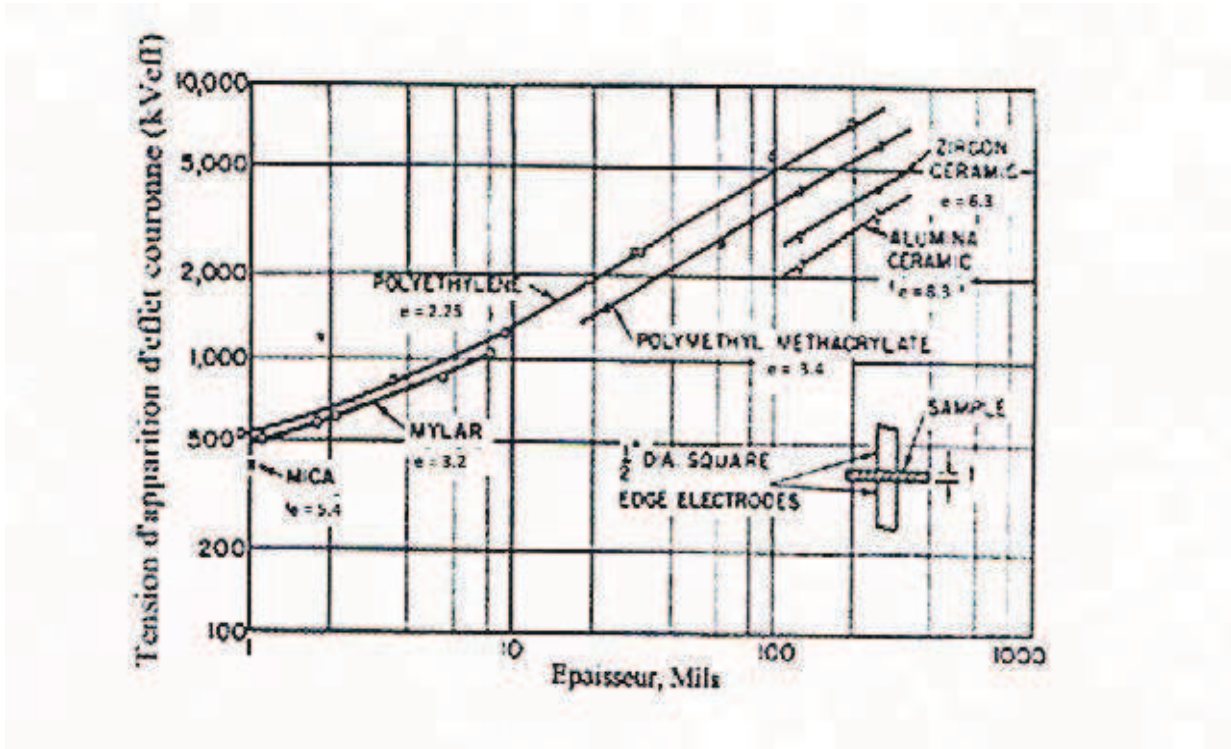
Cette amplification importante comparée au cas d'un intervalle air seul s'explique par le fait que l'insertion d'une surface diélectrique entre les électrodes empêche l'installation d'un canal d'arc localisé permettant ainsi l'obtention d'une décharge beaucoup plus étalée et homogène dans l'espace inter électrode. L'émission d'électrons secondaires importante à la surface diélectrique favorise aussi cet écart.

➤ L'épaisseur de l'isolant

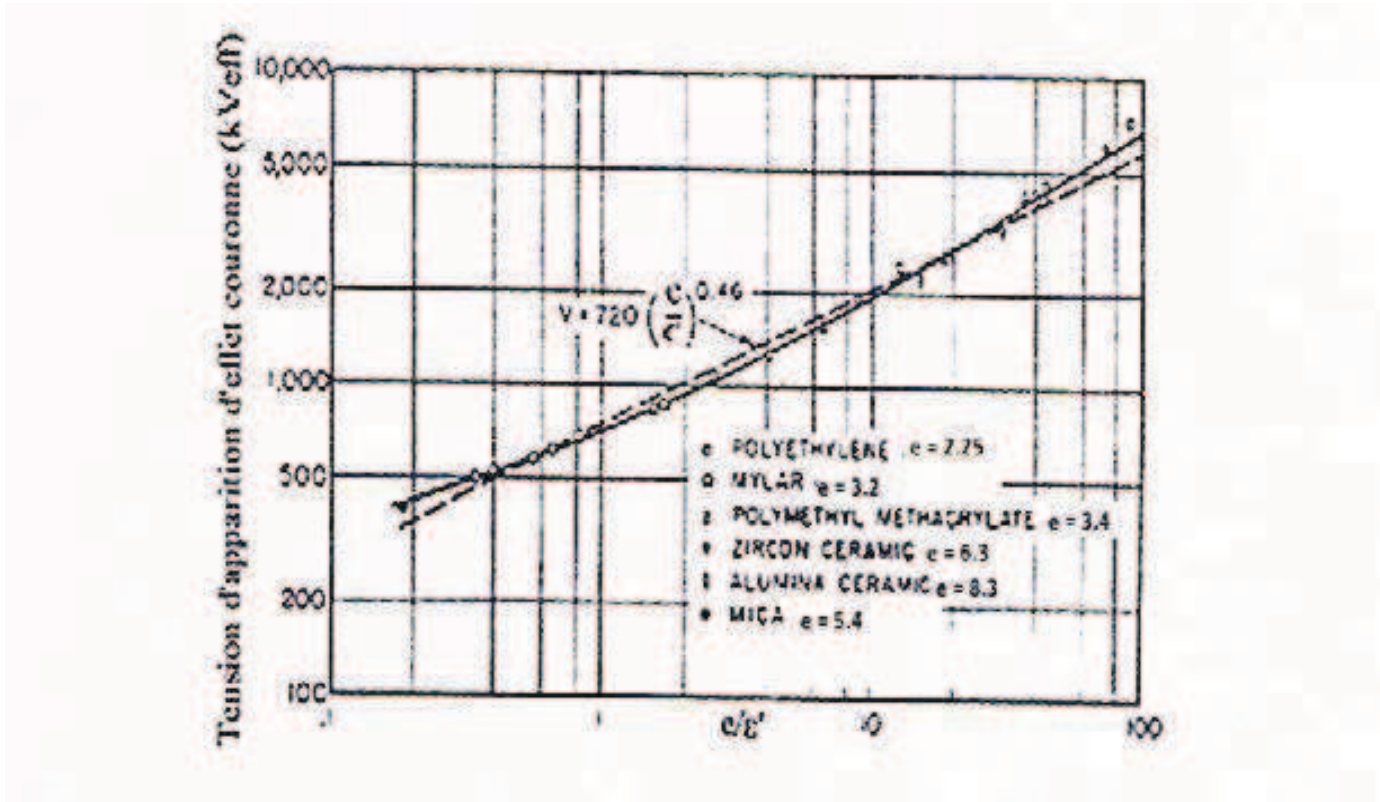
L'épaisseur d'un isolant influe sur la rigidité diélectrique d'un système, cette influence varie selon la nature de la tension appliquée et de la nature du matériau (permittivité). On constate que la tension de seuil augmente avec l'épaisseur quelque soit la nature du matériau et la distance inter électrodes.

Chapitre II Les décharges électriques dans les interfaces air/solide

En général, la rigidité des systèmes composés solide/air s'exprime en fonction de l'épaisseur efficace (e/e_r), celle-ci augmente avec l'épaisseur de l'isolant solide, quelque soit la nature de la tension appliquée et du matériau figures (II.6.a) et (II.6.b).



Figure(II.6.a) : Tension d'apparition des décharges couronne en fonction de l'épaisseur pour différentes valeurs de la permittivité



Figure(II.7.b) : Tension d'apparition de décharge couronne en fonction de l'épaisseur efficace

➤ La forme de l'électrode

La distribution du champ électrique dans l'espace inter électrodes avant l'amorçage de la décharge, dépend de la configuration géométrique des électrodes utilisées.

En champ non homogène, comme c'est le cas en géométrie pointe-plan, la décharge couronne présente une zone de stabilité, ce type de décharge est caractérisé par une tension de seuil V_s de son apparition et une tension V_a de sa transition vers l'arc électrique.

En champ homogène dès son apparition, la décharge transite rapidement vers l'arc électrique. Autrement dit la décharge couronne n'existe pas et la tension V_s et V_a sont confondues [20].

II.6. Le vieillissement

On appelle vieillissement tout phénomène d'évolution lente et irréversible de la structure et de la composition d'un matériau sous l'effet de son instabilité propre, mettant en jeu son bon fonctionnement. Ces changements des caractéristiques sont tels qu'ils soumettent l'isolation à un risque de rupture prématuré dans le temps [9].

On distingue deux types de vieillissement :

II.6.1. 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.

Des réactions électrochimiques peuvent également conduire à une dégradation des propriétés du matériau. Dans certaines circonstances il apparaît des arborescences électrochimiques.

Parmi les phénomènes qui provoquent le vieillissement chimique on trouve :

- **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.

- **Hydrolyse**

Sous l'influence de l'humidité ($\geq 95\%$) et de la température (au moins 100°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.

- **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.

- **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 monomères.

- **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.

- **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.

II.6.2. 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.

- **Vieillessement 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 matériau 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.

- **Vieillessement 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.

- **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 [19].

II.7. Les configurations géométriques des électrodes

La distribution du champ électrique dans l'espace inter électrodes, avant l'amorçage de la décharge, dépend de la configuration géométrique des électrodes et de la constitution de l'isolation [19].

II.7.1. Configuration pointe – plan

Parmi les configurations qui favorisent l'apparition de l'effet couronne : la configuration pointe-plan au sein de laquelle, par l'application des charges d'espace, un champ électrique non homogène apparaît dans l'intervalle gazeux sous certaines conditions de pression et de température. Le système pointe-plan est représenté par la figure (II.8).

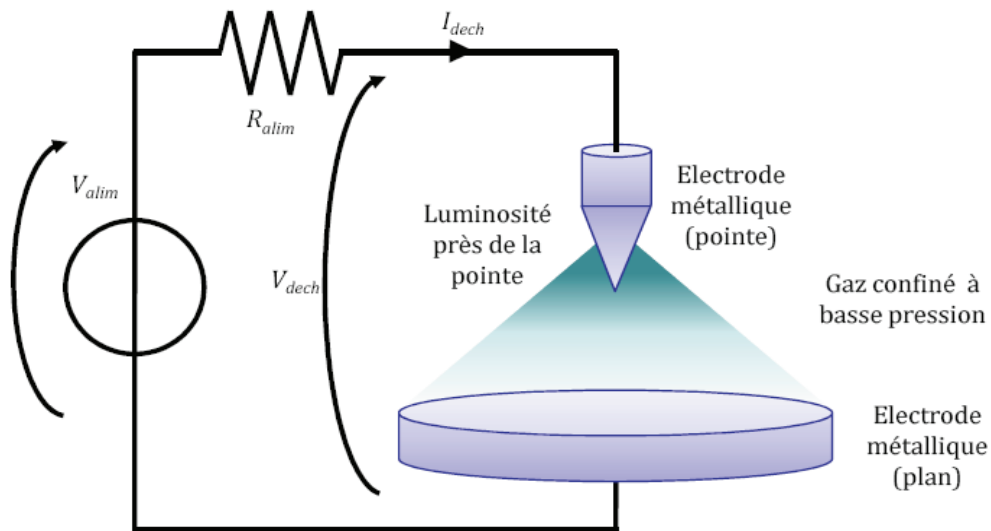


Figure (II.7) : Système de configuration pointe-plan

Plusieurs relations ont été établies pour décrire ce champ en tout point sur l'axe de la cathode. Dans le cas d'une approximation hyperboloïde-plan, Bennett propose l'expression suivante du champ [21] :

$$E(x) = \frac{2 \cdot v}{r \cdot \log \frac{(4 \cdot d)}{r}} \cdot \frac{r}{r + x}$$

Adamec estime le champ comme suit :

$$E(x) = \frac{2 \cdot v \cdot d}{(r \cdot d + 2 \cdot x \cdot d - x^2) \log \frac{(4 \cdot d)}{r}}$$

Hartmann propose récemment la formule suivante :

$$E(x) = \frac{4 \cdot v}{x + \frac{r}{2} \log \frac{(2d+r)}{r}}$$

Avec :

r : est le rayon de la pointe (cm).

d : la distance inter électrode (cm).

v : la tension appliquée (kV).

x : la distance à la pointe (cm).

II.7.2. Configuration sphère-plan

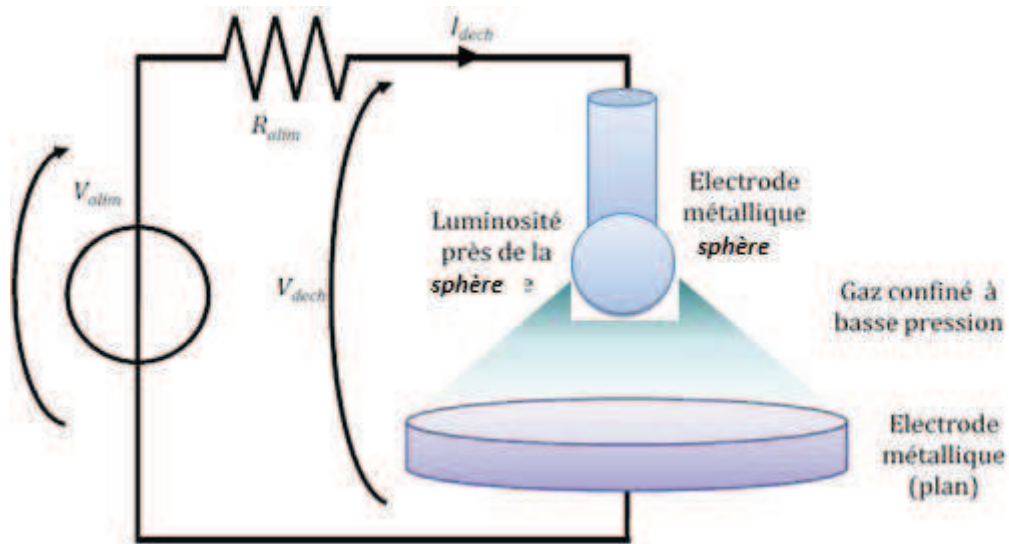


Figure (II.8) : Système de configuration sphère-plan.

II.8. Conclusion :

Ce chapitre a fait l'objet d'une étude bibliographique sur les décharges électriques dans le cas général. Nous avons parlé sur les différentes décharges électriques dans les gaz et dans les solides et les phénomènes qui leurs sont associés, nous avons également donné les différents paramètres influençant sur les décharges de surface et les géométries des électrodes avec lesquelles on va faire les essais, on a parlé sur la contrainte électrique appliquée à la surface d'un isolant solide qui provoque son vieillissement.

Chapitre III

**Dispositifs expérimentaux et le
matériau étudié**

III.1. Introduction

Ce chapitre est consacré aux travaux expérimentaux sur le PMMA au niveau du laboratoire de haute tension. L'objectif est d'étudier les courants de décharges et l'influence du vieillissement électrique sur les propriétés physique du PMMA.

Nous analyserons les courbes de courant de décharge enregistrées à l'aide d'un oscilloscope à mémoire, et nous étudierons l'influence de la géométrie des électrodes, l'épaisseur de la couche d'air et le temps de vieillissement sur le PMMA à l'aide des analyses par le MEB (Microscope à balayage électronique).

III.2. Le PMMA

Le polyméthacrylate de méthyle (PMMA) appelé Plexiglas par la compagnie chimique Rohm and Haas est un polymère thermoplastique. Le PMMA est obtenu par polymérisation radicalaire. La cohésion est assurée par des enchevêtrements de chaînes ainsi que des liaisons faibles de type hydrogène et Van der Waals. La température de transition vitreuse du PMMA se situe entre 115 et 135°C, et la transition b se situe vers les 200°C. Le PMMA est un matériau qui présente une excellente transparence. Le PMMA est un polymère très répandu qui a fait l'objet de nombreuses études ce qui en fait un polymère modèle [22].

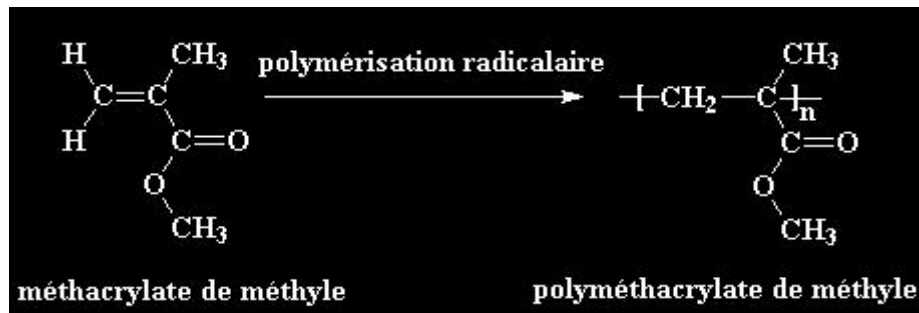


Figure (III.1) : PMMA

III.2.1. Différents PMMA

a. PMMA choc

Pour renforcer les propriétés choc du PMMA, tout en restant transparent, on ajoute un élastomère à base d'acrylate de butyle préparé en polymérisation en émulsion dont l'indice de réfraction est proche de celui du PMMA.

b. PMMA chaleur

L'acide méthacrylique est utilisé pour améliorer la tenue thermique de la pièce finie.

III.2.2 Structure

a. Copolymère de méthacrylate de méthyle

Ce sont des copolymères amorphes de masse molaire moyenne en poids de 70 000 g/mol à quelques millions pour les polymères obtenus par le procédé plaques coulées. Ce qui correspond respectivement à 700 et 10 000 unités de méthacrylate de méthyle par macromolécule.

Le PMMA est transparent, rigide, stable aux vieillissements mais cassant.

b. PMMA choc

C'est aussi un polymère amorphe constitué de deux phases distinctes : l'une continue (matrice) de poly (méthacrylate de méthyle) et l'autre discontinue comprenant des modules de copolymères statistiques de poly (acrylate de butyle) et de polystyrène dispersés dans la matrice de PMMA et dont la taille varie en général de 0.1 à 0.3 μm . Le PMMA choc est transparent car les deux phases ont les mêmes indices de réfraction. La résistance aux chocs est aussi une conséquence de cette structure à deux phases. Lors d'un choc, chaque nodule d'élastomère est capable d'absorber une certaine quantité d'énergie et de ce fait participer à l'arrêt de la fissure [23].

III.2.3. Propriété du poly méthacrylate de méthyle

a. Propriétés physique du PMMA

- Le PMMA est surtout connu pour ses propriétés optiques exceptionnelles. Ce polymère amorphe est d'une transparence remarquable, dont la visibilité est environ 380 à 780 nm, l'absorption de lumière n'atteint que 50% pour une épaisseur de 3 mm.

- Le PMMA se colorie aisément y compris dans des teintes fumées pour vitrage.
- Le PMMA est hygroscopique : l'absorption d'eau en 24 h atteint 0.25%.
- Le PMMA a une densité de :
1,195 à 1,200
1,190 à 1,200
1,18 à 1,19
- Le PMMA a d'excellentes résistances aux agents atmosphériques [24, 25].

b. Propriété mécaniques du PMMA

Le PMMA est un polymère amorphe dont la température de transition vitreuse varie de 110 à 135°C selon les produits, c'est à dire qu'à température ambiante il sera dur, rigide, cassant avec faible allongement.

