

REPUBLIQUE ALEGRIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE
Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique
Université Mouloud Mammeri de Tizi-Ouzou
Faculté de Génie Electrique et d'informatique
Département Electrotechnique



MEMOIRE

De fin d'études en vue de l'obtention du Diplôme
D'INGENIEUR D'ETAT EN ELECTROTECHNIQUE
Option : Réseaux Electriques

Thème

*Contribution à l'étude de l'effet des
décharges électriques sur la surface d'un
solide isolant sous tension alternative 50Hz*

Proposé et Dirigé par :
M. M.A. Handala

Présenté par :
Kerroui Zahia
Chemloule Nabila
Kecir Karima

Promotion : 2008

Remerciements

On tient à exprimer nos vifs remerciements et nos sincères reconnaissances à notre promoteur Monsieur M.M.A. HANDALA pour sa disponibilité, Ses conseils judicieux, Ses directives et Ses orientations concernant le travail proposé tout en nous accordant sa confiance et en nous faisant profiter de sa large expérience tout au long de la réalisation de ce projet de fin d'études.

Nous remercions M^{elle} Kireche Nora pour son aide durant ce travail.

Nous remercions les membres du jury qui nous ont fait l'honneur de participer au jugement de ce travail.

Nos remerciements vont aussi à l'ensemble de nos professeurs du Génie Electrique, qu'ils trouvent ici l'expression de nos sentiments les plus respectueux.

Un grand merci à nos familles respectives en particulier à nos parents, pour nous avoir soutenues et aidées tout au long de nos études.

Nous tenons aussi à remercier vivement tous ceux qui nous ont aidées de près ou de loin à élaborer ce projet, à savoir les collègues de notre promotion et tous nos amis.

Dédicaces

Je dédie ce modeste travail à :

- *La mémoire de ma chère mère. Malgré son absence, nous la portons toujours dans nos cœurs,*
- *Mon cher père et ma belle mère,*
- *Mes chers grands parents maternels à qui je souhaite une longue vie, mes tantes et mes oncles,*
- *Mes frères : Amrane, Menad, Laarbi, Hamza, Ghilas,*
- *Mes soeurs : Lynda, Lamia, Ryma et toute ma famille,*
- *Ma grand-mère à qui je souhaite une longue vie,*
- *A tous mes amis (es), avec qui j'ai passé des moments inoubliables.*

Nabila

Je dédie ce modeste travail à :

- *Mes chers parents que j'aime beaucoup,*
- *Mes frères : Bachir, Omar et Youba,*
- *Mes sœurs : Lila et Nadia,*
- *Mes neveux et nièces,*
- *A tous mes amis (es).*

Karima

Je tiens à dédier ce modeste travail à toutes les personnes qui me sont chères :

- *Mes parents,*
- *Mes frères : Karim, Arezki, Mokrane, Ali, Saïd , Amar,*
- *Mes sœurs : Razika, Djamilia, Nacira, Fatima,*
- *Mes belles sœurs et beaux frères,*
- *Mes neveux et nièces,*
- *A tous les gens que j'aime,*
- *A celles qui ont partagé avec moi le parcours jusqu'à l'aboutissement de ce travail : Karima et Nabila.*