- fluage : son fluage est assez limité. Au-delà de contraintes critiques, le PMMA est sujet au fendillement (casing). ce phénomène est même accentué en présence d'agents agressifs (alcools, essences...).
- Choc : la résistance au choc est relativement faible et le polymère est cassant.
- Dureté : le PMMA se raye et les entretiens répétés peuvent altérer la qualité de surface mais inversement il se polit très facilement.
- Son module d'élasticité en traction est de 7.7 à 13 Gpa.
- Sa contrainte de la rupture en traction est de 65 à 77 Mpa.
- Son module de flexion est de 2,28 à 3.32 Gpa.
- Sa contrainte de la rupture en flexion 84 à 110 Mpa.
- Excellente tenue aux ultra-violets d'où une bonne résistance au vieillissement [23], [25], [26].

c. Propriétés électriques

- Le PMMA est électrostatique, ce qui peut nuire à sa présentation (attraction de poussière), on peut pallier cet inconvénient en utilisant le PMMA avec des produits antistatiques qui migrent en surface et le recouvre d'une couche conductrice.
- La résistance à l'arc excellente.
- La résistance superficielle 10^{15} - 10^{16} Ω .cm.
- Permittivité relative à 50 Hz : 3.3 à 3.9 .
- Le facteur de dissipation diélectrique ($\tan\delta$) à 50 Hz : 0.04 à 0.05 [24], [26], [27].

d. Propriétés thermiques

- Le PMMA est combustible et brule lentement sans fumée excessive.
- La température maximale d'utilisation est faible $< 800^{\circ}\text{C}$.
- La température de fusion est de 130 à 140°C .
- La température de transition vitreuse est de 110 à 135°C .
- La température de résistance continue est de 850°C .
- La conductivité thermique : 0.19W/m.K .
- Le coefficient de dilatation thermique : $0,7$ à $0,8$ [27].

e. Propriétés chimiques

- Le PMMA est insipide et sans odeur et reconnu pour ses qualités alimentaires.
- Jusqu'à 600°C , le PMMA reste assez bien aux acides organiques et minéraux dilués ainsi qu'aux solutions alcalines diluées mais il est attaqué par les produits courants comme : l'acétone, l'alcool, le pétrole, le phénol, le carburant d'avion, le méthanol à 30%,...etc.
- Le PMMA peut être exposé à l'extérieur sans problème.
- Les résistances aux intempéries sont très bonnes [24], [28].

f. Propriétés optiques

- L'angle de réflexion totale sur une surface intérieure est de 41 à 42°, ce qui permet la réalisation de « conducteurs » de lumière, fibre optiques.
- Son indice de réfraction (pour $\lambda=587,7$ nm hélium) est de 1,491 ce qui en fait un matériau adapté à la fabrication optique.
- La transparence : 92% de lumière transmise pour une épaisseur de 3mm [24].

j. Propriétés acoustiques

- La vitesse de propagation dans le PMMA est : 2,85-10,5 cm/s [25].

h. Propriétés de mise en œuvre

- Coulée : la polymérisation se fait entre des plaques de 3 m x 2 m au plus. On obtient des plaques d'épaisseurs comprises entre 1 mm et 20 mm.
- Injection : compte tenu de la viscosité élevée du PMMA, les températures sont de l'ordre de 250-300°C. les pressions atteignent 1500bars. L'injection multicolore par transfert dans plusieurs moules est aisée.
- Extrusion : elle permet d'obtenir des plaques, des feuilles, des tubes, des joncs.
- Thermoformage : après réchauffe préalable (140 à 160°C) de plaques coulées ou extrudées, le PMMA thermoforme aisément au-dessus de la température de transition extrudées, le PMMA, une fois transformé, se façonne facilement.
- Soudage : le PMMA se soude par soudage haute fréquence, gaz chaud et ultrasons.
- Collage : il s'effectue soit avec des solvants exemples : solvants chlorés, chloroforme, soit avec des colles dissoutes dans des solvants, soit avec des colles polymérisables.
- Usage : L'usinage du PMMA est facile à condition d'éviter les chocs.

III.2.4. Utilisation du PMMA

Le PMMA est utilisé dans de multiples domaines allant des loisirs au bâtiment et l'aéronautique. Ses principales utilisations sont les suivantes:

- Les applications industrielles : cadrans, hublots et capots de machines à laver, chaînes hifi, portes de fours à micro-ondes, les écrans de contrôle industriel, les synoptiques de contrôle de trafic routier et ferroviaire.
- L'ameublement et décoration : salons, tables, ébénisterie, escaliers, mobiliers hospitaliers, couveuses.
- Le sanitaire : baignoires, bacs à douche, lavabos (pièces thermoformées et colorées) [28].

III.2.5. Les avantages et les inconvénients du plexiglas

III.2.5.1. Avantages

Les avantages du plexiglas sont :

- Transparence exceptionnelle.
- Bonne tenue aux ultra-violets.
- Surface brillante.
- Possibilité de coulée.
- Facile à coller.
- Excellentes propriétés optiques.
- Bonne résistance aux chocs.

III.2.5.2. Inconvénients

- Les inconvénients du plexiglas sont :
- Cassant, fragile, rayable.
- Faible tenue en température limitée (80°C).
- Résistance chimique très moyenne.
- Fendillement sous charge possible.

- Faible résistance aux hydrocarbures et aux solvants.
- Inflammabilité.
- Attraction de poussières [26, 27].

III.3. Laboratoire de la haute tension

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

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

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



Figure(III.2) : Transformateur d'essais

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



Figure(III.3) : Pupitre de commande

III.4. Montage expérimental destiné pour la mesure des courants de décharges

III.4.1. Montage expérimentale

Le dispositif expérimental utilisé dans notre étude est montré dans la figure(III.4). L'alimentation haute tension est assurée par un transformateur d'essai monophasé placé dans une cage de Faraday dont les caractéristiques sont : $U = 100 \text{ kV}$, $f = 50 \text{ Hz}$, $P = 10 \text{ kVA}$. La variation de la tension se fait à l'aide d'un autotransformateur qui se trouve au niveau du pupitre de commande. Les décharges glissantes sont obtenues à l'aide de deux systèmes d'électrodes, pointe-plan et l'autre sphère- plane. L'électrode pointe(ou sphère) est reliée à la borne haute tension du transformateur d'essai, et l'électrode plane à la terre. L'ensemble est placé dans l'air.

Toutes les masses sont mises à la même terre avec des câbles coaxiaux pour éliminer les parasites qui peuvent influencer les mesures.

Les échantillons de solide isolant que nous utiliserons sont de forme d'un disque de diamètre de 3cm et d'épaisseur de 3mm en poly méthacrylate de méthyle (PMMA). Nous avons collé une couche conductrice en forme d'un disque au milieu de l'échantillon de PMMA (figure.III.5) pour mesurer les courants de décharges, et pour chaque essai, nous utiliserons un échantillon différent.

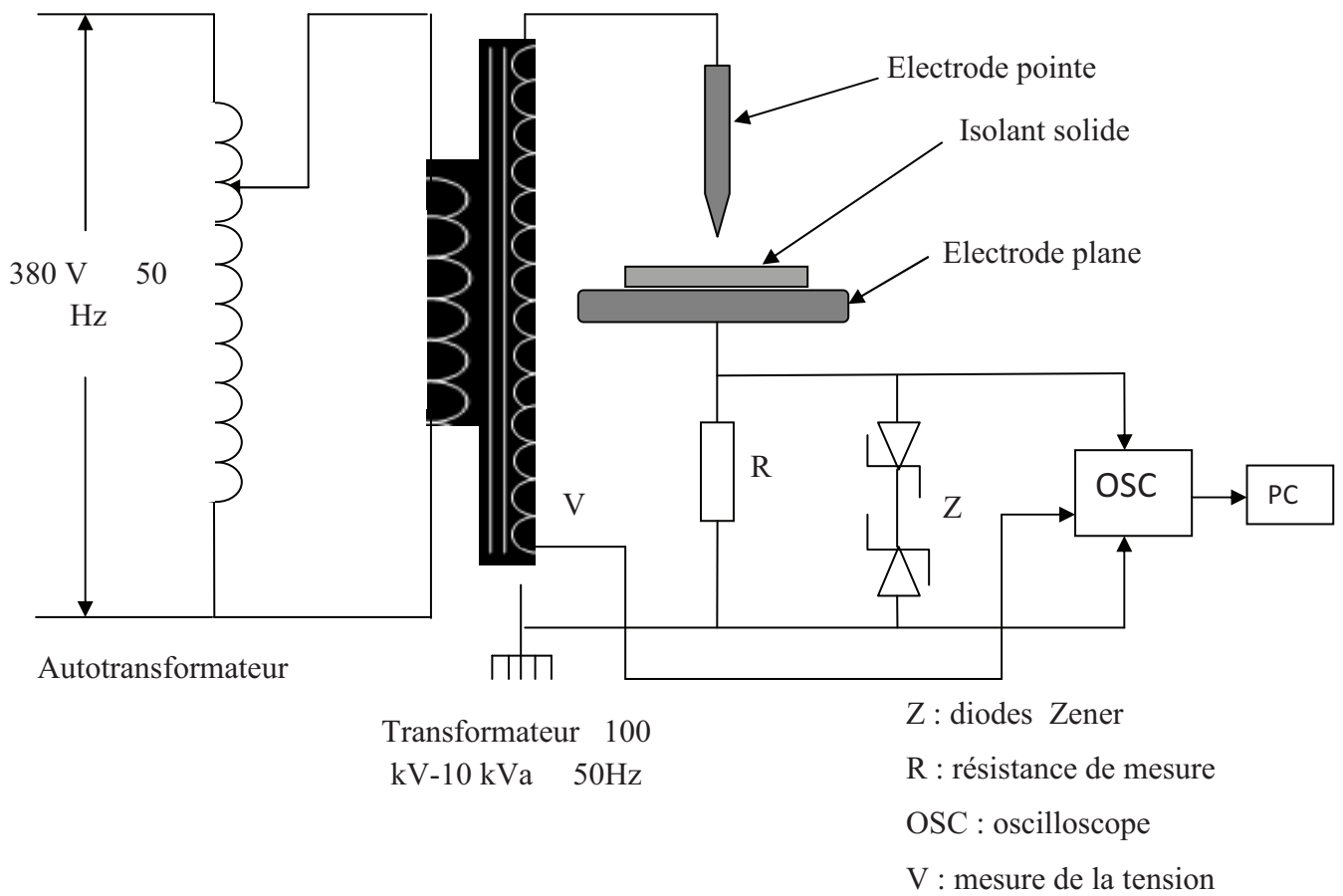


Figure (III.4) : Schéma du dispositif expérimental



Figure(III.5): PMMA avec une couche de résine conductrice.

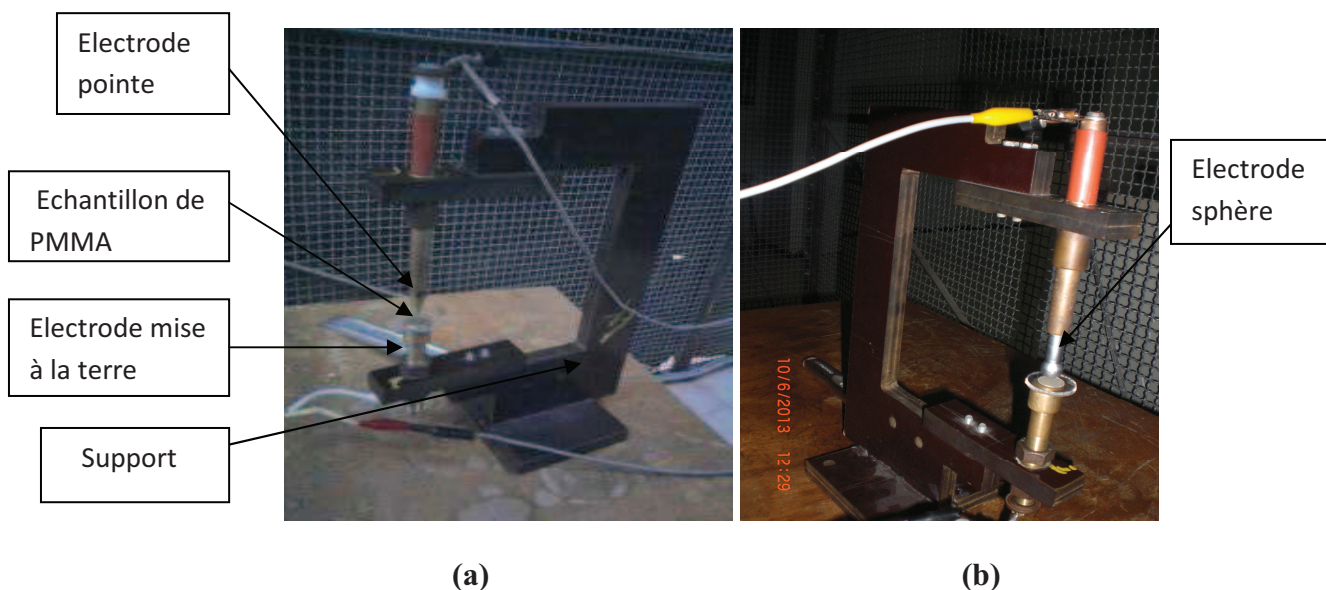
Pour étudier le courant de décharge de surface, nous avons utilisé un oscilloscope à mémoire que nous avons branché aux bornes d'une résistance $R = 940 \Omega$. L'oscilloscope à mémoire offre l'avantage de faciliter l'acquisition de signaux de fréquence élevée. Les informations obtenues et enregistrées par l'oscilloscope sont transmises via une interface RS 232 à un ordinateur pour y être traitées.

Pour assurer la protection de l'oscilloscope contre une éventuelle surtension, nous avons placé des diodes Zener en tête bêche qui court-circuiteront la résistance de mesure R dès que la tension atteindra une valeur limite qui a été fixée à ses bornes. La tension d'entrée admise est de $400 V_{MAX}$.

L'oscilloscope est utilisé en mode dual pour visualiser simultanément la tension appliquée à l'échantillon et le courant de décharge et en mode single pour enregistrer la forme des impulsions de courant. Pour chaque niveau de tension nous enregistrerons en mode numérique l'impulsion de plus grande amplitude.



Figure (III.6) : Ensemble des appareils de mesure des courants de décharges



Figure(III.7) : Système d'électrodes. (a) : Pointe- plan
(b) : sphère-plan

III.4.2 Présentation du logiciel

Nous possédons la version 2.19 du logiciel appelé SP107E, qui sert à importer et analyser (décomposition du signal en série de fourrier) les mesures de l'oscilloscope dans un ordinateur. La figure (III.8) présente une vue général de ce logiciel.

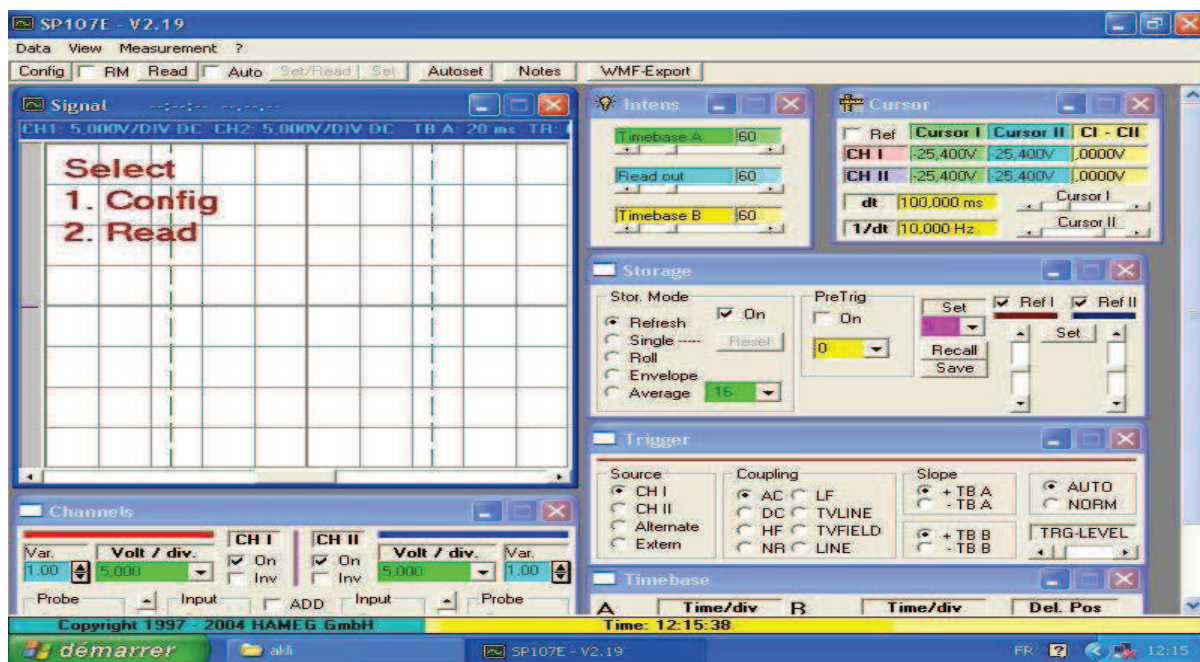


Figure (III.8) : Vue de la page d'accueil du logiciel

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

1. **Signal** : sur cette fenêtre on visualise le signal mesuré tel qu'il est vu sur l'oscilloscope
2. **Channel** : cette fenêtre indique les canaux importés et leurs calibres lors de la lecture
3. **Cursor** : cette fenêtre indique la tension à chaque point du graphe lorsque vous passez le curseur de la souris par celui-ci.
4. **Intensity** : cette fenêtre indique l'intensité de la luminosité de la courbe.
6. **Storage** : indique quelques options d'enregistrement des données (nous n'allons pas utiliser cette fenêtre pour enregistrer nos résultats).
7. **Trigger** : indique les options de base de l'oscilloscope choisies lors de l'enregistrement des résultats.
8. **Time base** : cette fenêtre indique les calibres de temps pris par chaque canal.

III.5. Microscope électronique à balayage (MEB)

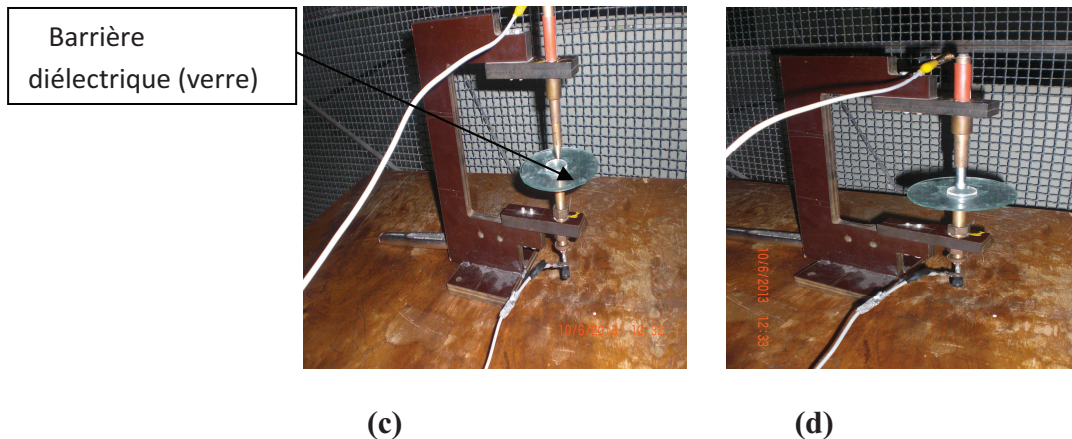
Le processus physique responsable de la dégradation des isolants solides sous contraintes électriques n'est pas encore bien connu. Beaucoup de travaux ont pour objet la compréhension des mécanismes de vieillissement des matériaux utilisés comme isolant électrique. Une étude à l'échelle moléculaire est nécessaire afin de caractériser les surfaces de ces matériaux, de les contrôler et d'améliorer leurs performances.

Parmi les types d'analyse des phénomènes superficiels existant, et nous permis d'obtenir des informations sur la topographie de la surface: le Microscope Electronique à Balayage(MEB).

III.5.1.Montage expérimental

Nous avons utilisés des films de PMMA de forme d'un disque de 3cm de diamètre et 3mm d'épaisseur.Ces films de PMMA sont placés sur un disque de verre de 3mm d'épaisseur, ce disque constitue une barrière diélectrique dont le rôle est d'éviter le passage à l'arc de la décharge entre les deux électrodes. On applique une tension de 12kV à l'électrode haute tension en forme de pointe de 0.03mm de rayon de courbure et en forme sphère de 6mm de rayon, l'électrode plane étant mise à la terre. L'échantillon de PMMA, placé en série avec un intervalle d'air d'épaisseur g.

On a mis le film de PMMA sous décharges électriques dans un système pointe-plan et sphère-plan (figure III.9). Après chaque une heure et demi de vieillissement avec différentes épaisseurs de la couche d'air g (1mm, 2mm, 3mm), nous analysons la surface dégradée du film avec le MEB, et nous le remettons sous décharges jusqu'à atteindre six heures et demi de vieillissement.



Figure(III.9) : Dispositif utilisé pour les analyses MEB

(c) : système pointe-plan, (d) : sphère-plan

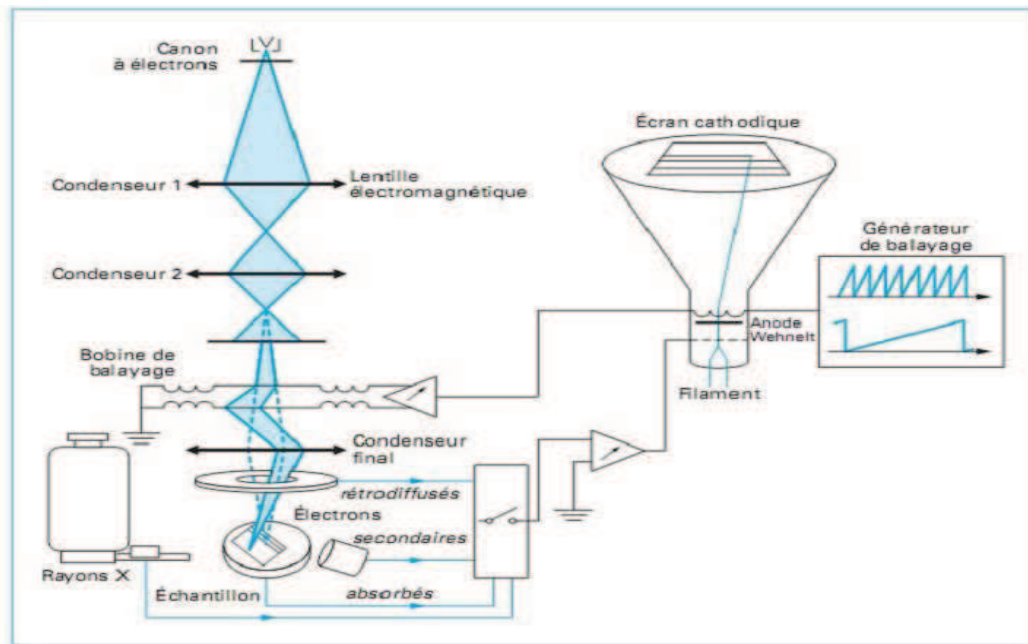
III.6. Analyse microscopique

III.6.1. Constitution d'un microscope électronique à balayage (MEB)

La figure(III.10) montre les différentes parties constitutives du MEB et qui sont :

- Une colonne maintenue sous vide.
- Une source d'électrons.
- Un dispositif haute tension pour l'accélération des électrons.
- Un ensemble de lentilles électroniques pour former le pinceau fin et intense.
- Un condenseur final (objectif) et un diaphragme de petit diamètre qui permet de focaliser le pinceau fin sur la surface à examiner.
- Un dispositif de réflexion piloté par un générateur de balayage.
- Un platine porte objet mobile.
- Un détecteur d'électrons et un dispositif d'amplification du signal rapide et à faible bruit.

- Un système de visualisation d'image.
- Un détecteur d'électrons rétro diffusés et d'un détecteur de rayons X.



Figure(III.10) : Schéma de principe d'un microscope électronique à balayage (MEB)[30].



Figure(III.11) : Photographie du microscope électronique balayage ESEM XL 30 Philip.

III.6.2. Principe de fonctionnement du MEB

La microscopie électronique à balayage (MEB ou SEM pour Scanning Electron Microscopy en anglais) est une technique de microscopie électronique pour l'observation de la surface. Elle est basée sur le principe des interactions électrons-matière (Figure.III.10). Un faisceau d'électrons est projeté sur l'échantillon à analyser. L'interaction entre le faisceau incident d'électrons primaires et l'échantillon génère principalement trois types d'émissions qui apportent différents types d'informations sur la matière dont est constitué l'échantillon :

- Les électrons secondaires

Ceux sont des électrons peu liés de la bande de conduction de l'atome, éjectés lors de leur choc avec les électrons primaires du faisceau. Ceux sont des particules de basse énergie. Ils sont accélérés vers un détecteur d'électrons secondaires qui amplifie le signal.

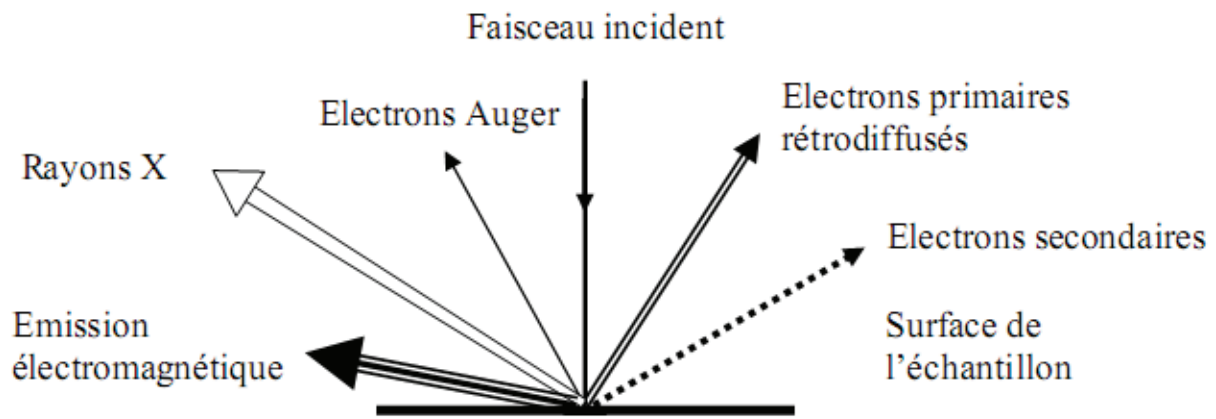
À chaque point d'impact correspond un signal électrique. L'intensité de ce signal électrique dépend à la fois de la nature de l'échantillon au point d'impact et de la topographie de l'échantillon au point considéré. Ainsi, en balayant le faisceau sur l'échantillon, on obtient une cartographie de la zone balayée.

- Les électrons rétrodiffusés

Ceux sont des électrons résultant de l'interaction des électrons du faisceau primaire avec des noyaux d'atomes de l'échantillon. Les électrons sont réémis dans une direction proche de leur direction d'origine avec une faible perte d'énergie. Ils permettent de mesurer l'homogénéité chimique d'un échantillon et son analyse qualitative.

- Les rayons X

L'impact d'un électron primaire à haute énergie peut ioniser un atome à une couche interne. La désexcitation, le remplissage de l'ordre énergétique de la structure électronique, se produit avec émission de rayons X. L'analyse de ces rayons permet d'obtenir des informations sur la nature chimique de l'atome.



Figure(III.12):Signaux produits par l'interaction d'un électron primaire à l'échantillon[11].

Le MEB que nous avons utilisé est un appareil dit environnemental dans lequel l'échantillon reste à la pression atmosphérique. L'avantage que présente le microscope environnemental par rapport au microscope électronique ordinaire est de permettre l'analyse des surfaces isolantes sans qu'elles soient métallisées.

III.7. Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons donné les propriétés principales de poly méthacrylate de méthyle(PMMA), et nous avons décrit les différents équipements utilisés dans nos investigations expérimentales, pour l'étude de dégradation de PMMA et les décharges surfaciques à l'interface air/solide pour les configurations d'électrodes pointe-plan, sphère-plan. Le système d'enregistrement des courants de décharge est l'un des éléments essentiels des équipements utilisés.

Chapitre IV

Résultats et discussions

IV.1. Introduction

Comme nous l'avons signalé, les polymères sont des bons isolants électriques, et dans le but de caractériser l'influence du vieillissement électrique sur ses propriétés diélectriques et les courants de décharge dissipés lors des mises sous champ alternatif, nous nous sommes basées dans notre étude sur la comparaison des résultats obtenus pour le courant de décharge et le vieillissement pour les échantillons de PMMA en systèmes d'électrodes pointe-plan et en sphère-plan.

Dans un premier temps nous nous intéressons à la variation des courants de décharge. Une explication du processus de décharge peut être obtenue à partir de l'étude de la forme de l'impulsion de courant de décharge. Avec le développement des techniques de mesure, il est possible d'obtenir les caractéristiques des impulsions de courants, ce qui nous permettra une meilleure compréhension du comportement de l'isolation. Par la suite on interprète les résultats des analyses MEB qui seront confrontés à ceux obtenus pour les échantillons vierges pour identifier les modifications entraînées par le vieillissement.

IV.2. Courant de décharge

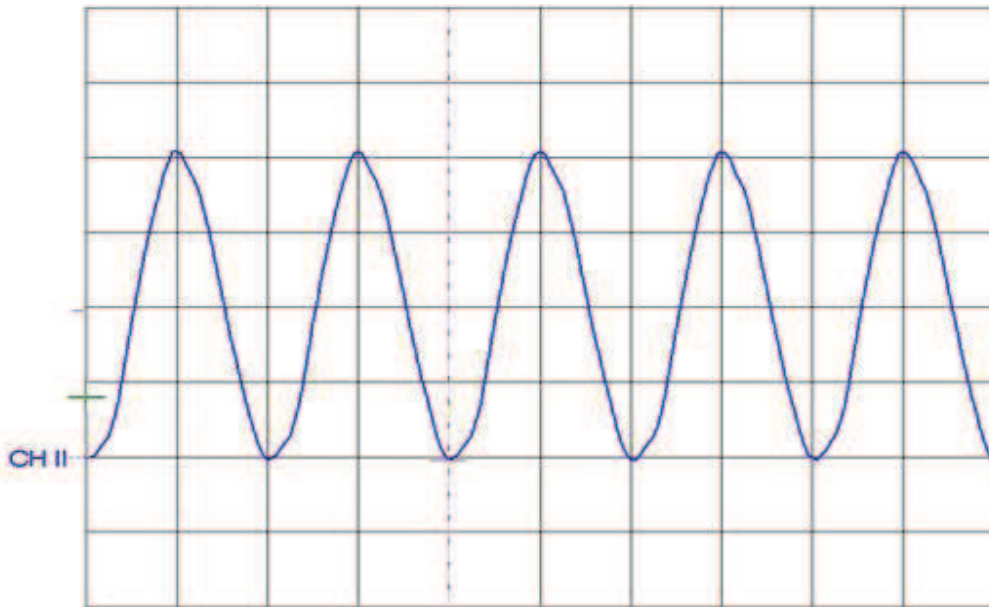
Dans cette partie nous présentons les résultats expérimentaux de l'étude des courants de décharge pour des échantillons de PMMA. En faisant varier la tension appliquée, nous mesurerons le courant maximum de décharge. Ces mesures sont faites pour plusieurs échantillons de l'isolant solide sous tension alternative en système pointe-plan et sphère-plan.

IV.2.1. Essais préliminaires

Une fois le montage expérimental est prêt, nous devons alors faire quelques essais préliminaires dans un montage simple, pour cela nous avons mesuré la tension de la source d'alimentation fournie par le réseau (220V) (figure. IV.1), afin de se familiariser avec le logiciel fourni avec l'oscilloscope ainsi que ses différentes fonctions.

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

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



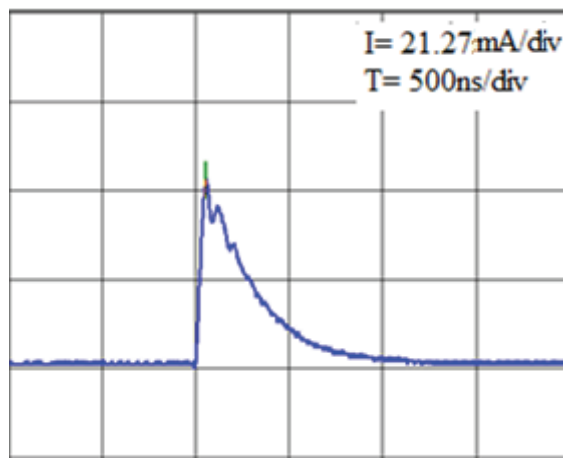
Figure(IV.1) : Courbe de tension

IV.2.2. Forme du courant

Le courant de décharge est sous forme d'impulsions positives et négatives de courte durée et de différentes amplitudes qui ont été mesurées à l'aide d'un oscilloscope à mémoire, la forme de ces courants est représentée sur les figures (IV.2) et(IV.3).

IV.2.2.1. Forme du courant associé en polarité positive

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



Figure(IV.2) : Impulsion positif sous tension 10 kV

IV.2.2.2. Forme du courant associé en polarité négative

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

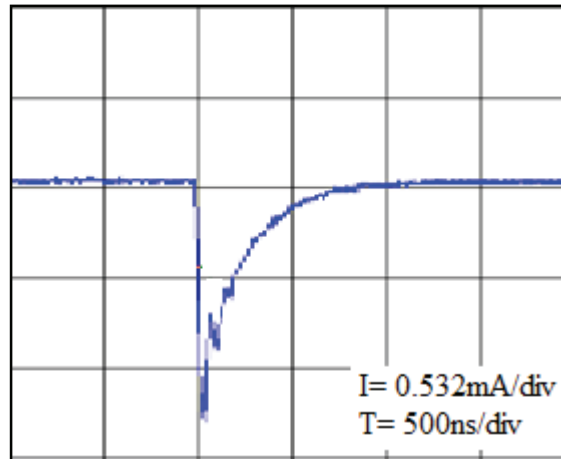


Figure (IV.3) : Impulsion négative sous tension 10 kV

Le courant est constitué de plusieurs impulsions discrètes (figures IV.2 et IV.3) dont l'amplitude croît avec la tension appliquée. Le courant apparaît juste après l'application de la tension. En augmentant la tension, on remarque que les impulsions des courants associés en alternances positive et négative augmentent en nombre et en amplitude, cela signifie que l'énergie des décharges augmente avec la tension.

Lors de nos essais, nous avons remarqué que :

- Les impulsions négatives sont plus nombreuses que celles de positives, par contre l'amplitude des impulsions est plus importante en polarité positive qu'en polarité négative.
- Le temps de montée des impulsions de courant positives est plus grand que celui des impulsions négatives, et une légère différence en ce qui concerne le temps de descente.
- Le temps de montée est dans toutes les impulsions toujours inférieur au temps de descente, ceci peut être expliqué par le fait que le temps de montée des impulsions correspond à la mobilité des électrons qui est beaucoup plus grande que celle des ions positifs qui sont à l'origine du temps de descente.

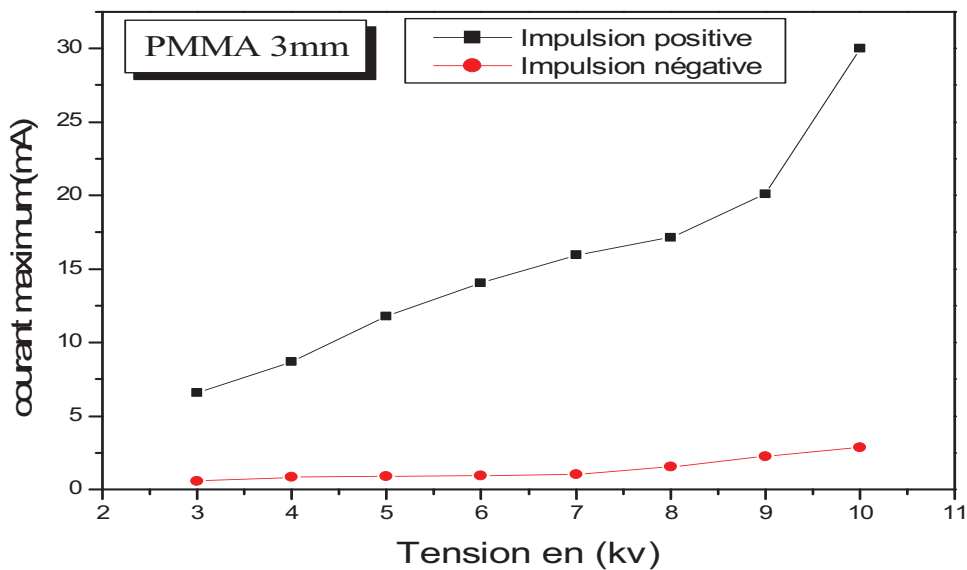
- Il n'est pas toujours facile de repérer pour une impulsion, l'origine de temps de montée qui est souvent brouillée par des oscillations parasites. De plus, la crête de l'onde était souvent déformée, l'instant où l'impulsion atteint le maximum ne peut pas être repéré avec précision.

IV.2.3. Résultats expérimentaux et interprétation

IV.2.3.1. Influence de la tension appliquée sur courant maximum de décharge

a. Résultats obtenus pour le système pointe- plan

La figure(IV.4) représentent le courant maximum de décharge en polarité positive et négative pour l'épaisseur de 3 mm de PMMA avec le système pointe –plan



Figure(IV.4) : Courant maximum de décharge par la pointe

b. Résultats obtenus pour le système sphère- plan

La figure(IV.5) représente le courant maximum de décharge en polarité positive et négative pour l'épaisseur de 3 mm de PMMA avec le système sphère –plan et $g=1\text{mm}$.

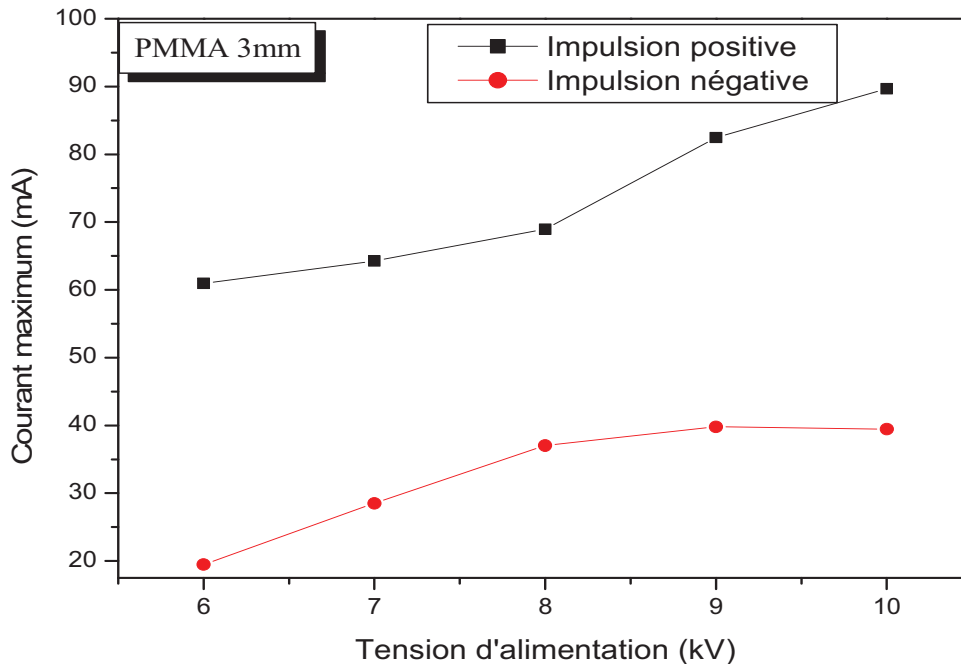


Figure (IV.5) : Courant maximum de décharge par la sphère

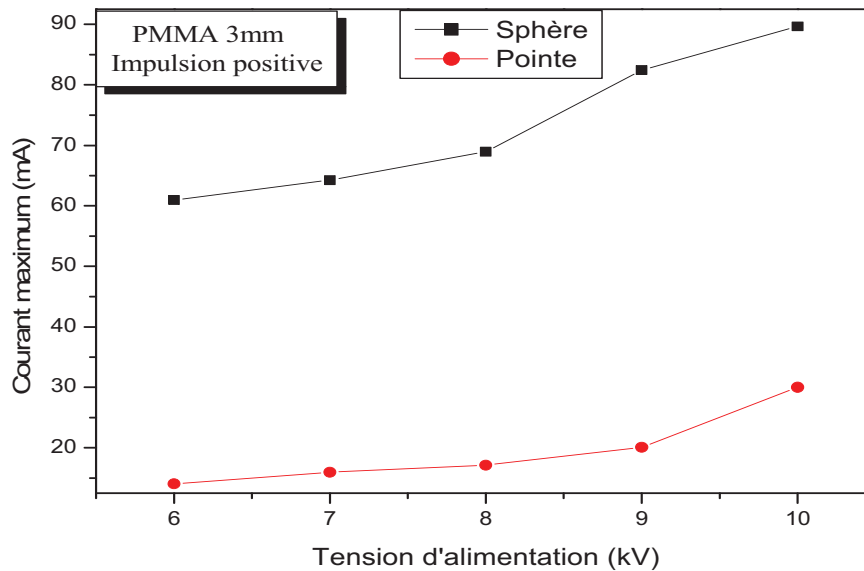
D'après les figures (IV.4) et (IV.5), on constate que l'intensité de courant augmente avec la tension appliquée pour les deux polarités et les deux systèmes d'électrodes.