Zahia

SOMMAIRE

Introduction générale	1
-----------------------------	---

Chapitre I : Généralité sur les isolants solides

I.1.Introduction	3
I.2. Définition	3
I.2.1. Diélectrique.....	3
I.2.2 Isolant.....	3
I.3. Caractéristique générales des isolants solides	3
I.3.1. Résistance et résistivité transversales	3
I.3.1.1. Méthode de mesure de résistance transversale.....	4
I.3.2. Résistance et résistivité superficielles.....	5
I.3.3. Résistance d'isolement	6
I.3.4. Influence de divers paramètre sur la résistivité	6
I.3.4.1. Influence de la température	6
I.3.4.2. Influence de l'humidité	6
I.3.4.3. Influence du champ appliqué	7
I.3.4.4. Influence de la nature des électrodes	7
I.4. Rigidité diélectrique	7
I.4.1. Définition	7
I.4.1.1. Rigidité intrinsèque	8
I.4.1.2. Rigidité pratique	8
a- Rigidité intrinsèque	8
b- Rigidité diélectrique longitudinale.....	8
I.4.2.Influence de divers paramètres sur la rigidité	9
I.4.2.2. Influence de la tension appliquée	9
I.4.2.3. Influence de l'épaisseur et homogénéité de l'éprouvette	9
I.4.2.4. Influence de la température	9
I.4.2.5. Influence de caractéristique électrique et thermique	9
I.4.3. Mécanisme de claquage	9
I.4.3.1 Claquage électronique	10
I.4.3.2. Claquage électromécanique	10
I.4.3.3. Claquage Thermique	10
I.4.3.4. Claquage pratique	10
I.5. Constante diélectrique ou permittivité	11
I.6. Polarisation	11
I.6.1. Moment dipolaire	12
I.6.2. Mécanisme de polarisation	12
I.6.2.1. Polarisation électronique	13
I.6.2.2.Polarisation dipolaire ou d'orientation.....	13
I.6.2.3. Polarisation inter facial.....	14
I.6.3.3. Polarisation ionique	14
I.7. Pertes diélectrique	15
a- relaxation	16
I.8.Conclusion.....	16

Chapitre II : Les polymères

II.1. Introduction.....	17
II.2. Définition.....	17
II.3. Utilisation des polymères	17
II.4. Classification des polymères.....	17
II.4.1. Origine des matériaux	18
a- polymères naturels	18
b- polymères synthétiques	18
II.4.2. La nature chimique.....	18
a- Les polymères minéraux	18
b- polymères organique	18
c- Polymères mixtes	18
d- Les polymères polaires.....	18
e- Les polymères apolaires	18
II.4.3. Structure moléculaire des polymères	19
II.4.3.1. Les homopolymères	19
a- Linéaires.....	19
b- Ramifiés.....	19
c- Réticules.....	19
II.4.3.2. Les copolymères.....	19
a- Copolymères statiques	19
b- Copolymères séquences	20
c- Copolymères greffes	20
d- Copolymères en étoile	20
II.4.3. Polymérisation	20
a- Polyaddition.....	20
b- Polycondensation	20
II.5. Procèdes de polymérisation	20
a- En masse.....	20
b- En solution	21
c- En émulsion	21
d-En suspension.....	21
II.6. Différent types de polymères.....	22
II.7. Familles des polymères	23
II.7.1. Les thermoplastiques	23
II.7.2. Les élastomères	23
II.7.3. Les thermodurcissables	23
II.8. Propriété des polymères.....	23
II.8.1. Propriétés mécaniques	23
II.8.2. Propriétés physiques	24
II.8.3. Propriétés optiques	24
II.8.4. Propriétés thermiques	24
II.8.5. Propriétés électriques	24
II.8.6. Propriétés chimiques.....	24
II.9. Conclusion.....	25

Chapitre III : Les décharge électrique

III.1. Introduction.....	26
III.2. Les différentes décharges électriques	26
III.2.1. Définition d'une décharge	26
III.2.2. Les décharges partielles	26
III.2.2.1. Les décharges internes	26
III.2.2.2. La décharge couronne	27
III.2.2.3. Les décharges superficielles	28
III.2.2.4. Les décharges glissantes	28
III.2.3. Les décharges arborescentes	28
III.2.3.1. Les arborescences électrochimiques.....	28
III.2.3.2. Les arborescences électriques	29
III.3. Les décharge de surfaces	29
III .3.1. Processus de la décharge du surface dans l'isolant solide	29
III.3.2. Similarité de la décharge glissante avec la décharge de foudre	31
III.3.3. Méthode de LIGHTTEHBERG	31
III.3.4. Travaux de MOROKA	32
III.3.5. Tension d'apparition de décharges glissantes	32
III.3.6. Propagation des décharges glissantes	32
a- Pointe positive.....	33
b- Pointe négative	34
III.4. Influence de la distance inter électrode sur $V_{C50\%}$ et $V_{50\%}$	35
III.5. Conclusion	36