Pour les deux systèmes d'électrodes, l'amplitude des impulsions positives croît légèrement avec la tension jusqu'à 9 kV. À partir de cette valeur de tension, la croissance du courant de décharge est beaucoup plus importante. Alors que l'amplitude des impulsions négatives varie relativement moins en fonction de la tension, il diminue à partir de 9 kV pour le système sphère-plan.

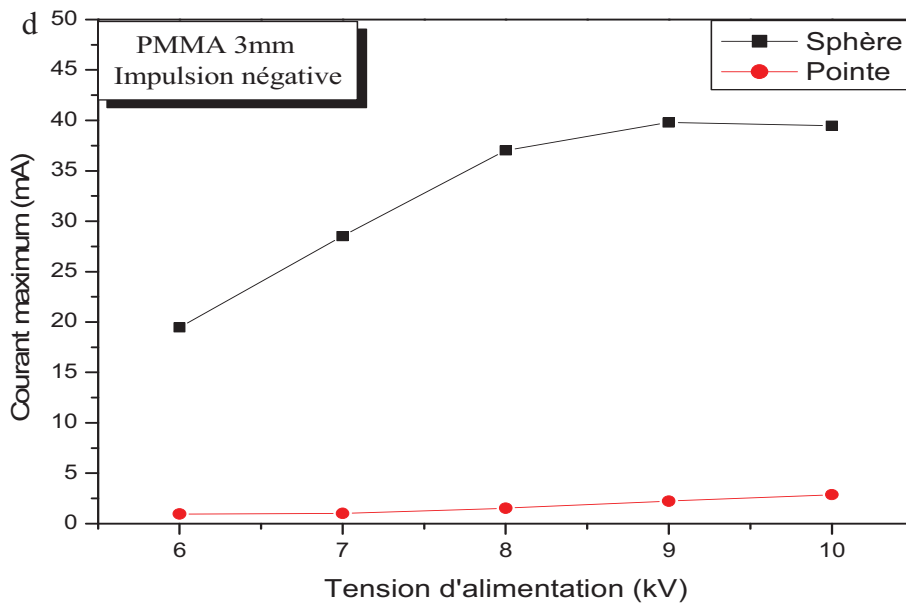
L'amplitude des impulsions positives est d'environ 3 à 4 fois plus grande que celle des impulsions négatives. Cela pourrait s'expliquer par ce qu'on a vu dans l'étude bibliographique à savoir que les streamers positifs se développent sur les distances plus longues que celles des streamers négatifs.

On ne peut pas aller au delà de 1mm d'épaisseur d'air, parce qu'on n'arrive pas à obtenir des impulsions de courant de décharge pour la sphère à un intervalle d'air plus grand que 1 mm.

IV.2.3.2. Courant maximum de décharge pour différents systèmes d'électrodes en fonction de la tension



Figure(IV.6) : Courant maximum en polarité positive pour la pointe et sphère



Figure(IV.7) : Courant maximum en polarité négative pour la pointe et la sphère

Les figures(IV.6) et(IV.7) montrent que pour les deux polarités, le courant maximum augmente légèrement pour les deux systèmes d'électrodes jusqu'à 9kV, tension à partir de laquelle il commence à augmenter rapidement en polarité positive, mais en polarité négative il diminue en système sphère et il continue à augmenter légèrement en système pointe.

Nous remarquons que l'intensité du courant est plus significative pour la sphère que pour la pointe dans les deux polarités.

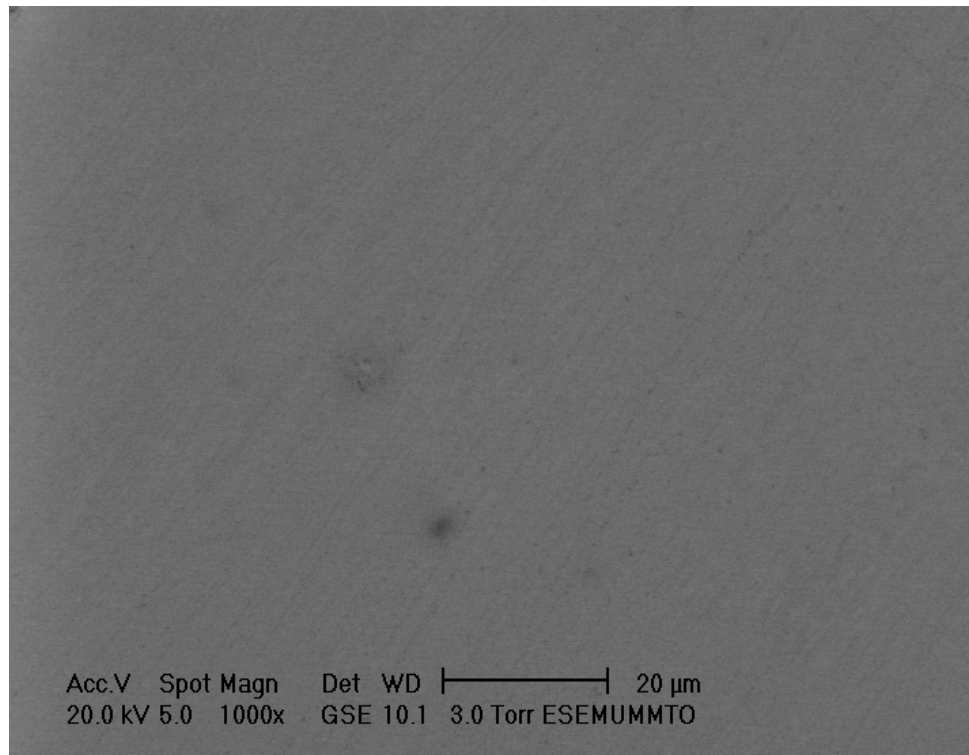
IV.3. Analyse microscopique

IV.3.1. Résultats expérimentaux et discussion

IV.3.1.1. Influence de l'épaisseur de la couche d'air et du temps de vieillissement électrique sur la dégradation de PMMA

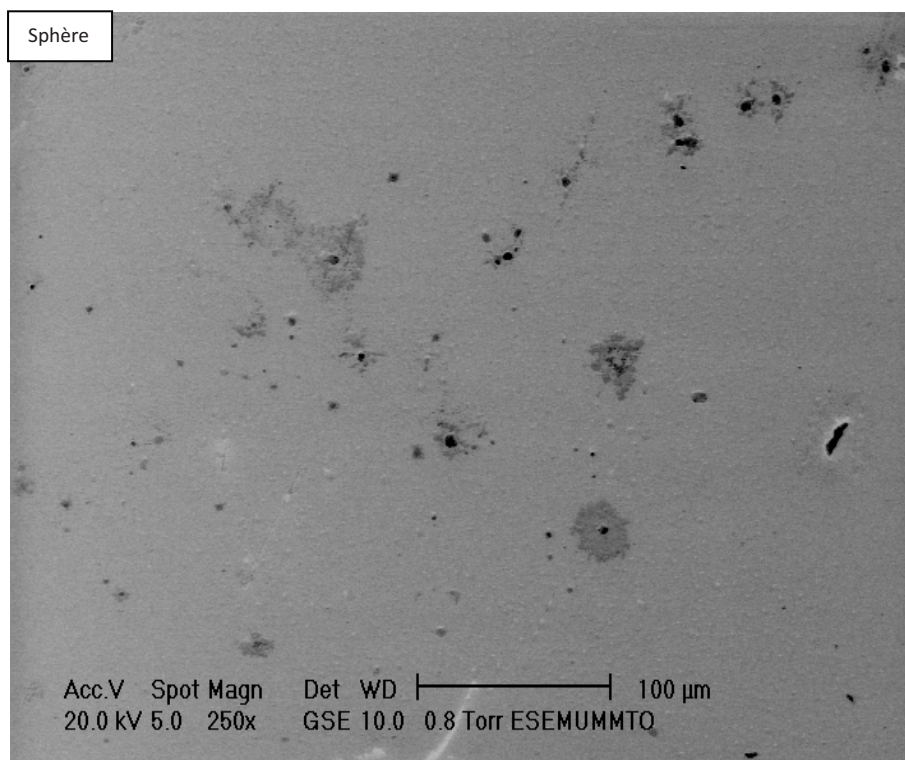
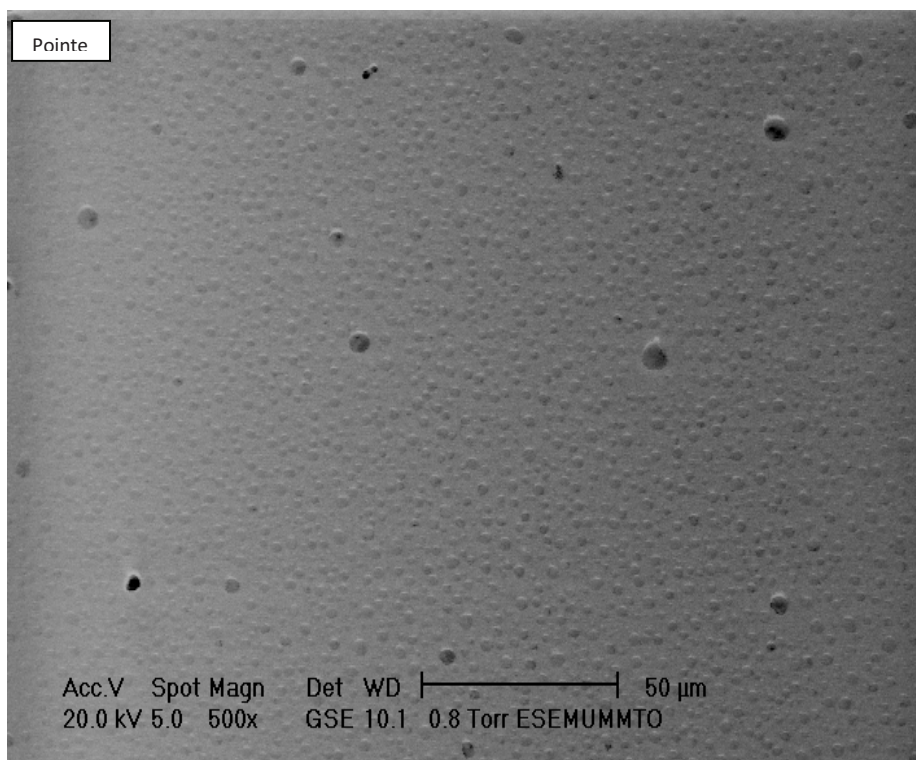
a. PMMA vierge

L'échantillon vierge observé avec un agrandissement de 1000x, présente une surface lisse et homogène, exempte de toute dégradation, la figure(IV.8) représente un micrographe d'un échantillon de PMMA vierge

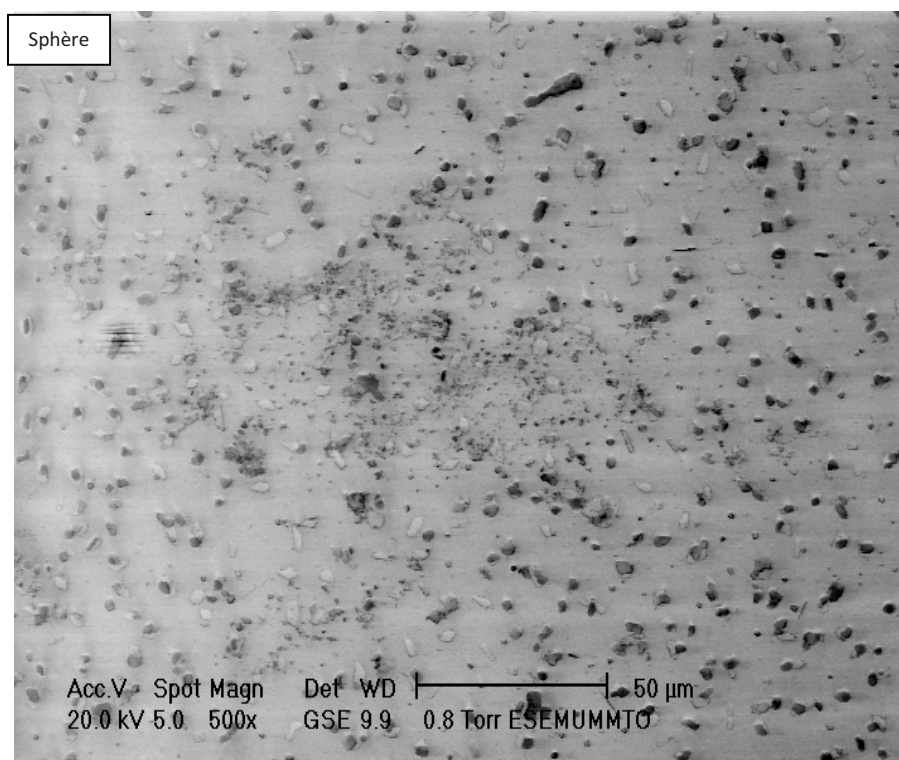
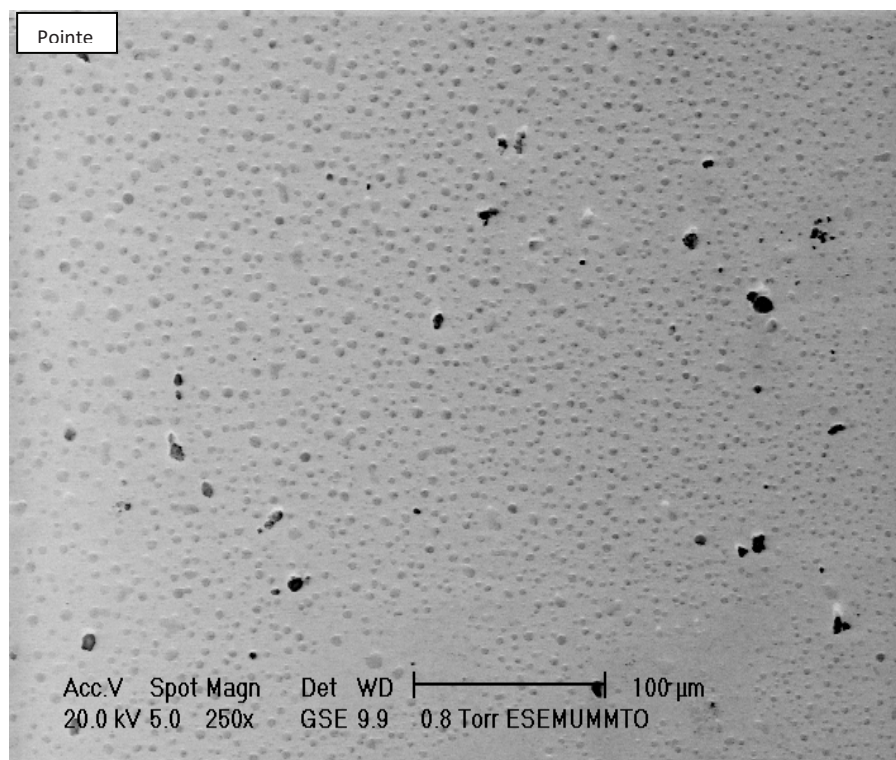