Chapitre IV : Dégradation superficielle des polymères isolants

IV.1. Introduction	37
IV.2. Définition	37
IV.3. Les différentes contraintes de dégradation superficielle	37
IV.3.1. Contraintes thermiques	37
IV.3.2. Contraintes climatiques	38
IV.3.2.1. Rayonnement ultraviolet	38
IV.3.2.2. Rayonnement visible et infrarouge	38
IV.3.3. Contraintes mécaniques	39
IV.3.4. Contraintes électriques	39
IV.4. Les différents processus de dégradation superficielle	40
IV.4.1. Les processus chimiques	40
IV.4.1.1. Oxydation	40
IV.4.1.2. Hydrolyse	41
IV.4.1.3. Coupure de la chaîne statique	41
IV.4.1.4. Dépolymérisation	41
IV.4.1.5. Réticulation	42
IV.4.2. Les processus physiques.....	42
IV.4.2.1. Avec transfert de masse.....	42

a- Absorption d'un solvant.....	42
b- Migration d'adjuvant.....	43
IV.4.2.2. Sans transfert de masse.....	43
a- Fissuration sous contrainte en milieu tension actif	43
b- Relaxation de volume et enthalpie	43
c- Les chocs thermiques.....	44
d- Matériaux hétérogènes.....	44
e- Gradient de température dans l'épaisseur d'isolant.....	44

Introduction générale

Dans les systèmes haute tension les isolants solides sont les plus employés, à cause de leurs excellentes propriétés diélectriques, thermiques et mécaniques.

Les isolants constituent une grande famille de par leur nature (polymères, verre, céramique, bois, papier, carton, huile, air, vide, gaz...). Ils se présentent sous diverses formes (solides, liquides, gazeux) et ont des propriétés variées. La fonction d'isolation électrique est primordiale, en ce sens qu'elle est l'une des conditions fondamentales du fonctionnement des matériels de production, de transport et de distribution d'énergie électrique.

Dans notre travail nous nous sommes intéressés à l'étude des polymères isolants qui sont largement utilisés dans les équipements électriques pour les avantages qu'ils présentent : Une rigidité diélectrique élevée, des faibles pertes diélectriques, un faible poids, esthétique, un faible prix, une hydrophobicité élevée et bonnes propriétés mécaniques.

Certaines contraintes telles que la température, l'humidité, la pression, le champ électrique appliqué et les impuretés peuvent affecter les propriétés et faire perdre ses qualités au polymère, ce qui lui cause la dégradation.

Le phénomène de la décharge superficielle revêt un grand intérêt du point de vue scientifique, particulièrement avec l'augmentation des problèmes pratiques, car les décharges superficielles sont très nuisibles aux systèmes d'isolation haute tension. Pour y remédier, plusieurs recherches ont été menées en utilisant la méthode optique de LIGHTENBERG.

L'action des décharges électriques provoque la dégradation de l'isolant qui engendre la perte de leurs propriétés physico-chimiques.

Le travail que nous présentons s'insère dans le cadre de l'effet de la décharge sur la surface d'un isolant solide. Il comprend deux parties.

La première partie sera consacrée à l'étude théorique qui comporte quatre chapitres :

- Rappel sur les généralités des isolants solides (différents types, caractéristiques).
- L'étude des polymères (différents types, propriétés, polymérisation).
- Les décharges électriques et leur développement à la surface d'un isolant solide.

➤ Le quatrième chapitre traite le phénomène de dégradation superficielle des polymères Isolant, et les techniques d'analyse de la surface.

La deuxième partie est réservée à l'observation expérimentale de l'effet de la décharge sur la surface d'un isolant solide (PMMA). Dans ce chapitre nous présenterons le matériau utilisé, le schéma de montage ainsi que les résultats suivis d'une discussion.

Nous terminons notre étude par une conclusion générale.

I.1. Introduction

Les matériaux isolants de base utilisés dans la construction électrique sont des produits de fabrication très élaborée. Ils relèvent de techniques minutieuses qui doivent garantir la pureté et l'homogénéité indispensable aux applications électriques. Les matériaux électriques peuvent être classés en trois grandes catégories : les conducteurs, les semi conducteurs et les isolants. [1].

I.2. Définition

On peut adopter les définitions suivantes

I.2.1. Diélectrique

Substance dont la propriété électromagnétique fondamentale est d'être polarisable par un champ électrique.