Figure(IV.8) : Micrographe de la surface de PMMA vierge

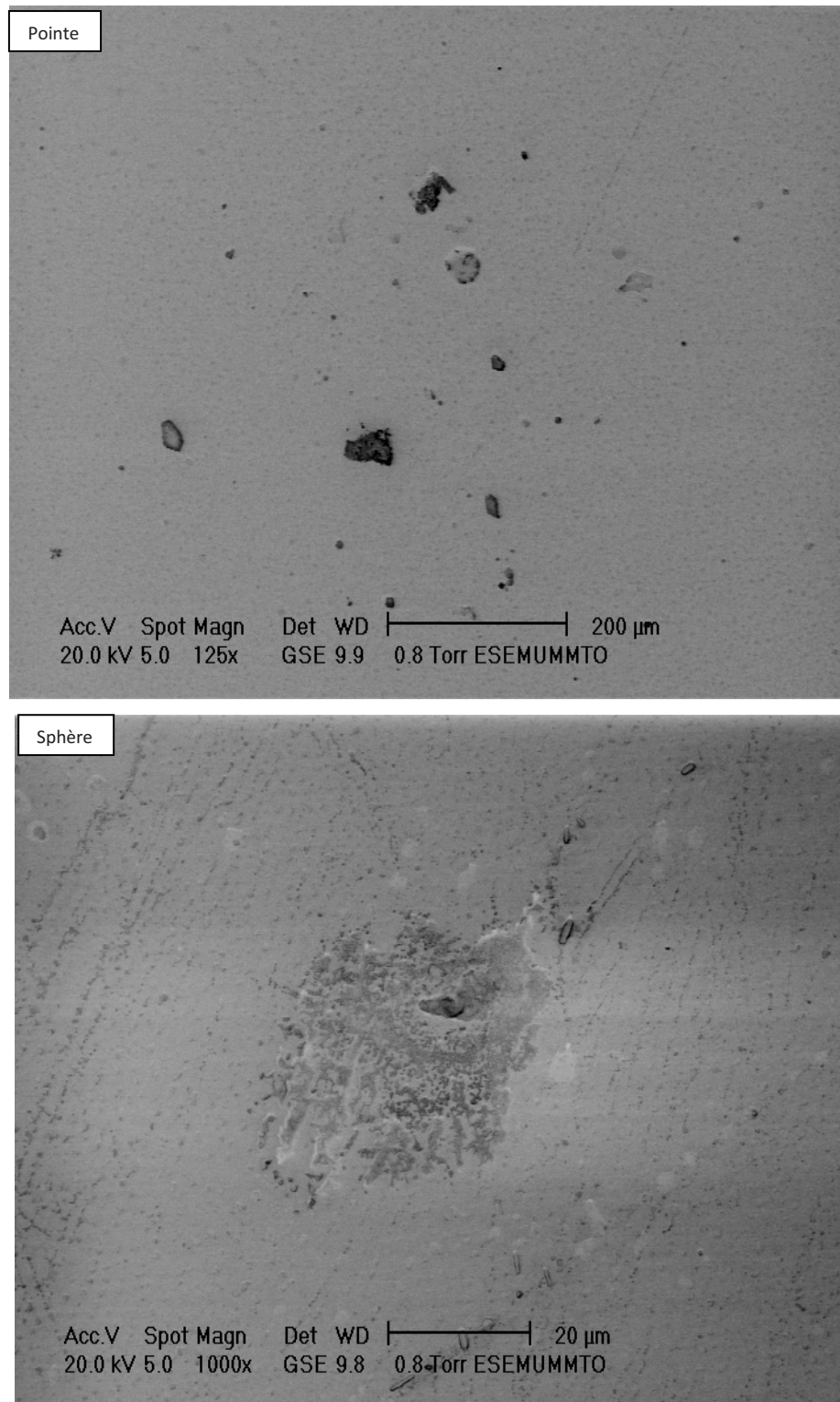
b. PMMA Vieilli pendant 1h30min

g=3mm

g=2mm



g= 1mm

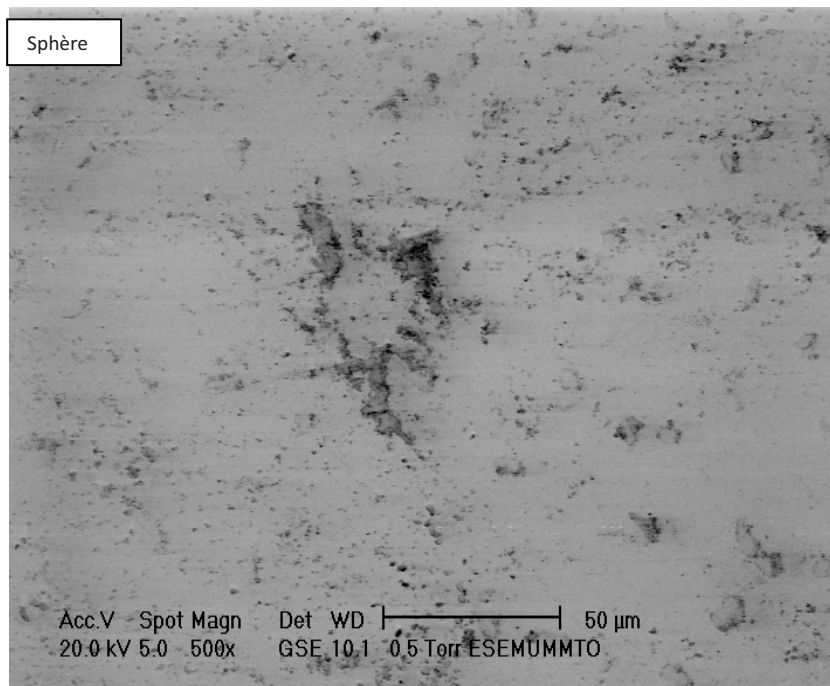
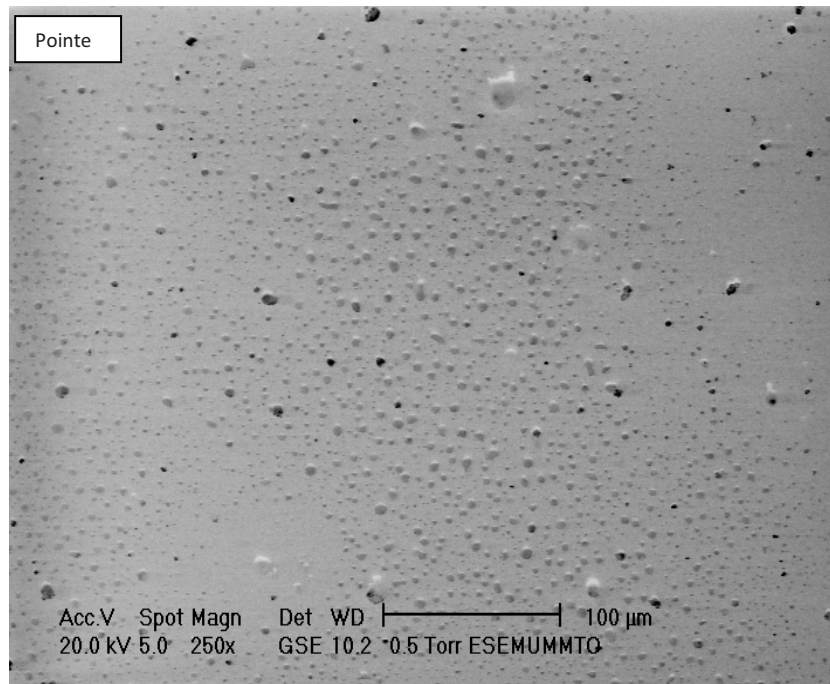


Figure(IV.9) : Micrographes des échantillons de PMMA vieillis sous décharge électrique pour la pointe et la sphère pendant pour g=3mm, 2mm, 1mm

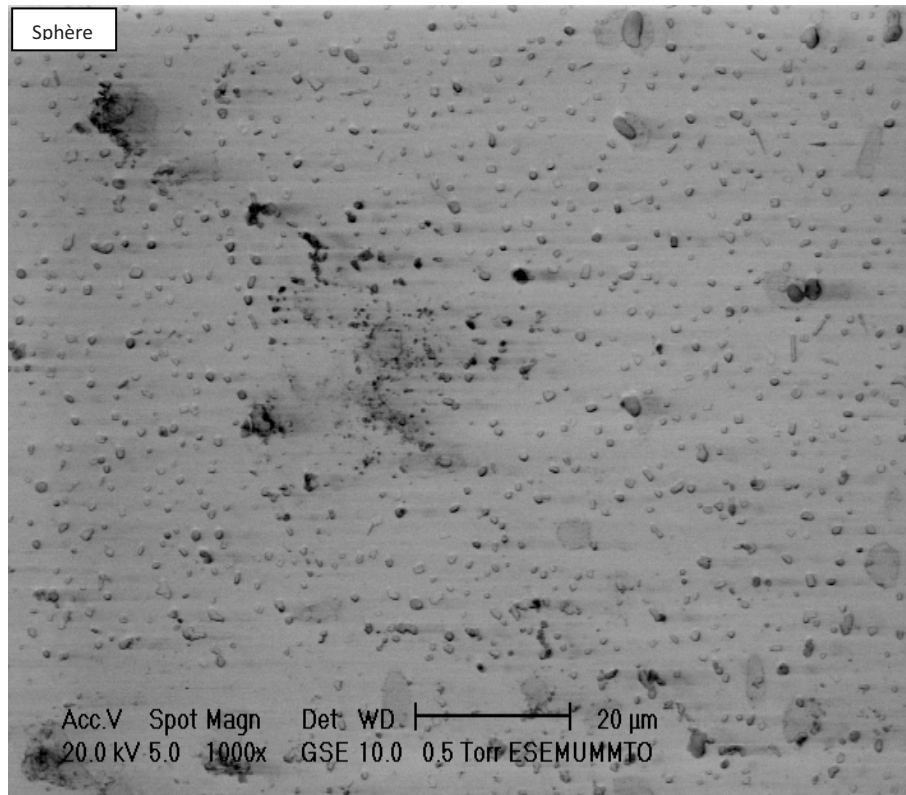
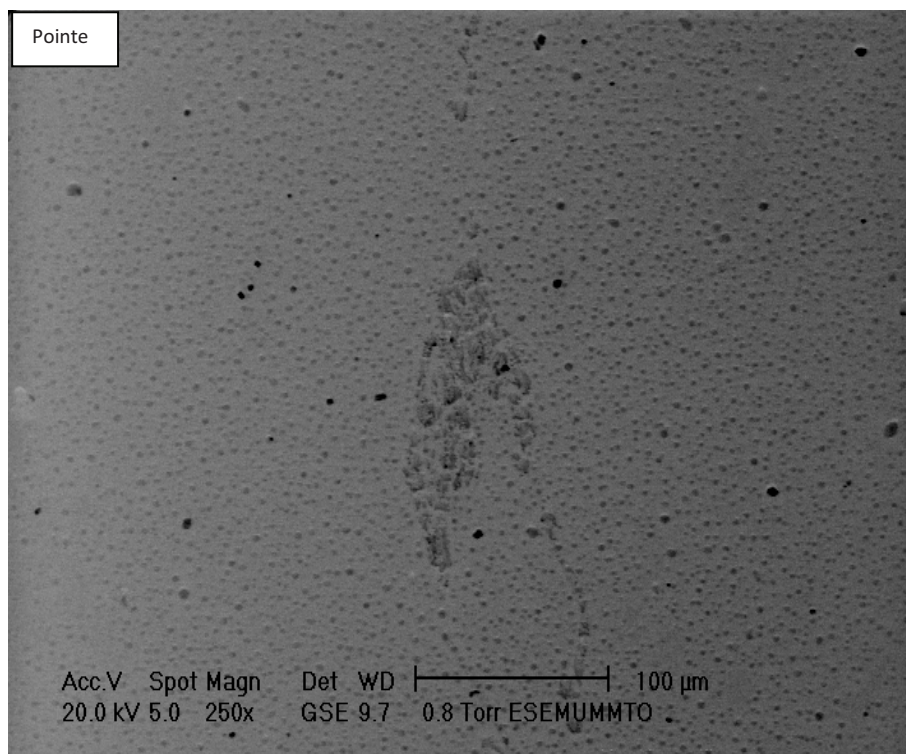
La figure(IV.9) montre que les surfaces de PMMA sont endommagées par le vieillissement électrique sous une tension de 12kV. En effet, les surfaces deviennent rugueuses et non homogènes pour les deux géométries d'électrodes. Elle est plus importante quand l'épaisseur de la couche d'air est petite.

c. PMMA Vieilli pendant 3h

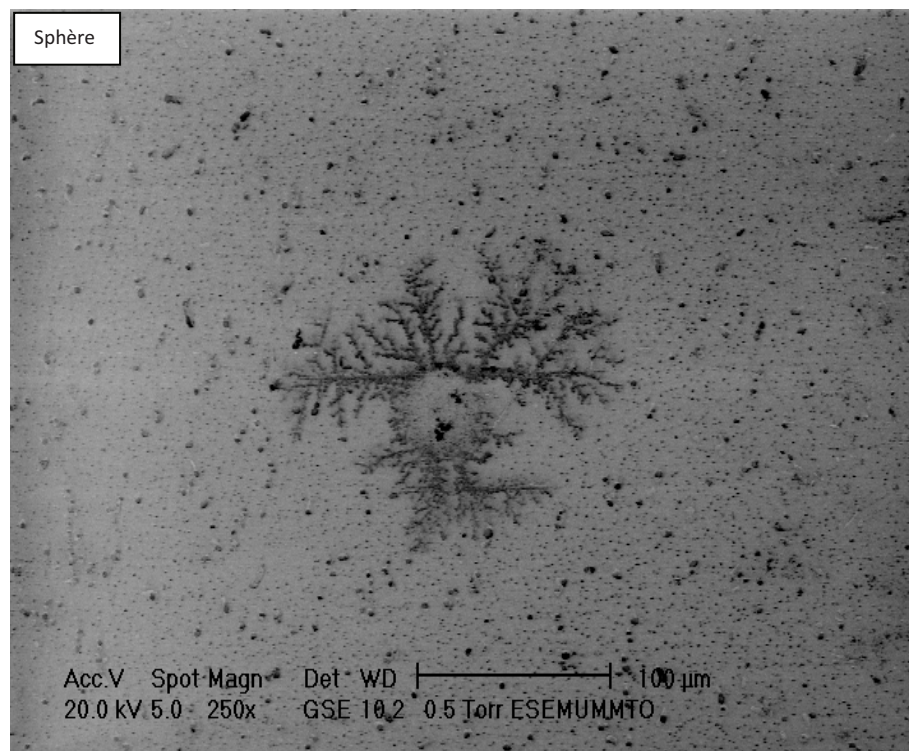
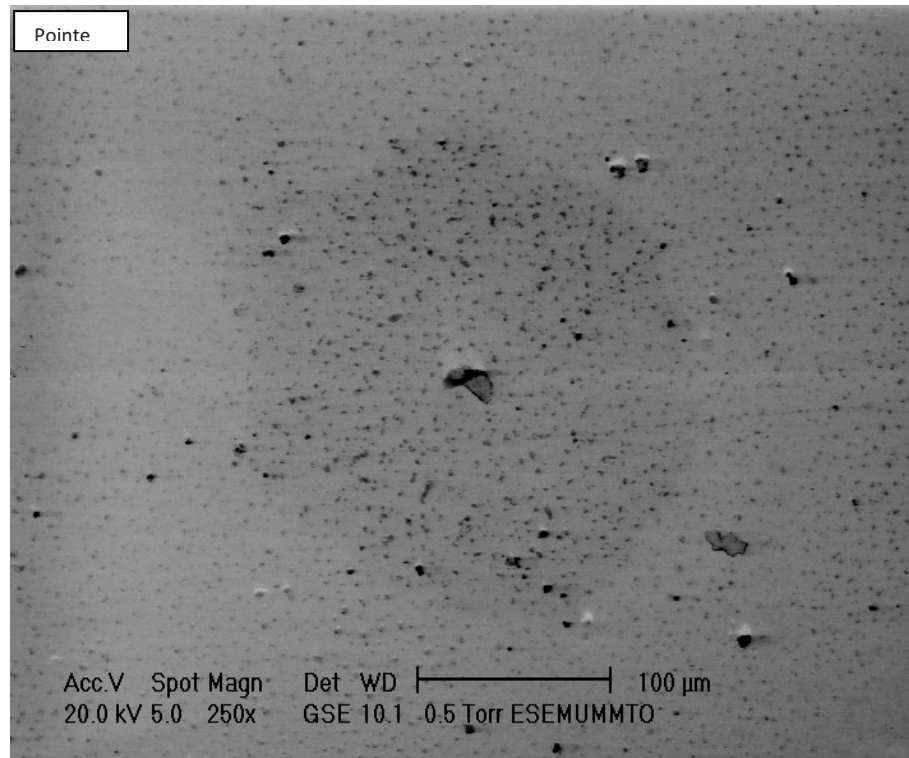
g=3mm



g=2mm



g=1mm

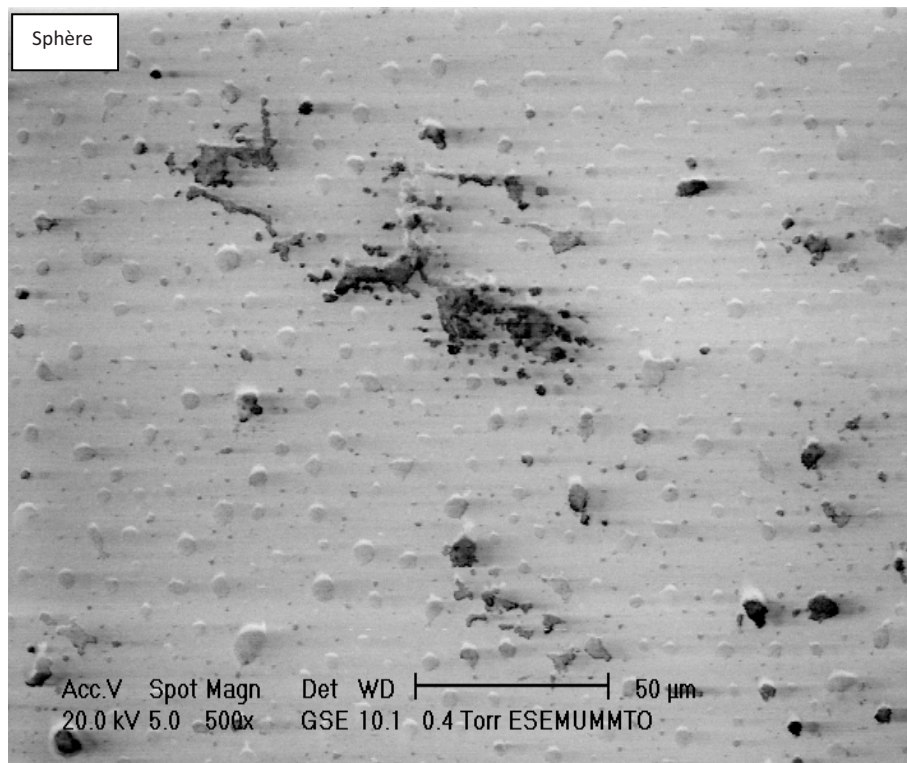
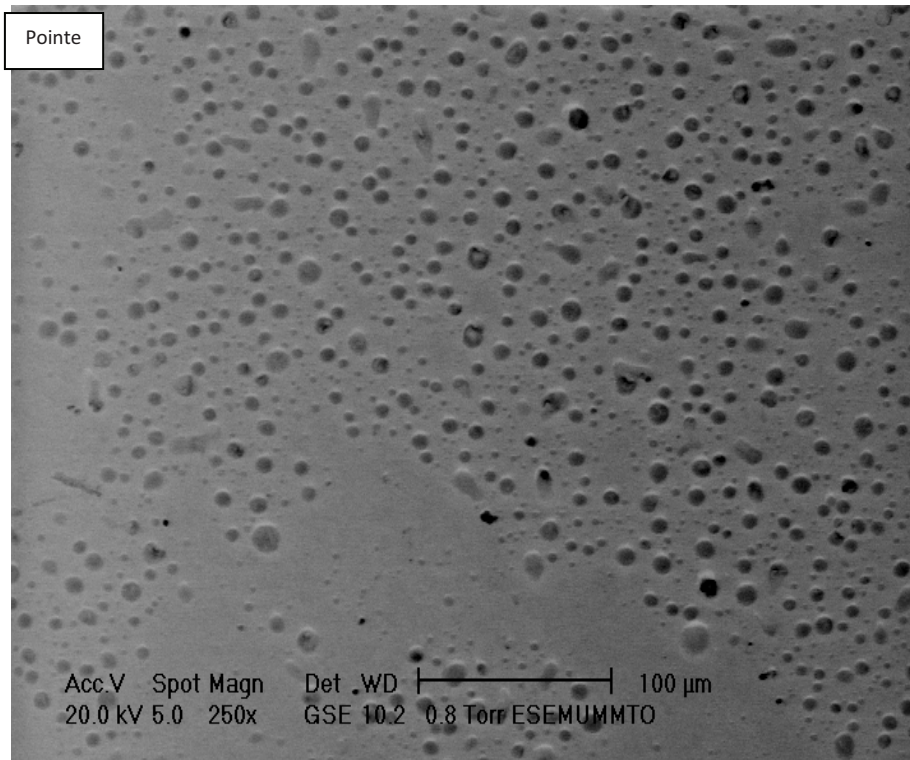