I.2.2. Isolant

Substance qui a une conductivité électrique suffisamment faible pour être utilisée afin de séparer des pièces conductrices portées à des potentiels différents [1].

I.3. Caractéristiques générales des isolants solides

Le rôle essentiel des isolants solides est de servir de barrière au courant électrique. Ils ont également le rôle de maintenir mécaniquement les conducteurs dans des conditions prédéterminées. En pratique aucun isolant n'est parfait c'est pourquoi il est nécessaire de définir certaines propriétés comme la résistance, la rigidité et la permittivité [2].

I.3.1. La résistance et la résistivité transversale (volumique)

La résistance transversale (volumique) est le quotient de la tension continue appliquée 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 en ne tenant pas compte des phénomènes de polarisation éventuels sur les électrodes (CEI 93) [2].

$$R_t = \frac{V}{I} \quad \text{(I.1)}$$

R_t : s'exprime en ohm [Ω],

V : tension applique [V],

I : Intensité de courant [I].

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

I.3.1.1. Méthode de mesure de la résistance transversale

Les isolants conduisent toujours un faible courant qu'on peut mesurer avec un électromètre et un multimètre à courant continu capable de mesurer des courant jusqu'à 10^{-17} A. Pour mesurer la résistance transversale d'une éprouvette, il faut s'affranchir du courant superficiel. Pour y parvenir, on utilise une troisième électrode appelée électrode de garde qui dérive à la terre les courants superficiels. L'électrode de garde a pour rôle donc d'écouler tous les courants ne passant pas directement entre l'électrode haute tension et l'électrode de mesure (l'électrode gardée). [2]

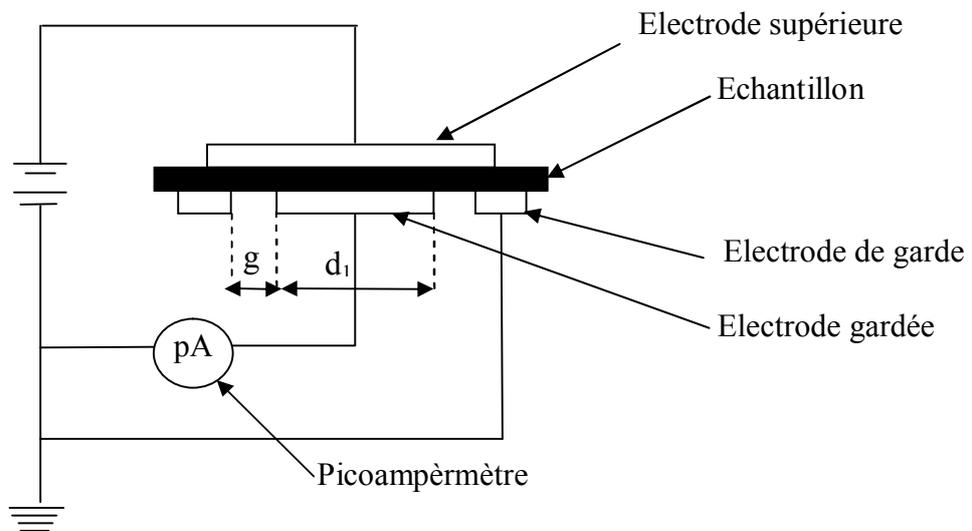


Fig.I.1: Circuit de mesure de la résistivité transversale

En utilisant ce système d'électrodes, on peut passer des résistances transversales R_t aux résistivités ρ_t :

$$\rho_t = R_t \frac{S}{e} \quad (\text{I.2})$$

$$S = \pi \frac{(d_1 + g)^2}{4} \quad (\text{I.3})$$

Avec :

- d_1 : Diamètre de l'électrode gardée,
- g : Distance entre l'électrode gardée et l'anneau de garde,
- e : épaisseur de l'échantillon,

I.3.2. Résistance et résistivité superficielle

La résistance superficielle, (ou de surface), 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 de la tension sans tenir compte des phénomènes de polarisation éventuels sur les électrodes [2].

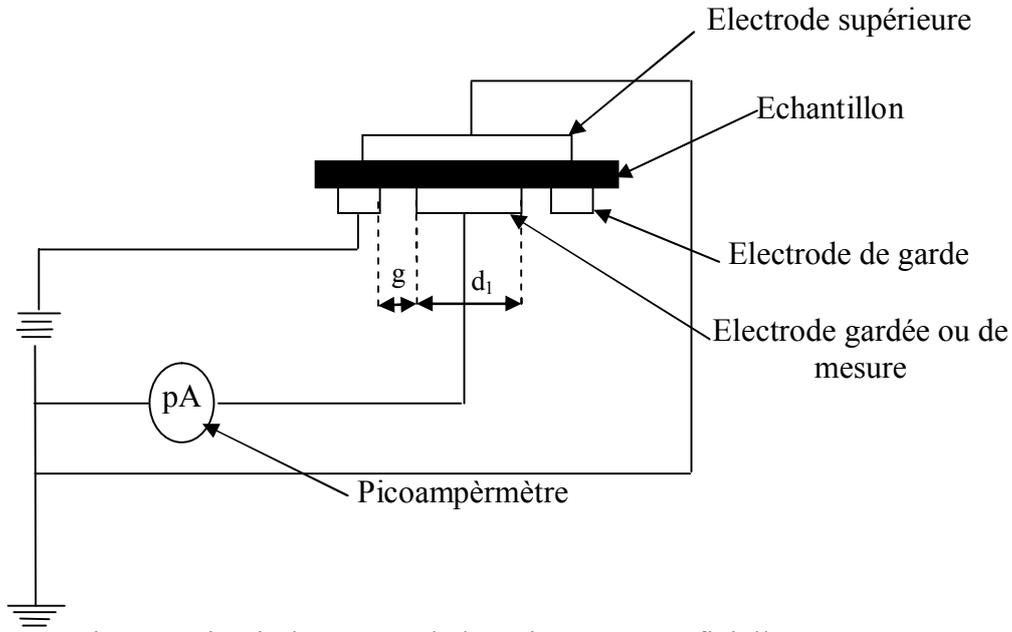


Fig.I.2 : Circuit de mesure de la résistance superficielle

La résistivité superficielle ρ_s est le quotient du gradient de potentiel en surface par le courant par unité de largeur.

$$\rho_s = R_s \frac{p}{g} \quad (\text{I.4})$$

$$p = \pi(d_1 + g) \quad (\text{I.5})$$

Avec :

d_1 : Le diamètre de l'électrode gardée,

g : distance entre l'électrode gardée et l'anneau de garde,

p : périmètre de l'électrode.

I.3.3. Résistance d'isolement

La résistance d'isolement est le quotient de la tension continue appliquée entre deux électrodes en contact avec l'échantillon par le courant totale qui le 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 (CEI 167). [2]

I.3.4. Influence de divers paramètres sur les résistivités

Les résistivités dépendent de la température, de l'humidité, du champ appliqué et du temps d'application de la tension [2].

I.3.4.1. Influence de la température

Dans un intervalle de température donné, la résistivité dépend de la température selon la loi suivante :

$$\rho = \rho_0 \exp \frac{E_A}{kT}$$

T : température absolue (K),

k : constante de Boltzman ($k = 1.38 \cdot 10^{-23} \text{ J.K}^{-1}$),

E_A : Énergie d'activation (J),

E_A est donné par la pente de la droite $\ln \rho = f\left(\frac{1}{T}\right)$.

$$\ln \rho = \frac{E_A}{k} \frac{1}{T} + \ln \rho_0$$

La linéarité est en général vérifiée dans un domaine de température assez étendu lorsque l'on sort de l'intervalle de linéarité. On constate une rupture de pente qui traduit un changement dans le mécanisme de conduction [2].

I.3.4.2. Influence de l'humidité

L'humidité a une grande influence sur la résistivité des isolants solides. Pour la résistivité transversale, il s'agit surtout, de la teneur en eau du matériau exprimée par exemple en pourcentage de sa teneur en eau à saturation.

Le rapport entre la résistivité transversale d'un matériau parfaitement sec et celle du même matériau à saturation d'eau dépend du caractère hygroscopique de celui-ci. La résistivité superficielle dépend surtout de l'humidité relative de l'air ambiant [2].