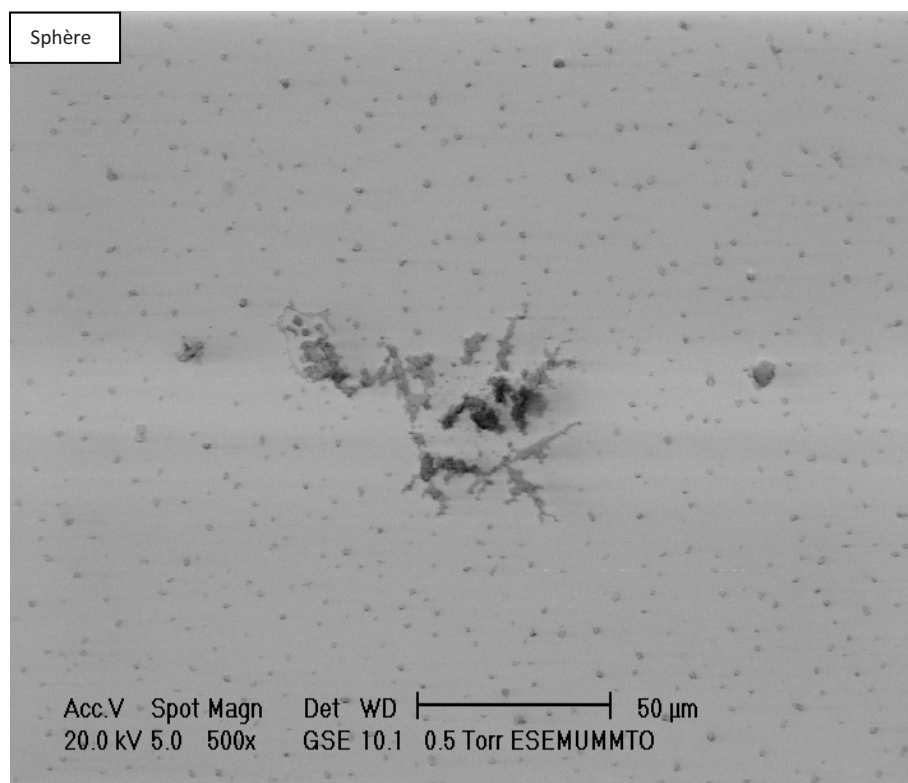
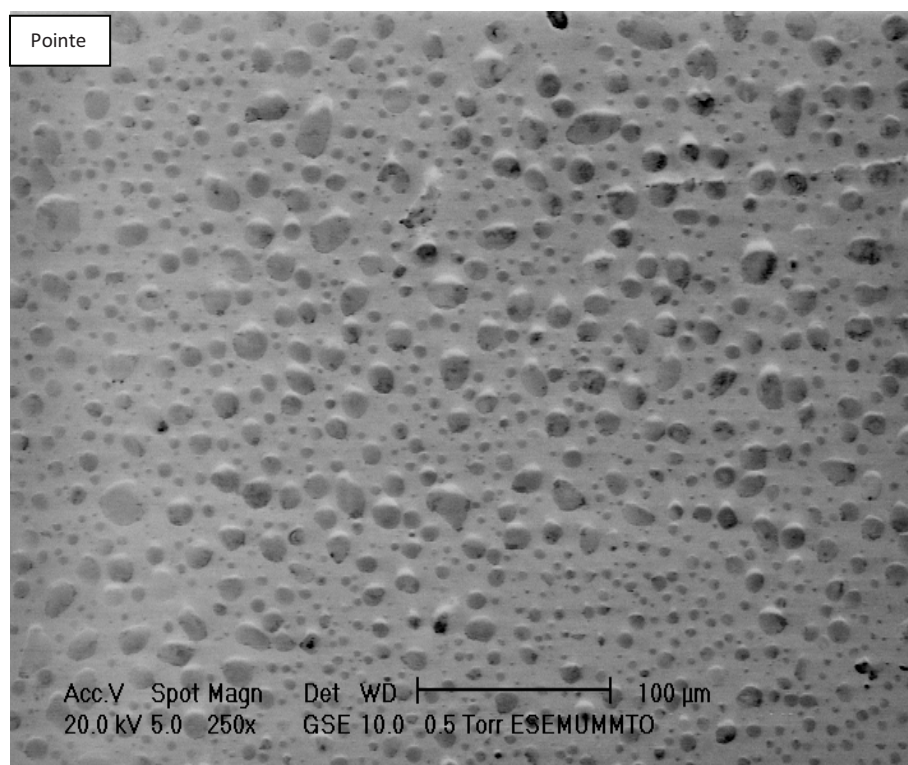
Figure(IV.10) : Micrographes des échantillons de PMMA vieillis sous décharge électrique pour la pointe et la sphère pendant 3h pour $g=3\text{mm}$, 2mm , 1mm

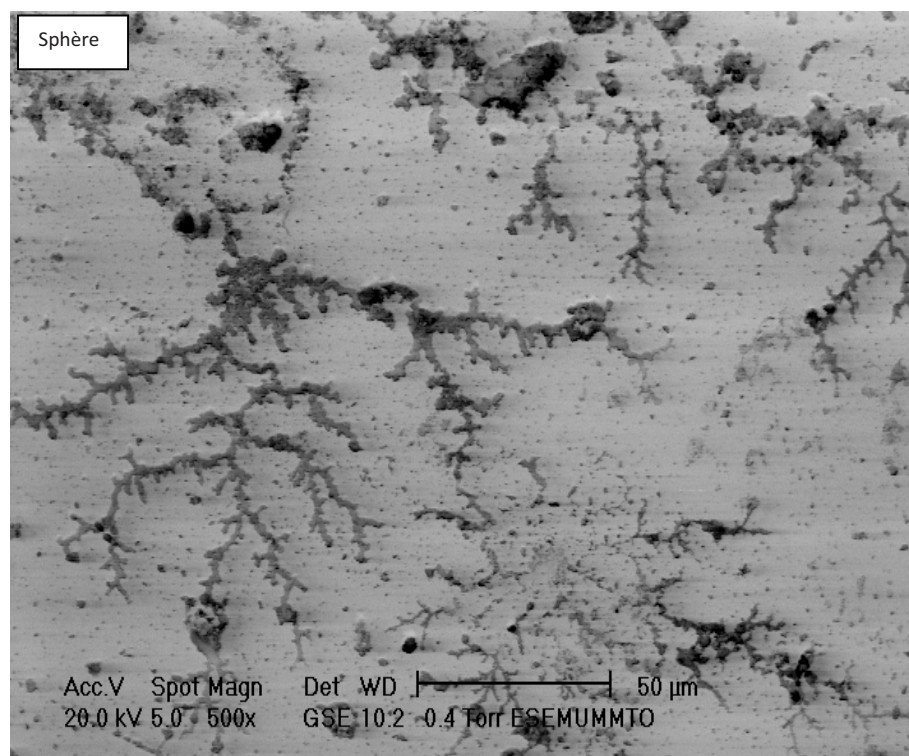
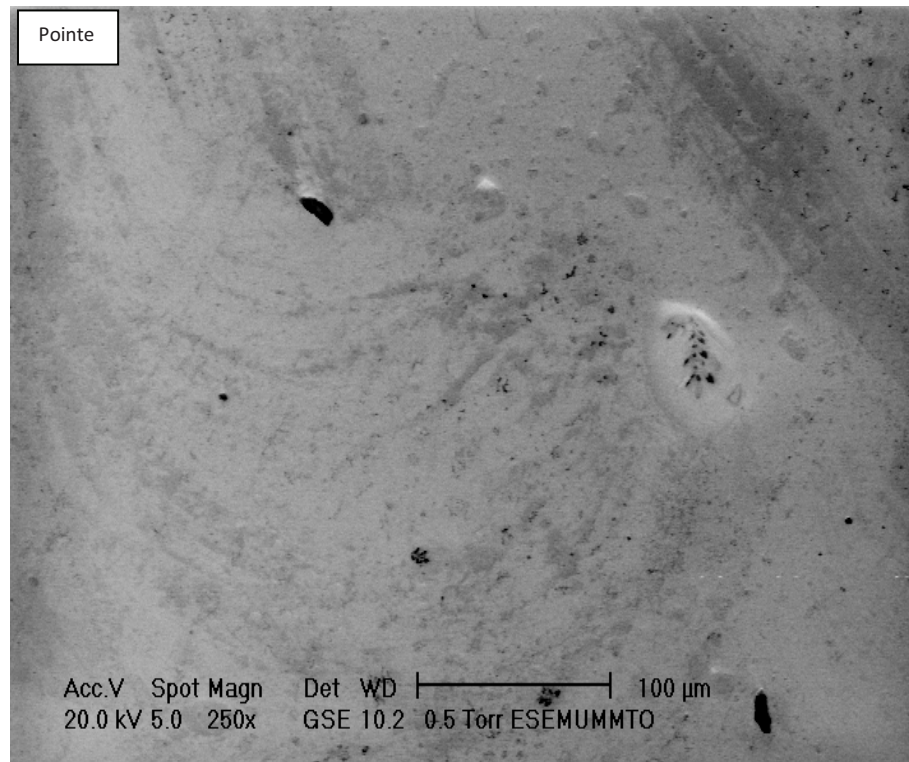
En augmentant le temps de vieillissement, la surface de PMMA présente des dégradations plus importantes.

Pour la sphère, on observe des arborescences, qui prennent naissance et se développent à partir des zones circulaires blanchâtres, on explique la forme de ces figures 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.

d. PMMA Vieilli pendant 4h30min

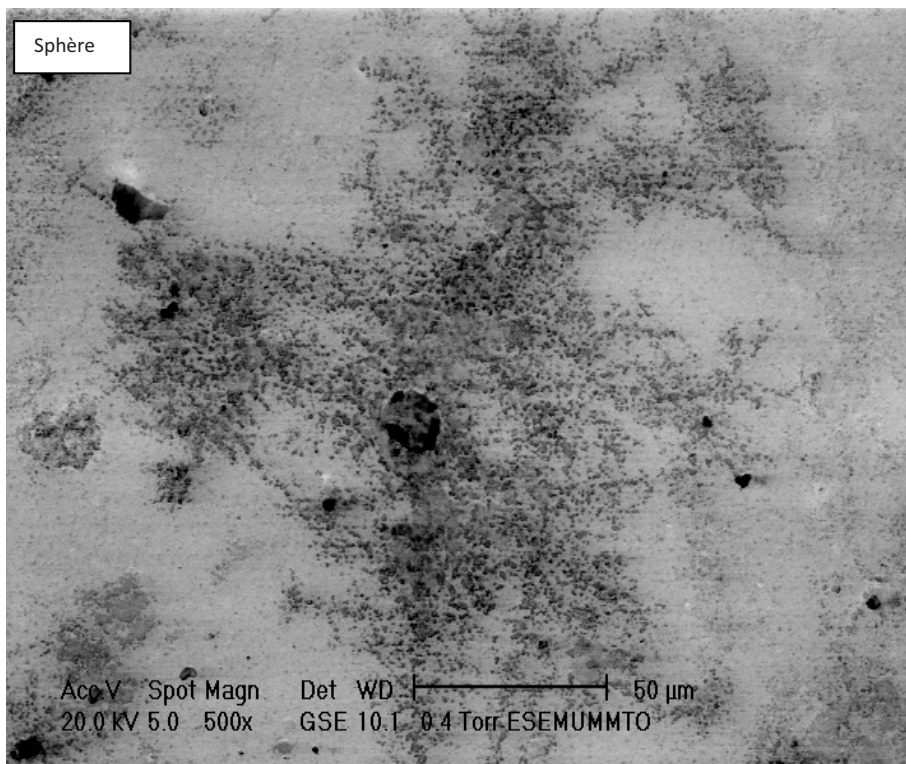
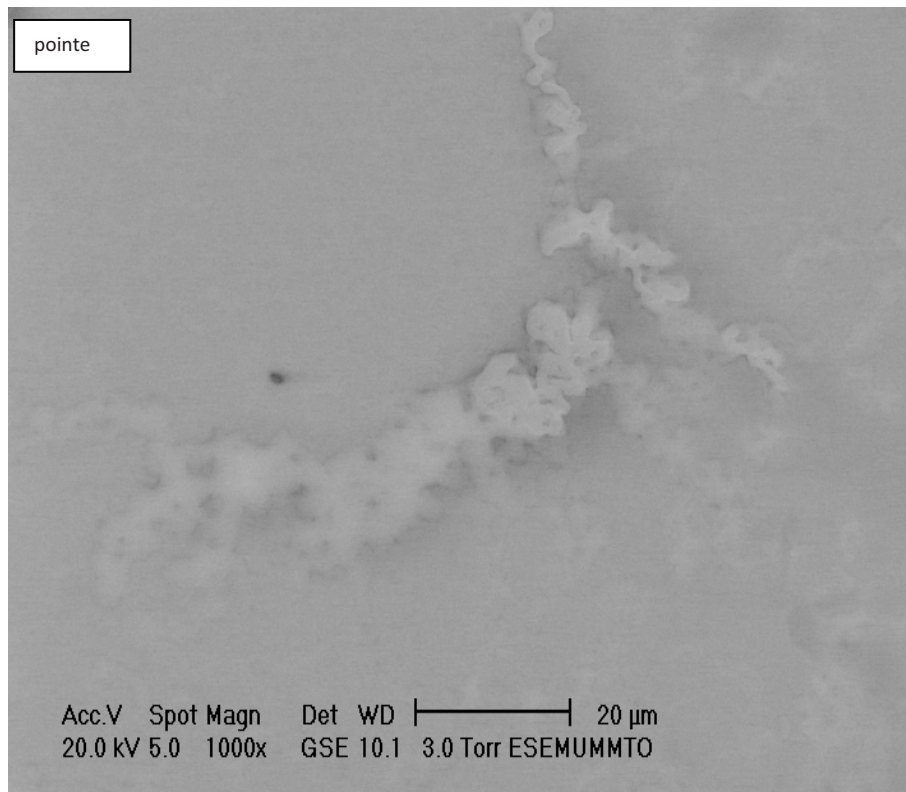
g = 3mm

g=2mm

g=1mm

Figure(IV.11) : Micrographes des échantillons de PMMA vieillis sous décharge électrique pour la pointe et la sphère pendant 4h30 pour g=3mm, 2mm, 1mm

e. PMMA Vieilli pendant 6h

g=1mm

Figure(IV.12) : Micrographes des échantillons de PMMA vieillis sous décharge électrique pour la pointe et la sphère pendant 6h pour g=1mm

Au court du temps (4h30, 6h), les dégradations sont réparties sur toute la surface et la longueur des arborescences augmente, en système sphère-plan signifie que, le matériau vieillit rapidement.

Nous constatons que la dégradation des propriétés de la surface de l'isolant solide est importante avec la diminution de l'intervalle d'air et l'augmentation du temps de vieillissement pour les deux systèmes d'électrodes, cependant cette déformation est plus grande en système sphère-plan.

IV.4. Conclusion

Dans ce chapitre nous avons montré que l'influence du vieillissement électrique sur les propriétés diélectriques de PMMA est beaucoup plus importante en système sphère-plan qu'en système pointe-plan lorsque l'épaisseur de la couche d'air est faible.

Les intensités de courant de décharge sont très fortes en système sphère-plan pour les deux polarités. Elles augmentent en nombre et en amplitude avec la tension appliquée. Leur amplitude est grande en polarité positive.

On ne peut pas visualiser les impulsions des courants de décharge avec le système sphère-plan pour des épaisseurs de la couche d'air élevées.

Conclusion générale

Conclusion générale

Conclusion générale

Dans ce travail, nous nous sommes intéressés à l'interaction de la décharge électrique sur les matériaux isolants diélectriques en géométrie pointe-plan et sphère-plan, avec une interface air/solide isolant. Nous avons d'une part énoncé les généralités sur les interfaces air/solides, et d'autre part étudié les caractéristiques des décharges de la surface, voir la corrélation avec les impulsions de courant de décharge et l'analyse de la surface diélectrique (PMMA) soumis au vieillissement électrique accéléré par la technique MEB a été effectuée.

Sous tension alternative, les courants de décharge apparaissent dans le cas des deux polarités positive et négative. Nous avons constaté que les impulsions positives et négatives du courant évoluent proportionnellement avec la tension appliquée. Les amplitudes maximales des impulsions positives sont plus importantes que celles des impulsions négatives.

La présence d'une couche d'air entre l'électrode haute tension et la surface diélectrique influe sur le comportement des impulsions positives et négatives du courant de décharge. Lorsque l'épaisseur de la couche d'air est faible, les amplitudes maximales des impulsions de courant pour les deux systèmes d'électrodes sont plus prononcées par rapport aux couches d'air plus importantes. Seulement, en système d'électrodes sphère-plan nous avons remarqué que les impulsions de courants de décharge n'apparaissent pas, mais leurs valeurs sont plus importantes qu'en pointe-plan pour un intervalle d'air de 1mm.

Grace à l'utilisation de la technique MEB, des observations ont été effectuées sur l'évolution de la surface de l'isolant solide (PMMA) vieilli, et des dégradations importantes de la surface diélectriques ont été remarquées.

La dégradation est d'autant plus importante que le temps de vieillissement est important. Un phénomène justifié par l'apparition d'arborescences dans le cas du système d'électrodes sphère-plan, et une formation de cratères pour le système pointe-plan, au niveau de la zone vieillie.

Bibliographie

Références

- [1] J.C.DUBOIS, «propriétés diélectriques des polymères », Technique de l'ingénieur, Référence E1850, Paris 1998.
- [2] Warne. D.F « Génie électrotechnique »Edition 2007.
- [3] M.Aguet et Lanoz « Traité d'électricité : Haute tension » vol XXII 2^{ème} édition 2004.
- [4] M.L.Coulibaly. « caractérisation des décharges électriques se propageant aux interfaces solide\gaz .relation entre propriétés des matériaux et dimension fractal » Thèse doctorat en génie électrique de l'école doctorat en électronique, électrotechnique, automatique de lyon,France 2009.
- [5] D.Tilikette, S.Ismigaoua, S.Mechera « Etude du PMMA sous décharges électriques »mémoire de fin d'étude en électrotechnique de l'université Mouloud Mammeri de Tizi-ouzou, promotion 2009 /2010.
- [6] Moudoud Mustapha « étude de la conduction électrique dans les polymères isolants» Thèse de doctorat de l'UMMTO .21/12/2010.
- [7] P.WEISS, Société Francophone de Biomatériaux Dentaires « la chimie des polymères».2009/2010
- [8] Bouguedad Djaffar «influence du vieillissement thermique sur les propriétés de l'Ethylène Propylène Diène Monomère (EPDM) ». Thèse de doctorat de l'UMMTO, 2009/2010.
- [9] J.C.Dubois, « Propriétés diélectriques des plastiques ». Techniques de l'ingénieur, Traité plastiques et composites, AM3140, 2001.
- [10] Z.Kerroui, N.Chemloul ,K.Kecir « Contribution a l'étude de l'effet des décharges électriques sur la surface d'un solide isolant sous tension alternative 50Hz » Mémoire de fin d'étude en électrotechnique de l'université mouloud Mammeri de Tizi-ouzou, promotion 2008/2009.
- [11] :Blhiteche. E « Etude de la dégradation d'un solide isolant soumis aux décharges électriques de surface ». Mémoire de magister de l'université de Mouloud de Tizi-Ouzou, 2012.

Bibliographie

- [12] EPG. Gold et L. D . Vilensky, Arc diélectrique et ses applications, club EDF « Etude physique de l'arc électrique ».Tome 1, édition 1984.
- [13] 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.
- [14] Brahim Benamar « La faisabilité de l'électro filtration d'une atmosphère chargée en poussières de bois : étude expérimental et numérique ».Thèse de doctorat de l'université, Henri Poincaré, Nancy, le 13 novembre 2008.
- [15] H. Kab, H. Salhi et Tiliouine, « Contribution à l'étude d'une isolation solide/gaz sous tension 50 Hz à pression atmosphérique ».Mémoire d'ingénieur d'état, université de T.O, 1993.
- [16] Julien Jarrige « Etude expérimentale des décharges électriques impulsionsnelles. Application au traitement des effluents gazeux et à la décontamination de surface ». Thèse de doctorat de l'université de Rouen, février 2008.
- [17] Nicolas Debus « contribution à l'étude thermique d'un réacteur à décharge à barrière diélectrique ». Thèse de doctorat de l'université de Poitiers, novembre 2009.
- [18] D.Djemai « Etude de la propagation des streamers à l'interface liquide/solide sous tension alternative 50Hz ». Ecole polytechnique d'Alger, 1991.
- [19] Dibit Makhoulf « Etude des phénomènes de pré claquage à l'interface d'une isolation mixte solide/gaz. Mémoire de magister en ETH de l'UMMTO, 2012.
- [20] M.Tahraoui Mustapha et Miziani Karim « Analyse de FTIR et observation au MEB du PMMA soumis à une décharge couronne. Mémoire de fin d'étude de l'UMMTO, 2011.
- [21] H.Fedoul et S .Kechir « Influence d'une barrière diélectrique sur une décharge couronne en géométrie pointe-plan ». Mémoire de fin d'étude de l'UMMTO.
- [22] T.Kashiwagi ,A Inaba , J.E.Brown, K.Hatada , T.Kitayama , E.Masude , « Etude des macromolécules »,1986.
- [23] Hains. Henning Kausch, nicole. Heymans, christopher John plummer, pierre decroly « Matériaux polymères », Edition DUNOD, 2007

Bibliographie

- [24] J. P. Trotignon, J. Verdu, A. Dobraczynski, M. Pipraud, « précis de matière plastique », 5^{ème} Edition AFNOR, 1994.
- [25] Encyclopédie des sciences industrielle, Tome III. Mécanique, généralité, application, Librairie Aristide de juillet, 1974.
- [26] J. P. Trotignon, J. Verdu, A. Dobraczynski, M. Pipraud, «précis de matière plastique », 2^{ème} Edition Nathan, 1982.
- [27] C. Menguy, « Mesure des caractéristiques des matériaux isolants solides », Techniques de l'ingénieur, traité de génie électrique, D2II2310, 2005
- [28] M. Carrega, « Matériaux polymères », Éditions Dunod, juin 2000.
- [29] H. Paqueton et J. Ruste, « Microscopie électronique à balayage- principe et équipement. Techniques de l'ingénieur P865v2, 2006.