I.3.4.3. Influence du champ électrique appliqué

En champ faible, les matériaux isolants suivent en général la loi d'ohm, leur résistivité est indépendante du champ appliqué. En champ fort, on constate généralement une décroissance de la résistivité, lorsque le champ appliqué augmente à cause de l'injection d'électrons aux électrodes et par la présence d'impuretés ou de défaut dans le matériau. Dans le domaine ohmique on doit mesurer la résistivité en champ faible, et pour obtenir le maximum de précision on doit choisir le champ le plus élevé. Pour comparer les résistivités des matériaux, il faut appliquer le même champ [2].

I.3.4.4. Influence de la forme des électrodes

Les électrodes doivent s'attacher parfaitement à la surface du matériau, car toute lame d'air incluse entre l'électrode et la surface modifie le résultat à cause de la résistivité de l'air très élevée.

I.4. Rigidité diélectrique des isolants solides

I.4.1. Définition

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

est donnée par $E = \frac{V}{d}$.

V : tension maximum appliquée,

d : épaisseur d'isolant.

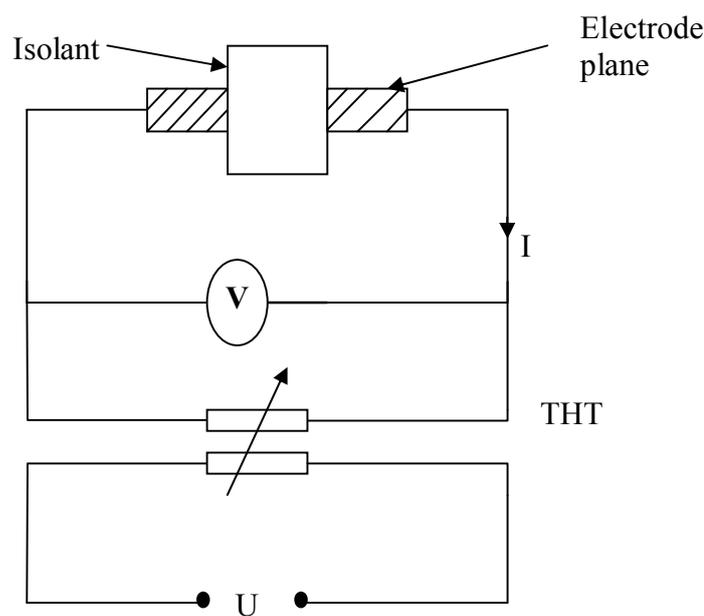


Figure I. 3: principe de mesure de rigidité

I.4.1.1. Rigidité intrinsèque

La rigidité intrinsèque est liée à la structure chimique du matériau. Pour la mesure de cette rigidité, le champ doit être le plus uniforme possible avec des effets de bords négligeables et les défauts existant dans le volume de l'isolant doivent être réduits [2].

I.4.1.2. Rigidité pratique

Elle présente un intérêt très important pour les applications industrielles, la rigidité diélectrique pratique est généralement obtenue en appliquant la procédure décrite dans la norme (CEI 243), qui décrit deux grandes familles de méthodes d'essai [2].

➤ Rigidité diélectrique transversale

Le champ électrique est appliqué perpendiculairement à la surface du matériau. La norme précitée décrit les différents types d'électrodes à choisir selon que l'on veut essayer des matériaux en plaque ou en films.

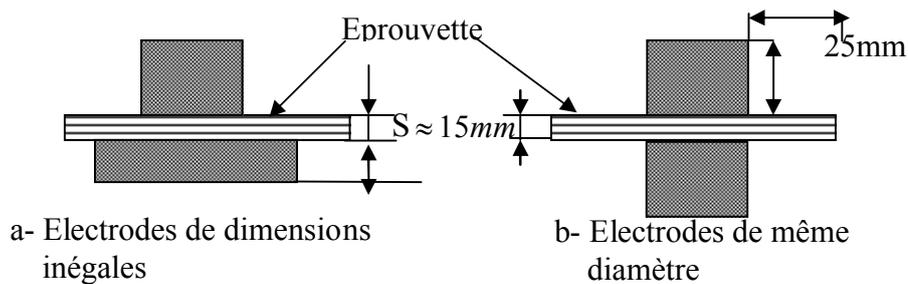


Fig.I.4. Disposition des électrodes pour la mesure de rigidité diélectrique planches et feuilles perpendiculaires à la surface

➤ Rigidité diélectrique longitudinale

Le champ est appliqué parallèlement à la surface du matériau.