Annexe



Introduction :

Sonatrach est la compagnie algérienne de recherche, d'exploitation, de transport par canalisation, de transformation et de commercialisation des hydrocarbures et de leurs dérivés. Elle intervient également dans d'autres secteurs tels que la génération électrique, les énergies nouvelles et renouvelables et le dessalement d'eau de mer. Elle exerce ses métiers en Algérie et partout dans le monde où des opportunités se présentent.

Sonatrach est la première entreprise du continent africain. Elle est classée la 12ème parmi les compagnies pétrolières mondiales, la 2ème exportateur de GNL et de GPL et la 3ème exportateur de gaz naturel.

Chapitre I : Le champ de Hassi R'mel

I.1. Historique du champ de Hassi R'mel

L'Algérie possède environ 10 % de réserve mondiale en gaz naturel, elle se place au cinquième rang international. Plus de 50 % de ces réserves connues sont concentrées dans le gisement de Hassi R'mel.

- Gaz sec ou gaz de vente (C₁, C₂).
- Gaz propane liquéfié "GPL" (C₃, C₄).
- Condensât (C₅ et plus).

I. 1.1. Position géographique

Le gisement de gaz de Hassi R'mel se situe approximativement à 550 Km au sud d'Alger et à une altitude de 760 m.

Ce gisement s'étend sur une superficie de 3500 Km², soit 70 Km environ dans la direction Nord-sud et 50 Km dans la direction Est-Ouest.

Le paysage est constitué d'un vaste plateau rocailleux, le climat est caractérisé par une humidité moyenne de 19 % en été et de 34 % en hiver. Les amplitudes sont importantes variantes de – 5 °C en hiver à 50 °C en été.

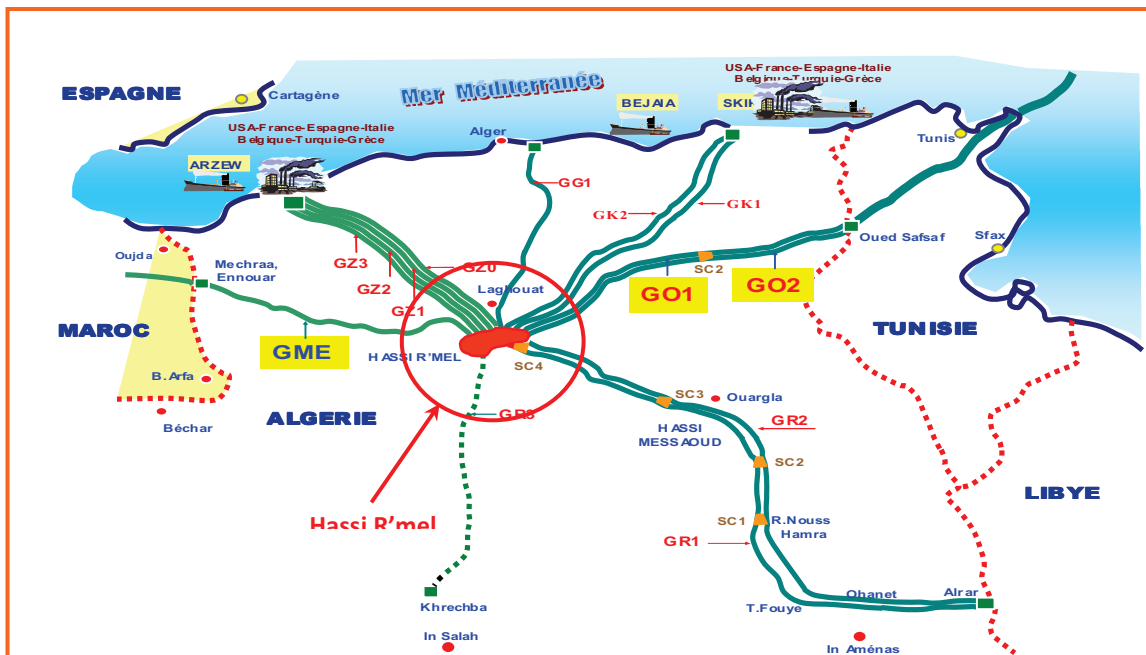


I. 1.2. Historique du champ

Le champ de Hassi R'mel est une vaste étendue, où sont réparties d'importantes installations, alimentées à partir des puits forés aux différents points du champ.

Le premier puits HR1 a été foré en 1956, ce puits a mis en évidence la présence de gaz riche en condensât.

Le développement de Hassi R'mel, s'est trouvé étroitement lié à la croissance de l'industrie du gaz dans le monde, et les importantes réserves sont estimées à 2000 milliards de mètre cube



Figure(I . 1) : Position géographique du champ de Hassi R'mel.

I.1.3. Développement du champ de Hassi R'mel :

Les réserves importantes révélées par le gisement découvert, constituent le socle de l'économie nationale et placent le pays parmi les 4 plus importants producteurs gaziers dans le monde. Notons également que le gisement de Hassi R'mel est cerné par un anneau d'huile plaçant le champ parmi les plus importants producteurs du sud du pays.

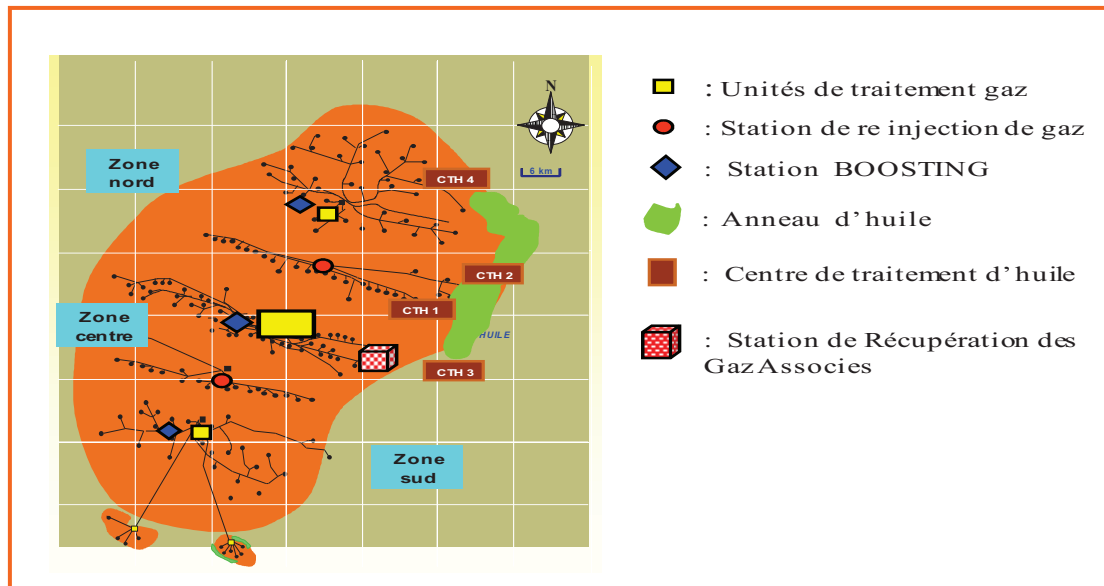


I. 2. Activités du champ de Hassi R'mel

I.2.1. Zones d'activités

Le champ de Hassi R'mel se compose de trois zones principales d'exploitation :

- Zone Nord : Constituée de :
 - *Usine de traitement de gaz (Module 03).
 - *Station de compression Nord.
- Zone Centrale : Constituée de :
 - *Trois usines de traitement de gaz, (Module 0, 1 et 4).
 - Centrale de stockage, de traitement GPL et de Condensât (CSTF).
 - *Station de récupération des gaz associés (SRGA).
 - *Centres de traitement d'huile et expédition comme gaz brut (CNDG).
- Zone Sud : Constituée de :
 - *Usine de traitement de gaz (Module 02).
 - *Usine de traitement de gaz (Djebel Baissa).
 - *Station de compression (Hassi R'mel).



Figure(I.2) : Composition du parc exploitation.



Chapitre2 : Production et transport d'énergie électrique région de Hassi R'mel

II .1. Introduction

Bien avant la montée des préoccupations environnementales dans le monde, qui mettaient en relie les avantages du gaz naturel par rapport aux autres formes d'énergies fossiles, il y a eu un recours massif au gaz naturel comme combustible dans le processus de production de l'électricité en Algérie.

La Société Algérienne Sonelgaz a pour mission la production d'électricité à partir de sources thermiques et hydrauliques répondant aux exigences de disponibilité, fiabilité, sécurité et protection de l'environnement. Elle est également chargée de commercialiser l'électricité produite.

L'énergie électrique joue un rôle très important dans toutes les branches industrielles, son rôle est devenu de plus en plus important par le développement de la consommation d'énergie électrique d'automatisation et des moyens de fabrication. La constitution d'un réseau d'alimentation en énergie électrique, de la production à la distribution, est devenue de plus en plus compliquée.

L'électricité représente une forme intermédiaire d'énergie très intéressante par sa facilité de transport et de distribution, ceci aussi bien à l'échelle d'un continent qu'à l'intérieur des appareils. Elle est produite presque à 100% dans des centrales, par une conversion mécanique électrique au moyen d'alternateurs. L'électricité permet de transmettre la puissance aux multiples utilisateurs par l'intermédiaire des lignes électriques.

Dans le cas de l'Algérie, la Sonelgaz est l'opérateur historique dans le domaine de la fourniture des énergies électriques et gazières en Algérie, à toujours joué un rôle prépondérant dans le développement économique et social du pays.

Chaque fois lorsqu'on allume une lampe électrique ou que l'on démarre un moteur, il faut simultanément produire et transporter l'énergie. L'une des raisons principales du succès de l'électricité tient à ce qu'elle est très facilement transportable. Les transformateurs sont les liens indispensables entre les différentes parties du réseau national de distribution de l'énergie électrique. En Algérie le transport d'énergie électrique est assuré par la filiale de Sone gaz appelée GRTE (Gestionnaire de Réseau Transport d'électricité). La Société Algérienne de Gestion du réseau de Transport de l'Electricité (GRTE), est une société par action (Spa), elle a



pour mission l'exploitation, la maintenance et le développement du réseau de transport de l'énergie électrique dans les meilleurs conditions de qualité de service et au moindre coût.

II.2. Production d'électricité de Hassi R'mel

II.2.1. Présentation de l'unité de production d'électricité de Hassi R'mel

Les unités de production d'électricité SONELGAZ de Hassi R'mel assurent la production de l'énergie électrique initialement pour la région de Hassi R'mel, elle est composée de

- La centrale de Hassi R'mel regroupant 04 turbines à gaz (TG) d'une puissance $P_{CH} = 22\text{MW}$ chacune, sa première mise en service en 1978.
- La centrale de Tilghemt, regroupant 02 turbines à gaz (TG) d'une puissance $P_{CT} = 110\text{ MW}$ chacune, Elle est située à 25 KM au Nord-est de HASSI R'MEL, sa première mise en service en 1988.
- La puissance totale de l'unité de Hassi R'mel est : $P_{TUH}=321\text{ MW}$

II.2.2. La nouvelle centrale hybride (solaire-gaz) de Tilghemt (Abiner-Neal)

La centrale hybride (solaire-gaz) de Tilghemt est la première centrale électrique hybride en Algérie. Elle est à 28 km au nord de la ville industrielle de Hassi R'mel, mise en service à la fin avril 2011. Cette dernière est une matrice de miroirs paraboliques concentrant le rayonnement solaire pour une puissance de 30MW, sur une aire de 180 000 m², en conjonction avec une centrale à cycle combiné constitué de 02 turbines à gaz d'une puissance de 60MW chacune, et une turbine vapeur d'une puissance de 60MW. Comparé à des centrales électriques traditionnelles les émissions de Co₂ sont réduites. La sortie de la matrice solaire sera utilisée dans la turbine à flux.

II.3. Le transport de l'énergie électrique région Hassi R'mel

II.3.1 Type de réseau électrique adopté

II.3.1.1. Réseau d'interconnexion

Le réseau d'interconnexions à un niveau de tension de 220kV, il assure les transits inter-régions entre zones de production excédentaires et déficitaires. Il est utilisé généralement pour la continuité de service. Il est composé des lignes 220kV d'une certaine longueur et d'un nombre de transformateur THT/HT.



II.3.1.2. Réseau de répartition

Le réseau de répartition a un niveau de tension 60kV, il assure l'alimentation des différentes régions. Il est composé de lignes d'une certaine longueur et d'un certain nombre de transformateurs HTB/HTA.

II.3 .2. L'utilité de transporter l'électricité à une tension élevée

La puissance transportée par une ligne électrique est proportionnelle au courant électrique et à la tension: $P = U.I.Cos$. Les producteurs d'électricité comme SONELGAZ doivent transporter le maximum de puissance dans une ligne électrique pour ne pas multiplier les infrastructures. Ils peuvent choisir entre des lignes à haut courant ou des lignes à haute tension.

II.3.3. Ligne électrique de transport

La ligne à haute tension est le composant principal des réseaux de transport d'électricité. Ces lignes sont généralement aériennes ou souterraines.

II.3.3.1 Ligne aérienne

Les lignes aériennes sont composées des câbles conducteurs constitués de plusieurs brins en alliage d'aluminium, suspendue à des supports (pylônes) par intermédiaires d'isolateurs. Ils sont utilisés généralement dans les lignes électriques, THT, HT, MT (réseaux de transports d'électricité)

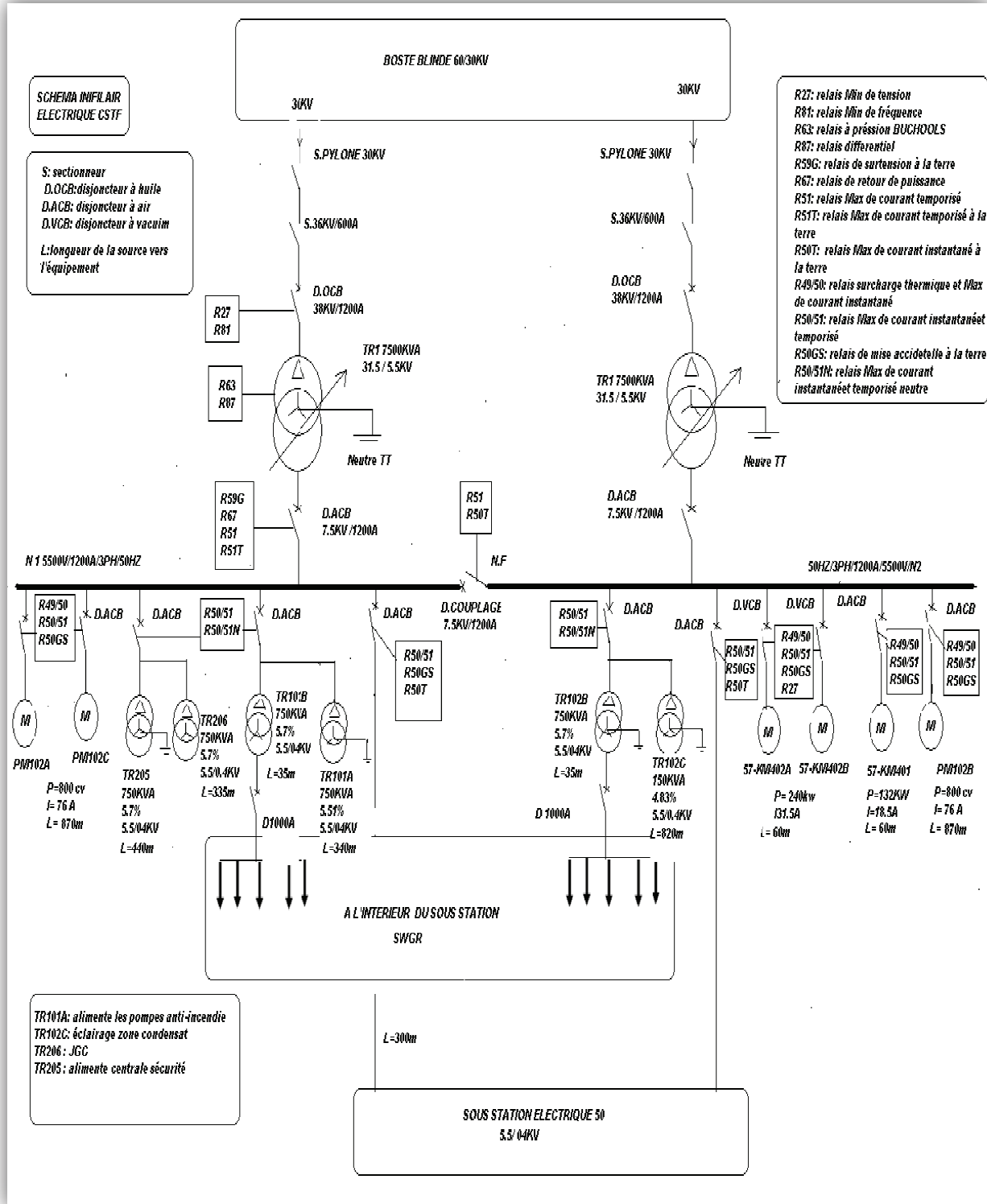
II.3.3.2. Ligne souterraine

A ce jour, les lignes souterraines sont utilisées dans quelques cas particuliers, elles sont plus utilisées en BT (réseaux de distribution).



Chapitre III : Description du CSTF

III.1. Description du système électrique existant du CSTF



Figure(III.1) : Réseau de CSTF



II.1. Réseau électrique CSTF

L'énergie fournie par SONALGAZ arrive au grand poste de transformateur 60KV/30KV qui s'appelle poste blindé (deux lignes L1, L2); ces deux lignes alimentent les transformateurs du CSTF, les deux transformateurs réduisent la tension jusqu'à (5,5 KV), qui alimentent les jeux de barre et les moteurs qui fonctionnent à (5,5 KV) cette tension sera encore réduite à (380 V) pour l'alimentation des jeux de barres du centre de commande des moteurs.

II.2. Caractéristiques des équipements électriques

Le poste de transformation et de distribution de l'unité CSTF est composé de :

- Deux sectionneurs arrivés lignes 30kV type extérieur
- Deux disjoncteurs 30kV à l'huile (Oil Circuit Breaker OCB) de type extérieur
- Deux transformateurs de puissance type extérieur de 7.5/9.37 MVA (ONAN/ONAF) chaque, 30 /5.5 kV, réglables en charge et alimentés en énergie électrique à partir du Poste Blindé par deux lignes électriques de 30 kV.
- D'un bâtiment de sous station électrique abritant les équipements suivants :
 - Deux disjoncteurs 5.5 kV à air (arrivées des transformateurs 8MVA).
 - Deux jeux de barres 5.5KV.
 - D'un disjoncteur de couplage fermé en régime normal.
 - D'un système de synchronisation entre les deux jeux de barres 5.5KV.

Chaque jeu de barres 5.5KV alimente un ensemble des cellules MT comme suit :

Jeu de barres N° 1 : tension 5.5KV :

Il se compose de :

- Un disjoncteur ACB arrivée du transformateur 30 /5.5KV (A1-152).
- Un disjoncteur ACB départ vers la pompe P-102A.
- Un disjoncteur ACB départ vers de la pompe P-102C.
- Un disjoncteur ACB départ vers deux transformateurs TR 205 et TR 206.
- Un disjoncteur ACB départ vers deux transformateurs TR101A/B.
- Un disjoncteur ACB départ vers la sous station(S/S 50).



Jeu de barres N° 2 : tension 5.5KV :

Il se compose de :

- Un disjoncteur ACB arrivée du transformateur 30 /5.5KV, 1200 A (A2-252).
- Un disjoncteur ACB départ vers la pompe P-102B.
- Un disjoncteur ACB départ vers la sous station(S/S 50).
- Un disjoncteur AC Un disjoncteur ACB départ vers compresseur d'air 57-K401.
- Un disjoncteur ACB départ vers deux transformateurs 5500/400V (circuits TR 102B/C).
- Un disjoncteur VCB départ vers compresseur 57-K402 A.
- Un disjoncteur VCB départ vers compresseur 57-K402 B.

-Un disjoncteur de couplage 5 .5KV.

-Un panneau de control commande se compose de :

- Un système de synchronisation et le couplage entre les arrivées 5.5KV.
- Des appareils de mesures et de comptages pour les deux lignes 30/5.5KV.

-La commande des deux arrivées 5.5KV et le coupleur de barres se fait localement.

Transformateurs de puissance

- Marque : GENERAL ELECTRIC
- Classe : OA/FA
- Tension : 31500/5500V
- Puissance : MIN 7500 KVA /MAX 9375KVA à température : 65C°.
- Impédance : 6.53%.
- Couplage : étoile/triangle.

Disjoncteur OCB 30KV

- OIL BLAST CIRCUIT BREAKER.
- Type : FKA-38-22000-6.
- Voltage : 38000v Max.
- Current : 1200A.
- F=50HZ.
- Rated sym.short circuit current AT RATED Max.volt 22000Amps.



- Impulse withstand 200KV Rated volt.
- Range factor $K=1.65$.
- Rated interrupting time 5 cycles.
- Height to remove Bush'G 14FT.
- Weight of Bush'G 70 LBS.
- WT. OF TANK WITH OIL 2700 LBS.
- WT. OF BREAKER WITH OIL 5646 LBS.
- WEIGHT OF BUSH'G 70 LBS.
- OIL PER TANK 265 GAL'S.
- Motor charged spring operated.
- Type: ML-14-0.
- Motor operating range 190 to 250v AC 9A.
- Closing coil range 190 to 250v AC 9.1A.
- POTENTIAL TRIP COIL RANGE 28 TO 60V DC 12.7A.

Disjoncteur ACB 5.5KV

- AIR CIRCUIT BREAKER.
- Type: 15/D/48615.
- Current Amp: 1200A.
- Rated short circuit 33KA.
- Interrupting time 5 cycles.
- IB32-253-2 C&L KA66.
- $F = 50\text{HZ}$.
- MAX KV 7.5
- K FACTOR: 1, 25.
- Bil KV 95.
- Brk. Wt 1450.
- Motors volts 230V AC.
- Close volts 190-250V AC, $I = 7\text{A}$.
- Trip volts 28-60V DC, $I = 10\text{A}$.



Disjoncteur VBC 5.5KV (57-K402A/B).

- Type : 75CVP-W500.
- Style : 6616C40G16 .
- Weight : 375 LPS.
- Rtd. Max. voltage 8.2KV, rms.
- Impulse voltage: 95KV, crest.
- Rtd. Cont. current: 1200A, rms.
- F = 50HZ.
- Rtd S-C current 33KA, rms.
- V range fac-K: 1.25.
- Rtd intrpt time 5 cycles.
- Rtd C&L current 112KA, crest.
- IB32 -255-1c.
- Motors 250V AC/DC.
- Close current 3.6A.
- Close v range 208-254 VAC.
- Trip- 1 current 15.5A.

L'unité CSTF est raccordée au poste Blindé de SONATRACH, de distance d'environ 400 Mètres.

Tension jeu de barre : 30KV $\pm 8\%$.

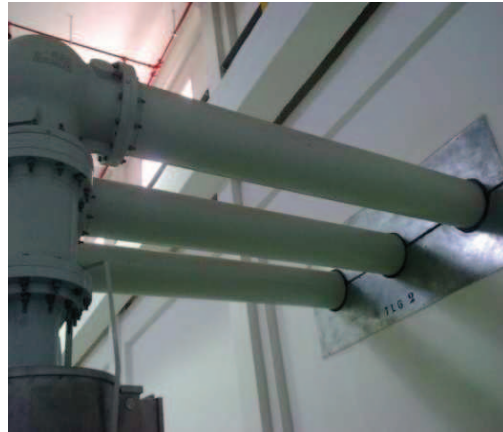
Fréquence du courant : 50Hz $\pm 5\%$.

II.3. DESCRIPTION DU POSTE BLINDE :

- Les jeux de barres sont extensibles avec un espace pour la maintenance.
- Les disjoncteurs 30KV et 5.5KV sont de type à gaz SF6.
- Les transformateurs 30/5.5KV sont de type extérieurs sous abris et séparés par des murs par feu.
- Les autres équipements sont installés à l'intérieure du bâtiment.
- Le système de protection électrique de type numérique.



Figure(III.4) : L'arrivée de la ligne 60kv



Figure(II.5) : Jeux de barres 60kv dans un gaz SF6



Jeux de barres 60kV

Disjoncteur SF6

Transformateur de tension de mesure

Figure(III.6) : A l'intérieur du poste blindé 60kv

III.1.3.1. Le réseau d'alimentation du poste blindé vers CSTF :



Figure(III.7) : le réseau d'alimentation



a. Transformateur électrique ABB 40MVA



Figure(III.8) : Transformateur électrique

Un transformateur électrique est un convertisseur permettant de modifier les valeurs de tension et d'intensité du courant délivrées par une source d'énergie électrique alternative, en un système de tension et de courant de valeurs différentes, mais de même fréquence et de même forme. Il effectue cette transformation avec un excellent rendement. Il est analogue à un engrenage en mécanique (le couple sur chacune des roues dentées étant l'analogie de la tension et la vitesse de rotation étant l'analogie du courant).

On distingue les transformateurs statiques et les commutateurs. Dans un transformateur statique, l'énergie est transférée du primaire au secondaire par l'intermédiaire du circuit magnétique que constitue la carcasse du transformateur. Ces deux circuits sont alors magnétiquement couplés. Ceci permet de réaliser un isolement galvanique entre les deux circuits. Dans une commutatrice, l'énergie est transmise de manière mécanique entre une génératrice et un moteur électrique.

b. Pylône

Un pylône électrique peut supporter plusieurs lignes (trois phases) avec un câble de garde. Les pylônes sont tous soigneusement reliés à la terre par un réseau de terre efficace. Les pylônes supportent les conducteurs par des isolateurs en verre qui résistent des tensions élevées des lignes électriques.



c. Isolateur

L'isolation entre les conducteurs et les pylônes est assurée par des isolateurs. Ceux-ci sont réalisés en verre, ou en matériau synthétique. Les isolateurs en verre ont en général la forme d'une assiette. Ils sont associés entre eux pour former des chaînes d'isolateurs. Plus la tension de la ligne est élevée, plus le nombre d'isolateurs dans la chaîne est important.

Exemple : le nombre d'assiettes utilisées, par SONELGAZ, pour chaque ligne électrique sont :

- Les lignes 30kV, les chaînes d'isolateurs comportent 3 à 4 assiettes.
- Les lignes 60kV, les chaînes d'isolateurs comportent 7 à 8 assiettes.
- Les lignes 220kV, les chaînes d'isolateurs comportent 17 à 18 assiettes.
- Les lignes 400kV, les chaînes d'isolateurs comportent 35 à 36 assiettes.

d. Câbles conducteurs

La plupart des conducteurs à haute tension sont en aluminium avec un centre en acier, lequel assure la résistance mécanique du câble. Les conducteurs sont nus : c'est l'air qui leur sert d'isolant. Chaque conducteur est toronné, c'est-à-dire formé de plusieurs brins enroulés ensemble. Cela lui confère une plus grande souplesse et une plus grande surface exposée à l'air, caractéristique qui refroidit le conducteur et qui augmente par conséquent sa conductivité. En effet, le métal chaud, plus résistant au passage de l'électricité, transforme une partie plus ou moins grande de l'énergie électrique en énergie thermique, une forme de perte électrique.

La section des câbles électriques utilisés par SONELGAZ pour chaque ligne électrique sont :

- Ligne 30kV.....48 mm².
- Ligne 60kV.....288 mm².
- Ligne 220kV.....411 mm².
- Ligne 400kV.....511mm².

e. Les batteries

Les batteries utilisé pour la continuation de la production en centre de cstf en cas du coupeur de l'électricité et peuvent produire pendant 3jour.



Figure(III.9) : les batteries

Chapitre IV : Equipements de protection

IV.1. Introduction

Les protections modernes sont numériques (les anciennes étaient électromécaniques, c'est encore la majorité de celles installées dans le réseau), le signal d'entrée est échantillonné (1000 Hz), et la mise au point d'algorithmes (placé sur mémoire EPROM) performant permet, sur base de la topologie de l'état des disjoncteurs (ouvert, fermé) ainsi que des tensions et courants mesurés d'en déduire une décision à prendre (ouverture de disjoncteurs). Les algorithmes dépendent du type de protection désiré : distance, intensité, différentiel

Les protections numériques présentent des avantages importants par rapport aux électromécaniques, notamment l'archivage d'incidents (statistique) ou oscillographie (accès aux informations avant, pendant et après le défaut).

Une protection doit être :

- Sélective (n'éliminer que la partie en défaut - ligne, transfo, appareillage, jeu de barres-, l'élimination de parties non en défaut peut être dramatique et conduire à des dépassements de capacité thermique voire déstabiliser le réseau).
- Sensible (notamment détecter les défauts très résistants).
- Rapide (pour réduire les conséquences des courts-circuits, notamment la stabilité du réseau et les efforts électrodynamiques) (décision en 20 ms, coupure après 70 à 100 ms).



- Fiable (éviter les déclenchements intempestifs).
- Autonome (ne pas devoir changer les réglages fréquemment).
- Consommer peu d'énergie.
- Etre insensible aux composantes apériodiques.
- Facile à mettre en œuvre et à maintenir.

IV.2. Types de relais électromécanique dans l'industrie



Figure(IV.1) : Les relais

Relais pour la protection électrique des lignes :

- 27 → relais minimum de tension.
- 45 → relais de manque ou inversion de phase.
- 47 → relais à effet thermique.
- 50 → relais de maximum de courant.
- 51 → relais de surintensité (électromagnétique).
- 51G → relais surtension à la terre.
- 64 → relais de surtension à la terre.
- 59 → relais de surtension jeu de barre.
- 67 → relais de retour de puissance (différentiel).
- 87 → relais différentiel.
- 95 → relais de fréquence



IV.3. Cellule électrique HTA (Disjoncteur à l'huile+relais de protection)



Figure (IV.2) : Cellule électrique

Un disjoncteur à haute tension est destiné à établir, supporter et interrompre des courants sous sa tension assignée (la tension maximale du réseau électrique qu'il protège), selon la définition donnée par la Commission Electrotechnique Internationale¹. Il opère à la fois :

- Dans des conditions normales de service, par exemple pour connecter ou déconnecter une ligne dans un réseau électrique;
- Dans des conditions anormales spécifiées, en particulier pour éliminer un court-circuit dans le réseau provoqué par la foudre ou d'autres causes.

De par ses caractéristiques, un disjoncteur est l'appareil de protection essentiel d'un réseau à haute tension, car il est seul capable d'interrompre un courant de court-circuit et donc d'éviter que le matériel connecté sur le réseau soit endommagé par ce court-circuit.

La coupure d'un courant électrique par un disjoncteur à haute tension est obtenue en séparant des contacts dans un gaz (air, SF₆..) ou dans un milieu isolant (par exemple l'huile ou le vide). Après séparation des contacts, le courant continue de circuler dans le circuit à travers un arc électrique qui s'est établi entre les contacts du disjoncteur.

Il existe 03 types de disjoncteur en HT et MT :

- Disjoncteur à air comprimé : l'air qui joue le rôle d'isolateur.
- Disjoncteur à huile : l'huile qui joue le rôle d'isolateur.
- Disjoncteur au SF₆ : SF₆ (c'est un gaz) qui joue le rôle d'isolateur.



IV.4. Le Gaz isolant SF6

L'hexafluorure de soufre (SF6) est utilisé dans notre équipement à tous les intervalles de température ambiante dans lesquels se trouve une disponibilité de celui-ci en état gazeux sans devoir pour autant procéder à une action de réchauffement. Le diagramme de la tension de la vapeur montre que SF6 se trouve dans un état liquide à +20°C avec une pression absolue de 22 bar; à +30°C il est dans un état liquide avec une pression absolue de 28 bar.

Le SF6 ne suit donc pas tout à fait la loi des gaz parfaits. Chose qu'on l'eut peut remarquer à travers la description de 2 démonstrations de la variation de la pression à volume constant avec des densités de remplissage différentes. Il est particulièrement clair que la température de -40°C peut être atteinte sans liquéfier le gaz si la densité de remplissage est équivalente à la pression absolue de 4.5 barre à +20°C.

IV. 4.1. Production de SF6 :

Le SF6 est un produit industriel obtenu à travers la synthèse directe du fluor et du soufre fondu. Le produit obtenu est raffiné en le nettoyant, en le fissurant et en le séchant. Puis il vient liquéfier par compression afin d'éliminer les éléments non-condensables (tels qu'oxygène et azote atmosphérique ou tétrafluorure de carbone). Ceci avant d'être placé sous pression dans des citernes en acier.

IV. 4.2 Caractéristiques physiques et chimiques :

Le SF6 est un gaz incolore et inodore. Ses propriétés principales peuvent être résumées comme suit:

- Poids moléculaire: 146.07
- Température critique: + 45.5°C
- Pression critique: 37,5 bar
- Densité critique: 0,730 g/cm³
- Densité à 20°C:
- Avec une pression absolue de 1 bar (pression atmosphérique): 6,16 g/dm³
- Avec une pression absolue de 2 bar 12,5 g/dm³
- Avec une pression absolue de 6 bar 37 g/dm³



La vitesse du son dans le SF6 est de 1/3 comparée à celle de l'air. Le SF6 est particulièrement stable et inerte. Il n'y a qu'une chaleur décomposée au-dessus de 500°C. Une décomposition partielle du SF6 peut être observée dans les cours de l'action. Dans une décomposition, les produits sont essentiellement gazeux (fluorures de soufre de degré inférieur ou composés de soufre fluor oxygène) et solides (fluorures et sulfures métalliques).

IV. 4.3 Propriétés électriques :

Le SF6 a des propriétés diélectriques excellentes. Dans des conditions comparables, la résistance diélectrique du SF6 est approximativement 2.5 fois supérieure à celle de l'air. Même si ces propriétés sont conditionnées par des facteurs différents, elles sont liées essentiellement au caractère fortement électronégatif de la molécule SF6 qui capture les électrons libres ainsi qu'aux délais de l'"effet d'avalanche" qui provient de la décharge fracturée. Pour cette même raison le SF6 est un agent d'extinction de l'arc dans lequel l'efficacité peut être estimée comme étant 10 fois plus élevée que celle de l'air.

IV. 4.4 Fournisseurs :

Le SF6 est disponible dans plusieurs pays. Parmi les fournisseurs principaux il y a:

- En Italie: MONTEDISON;
- En France: PECHINEY, PRODELEC;
- En Allemagne: KALI - CHEMIE;
- En Angleterre: IMPERIAL CHEMICAL INDUSTRIES
- En Amérique Nord: ALLIÉD CHEMICAL

Contrôle de la résistance diélectrique :

La résistance diélectrique est considérée comme une caractéristique fondamentale du SF6. Le contrôle de cette force rend l'identification du gaz possible et permet de savoir si le gaz peut garantir sa fonction d'isolant. La résistance diélectrique peut être mesurée simplement en utilisant une cellule équipée d'un intervalle d'étincelle qui est alimentée par un élevé générateur de voltage.

IV.4.5. Avantages technologiques

- Quelles sont les performances techniques du gaz SF6 ?
 - Réduction des volumes d'isolation (le SF6 est deux fois plus efficace que l'air).



- Meilleure dissipation thermique que dans les équipements isolés à l'air.
- Capacité de coupure élevée et faible énergie de fonctionnement (les propriétés de coupure du gaz SF6 sont 100 fois plus élevées que celles de l'air).
- Excellente durabilité.
- A l'état pur, le gaz SF6 n'est ni toxique ni inflammable.
- Protection élevée vis-à-vis des conditions ambiantes grâce à la technologie de "Système hermétique sous pression".
- Quels sont les avantages des appareils électriques MT contenant du gaz SF6 en ce qui concerne l'installation ?
 - Espace requis pour l'installation très restreint.
 - Conditions ergonomiques favorables, du fait du faible volume et du poids relativement léger.
 - Choix du site d'installation effectué indépendamment de l'altitude.
 - Utilisation recommandée dans des conditions climatiques difficiles (zone littorale, forte pollution industrielle, etc.)
- Quels sont les avantages au niveau de l'utilisation ?
 - Probabilité de défaillance extrêmement faible, du fait du niveau de rendement élevé, et de la protection du système d'isolation contre tout effet de dégradation.
 - Sans entretien.
 - Longue durée de service.
 - Faible énergie de fonctionnement, ce qui facilite la mise en œuvre des programmes de contrôle à distance et/ou d'automatisation. Ceci permet d'obtenir un rétablissement rapide du service après une défaillance sur le réseau.
- .- Coupure uniforme, avec de très faibles perturbations de surtension transitoire.
- Quels sont les avantages sociaux et économiques ?
 - Le design de nos produits contenant du gaz SF6 induit une consommation minimale de ressources matérielles (matières plastiques, métaux, etc.)
 - Coûts de première installation et coûts de fonctionnement relativement faibles.



- Continuité de service élevée.
- Impact visuel faible, ce qui facilite l'acceptation sociale du poste.
- Sécurité pour les personnes et les biens, du fait de la faible probabilité de défaillances sévères et de la limitation du risque d'incendie, etc.

PARTIE PRATIQUE

1 .Détermination de la rigidité diélectrique de l'huile » BORAK 22 »



Figure (1) : Régulateur de tension



Figure (2) : Les électrodes sphère-sphère

En vue tester la rigidité diélectrique de l'huile « BORAK 22 », on prend un échantillon de ce huile qui est utilisé dans les transformateurs de BT :30KV/400V ,630K pour voir as que il garde ses propriétés d'isolement .

On utilise un récipient avec deux électrodes en forme sphérique. Le niveau de l'huile doit dépasser le niveau des électrodes, le rayon de la sphère est de 0.5 cm et la distance entre les électrodes est de 2.5 cm.

L'essai se fait en augmentant la tension de zéro jusqu'au claquage de l'huile.

Les résultats sont montrés dans le tableau suivant :

essais	1	2	3	4	5	moy
V(kv)	50	37	50	43	50	46

D'après la moyenne, on a $46\text{kv} > 20\text{kv}$, donc les propriétés d'isolement de ce huile sont bonnes.



2. Révision d'un disjoncteur 5.5kv ACB :

On a fait l'entretien pour ce disjoncteur tel que on a enlevé la poussière pour éviter le contacte entre les broches et la carcasse lorsque il y'a l'humidité, et aussi on a fait un teste pour voir as que le disjoncteur est en bon état de fonctionnement.



Figure(3) : Disjoncteur

3. Révision d'un Moteur d'expédition du condensat 50-PM003B 5.5KV :

A cause de bruit qui est entendu (révision curative), ils ont démonté le moteur soigneusement pour voir quel est le problème.

Ils ont trouvé que le graisse coté ventilo a été grée a cause de l'échauffement parce que le roulement qui était utilisé n'est pas similaire pour ce moteur (ils ont utilisé un roulement qui ressemble et porte pas la même référence que celui du constructeur de moteur a cause de l'indisponibilité de cette pièce).

Après ils ont changé le faux roulement par le bon et monté le moteur.



Figure(4) : Moteur 5,5Kv



Figure(5) : La Carcasse du moteur 5,5Kv



Figure (6) : Echauffement de rotor



Figure(7) : Le rotor avec la graisse grée

CONCLUSION

Durant notre stage, nous avons eu l'occasion d'appliquer nos connaissances théoriques, et d'apprendre pas mal d'applications pour la vie professionnelle, ainsi d'avoir visionné des différents instruments, appareils, et procédé du CSTF et les moyens utilisés pour la maintenance en bon état de fonctionnement.

Nous avons assisté également à quelques interventions sur les transformateur, disjoncteur, les onduleurs, teste de vibration, les moteurs asynchrones. Ce que donné le type de maintenance soit préventive ou bien curative. Malgré la courte durée de ce stage, nous pouvons le considérer comme une expérience enrichissante et réussie.