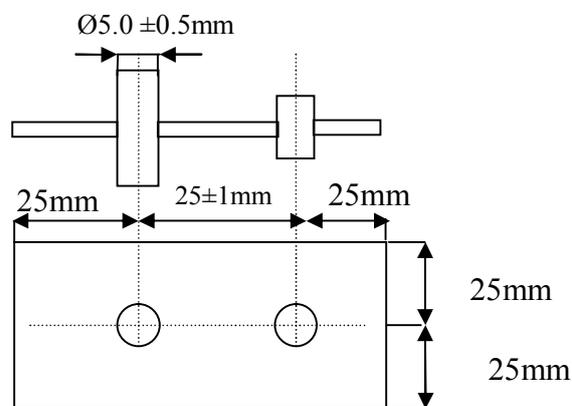


Fig.I.5. Eprouvette plane avec électrodes à broches

I.4.2. Influence de divers paramètres sur la rigidité diélectrique

Des divers paramètres influant sur le résultat d'un essai de rigidité diélectrique, nous n'en citons ici que quelques-uns [2].

I.4.2.1. Influence de la tension appliquée

La rigidité diélectrique est influencée par la tension appliquée selon sa forme d'onde et sa fréquence. On retiendra que la rigidité diélectrique en tension continue est souvent proche de celle en tension alternative. On constate expérimentalement que l'augmentation de la vitesse d'application de la tension augmente la tension de claquage [2].

I.4.2.2. Influence de l'épaisseur et de l'homogénéité de l'éprouvette

L'augmentation de la densité de défauts dans le volume soumis au champ réduit considérablement la valeur de la rigidité diélectrique. C'est pour cette raison que l'augmentation de l'épaisseur de l'éprouvette réduit la valeur de la rigidité diélectrique [2].

I.4.2.3. Influence de la température

La température a un grand effet sur la rigidité. Lorsqu'on augmente la température, on réduit la rigidité diélectrique et cela se traduit par l'augmentation de la conduction et l'obtention d'un claquage électromécanique [2].

I.4.2.4. Influence des caractéristiques électriques et thermiques du milieu ambiant

Ces caractéristiques interviennent par le biais des décharges superficielles qui peuvent se produire dans ce milieu et en particulier dans l'air et réduisent la tension de claquage. La permittivité et la résistivité du milieu ambiant ont également une très grande influence sur la rigidité diélectrique et ça en modifiant la répartition du champ électrique.

I.4.3. Mécanismes de claquage

Les diélectriques utilisés comme isolants doivent supporter des champs électriques élevés, supérieurs au champ électrique critique E_c , appelé rigidité diélectrique du matériau. On observe la destruction de l'isolant par un ensemble de mécanismes appelés globalement claquage [2].

I.4.3.1. Claquage électronique

Le claquage électronique est produit par les électrons présents dans le matériau, dont l'origine peut être soit l'ionisation stimulée par l'effet Poole-frenkel, soit des rayons cosmiques. La distribution d'énergie de ces électrons augmente avec le champ appliqué, et à partir d'une valeur critique de ce champ (E_c), des électrons sont produits en nombre suffisant pour entraîner la destruction du réseau appelée claquage [2].

I.4.3.2. Claquage électromécanique

La théorie de ce type de claquage est due à Stark et Garton. Elle prend en considération deux électrodes entre lesquelles est appliquée une ddp, l'effort comprime l'isolant placé entre les deux électrodes. Le claquage se produit lorsque cet effort de compression dépasse la résistance mécanique du matériau qui dépend de son module de Young.

Ce type de claquage peut se produire dans les polymères thermoplastiques surtout lorsqu'on se rapproche de la température où leur module d'Young baisse significativement [2].

I.4.3.3. Claquage thermique

La conductivité d'un diélectrique engendre un dégagement de chaleur par effet joule, et par relaxation en présence d'un champ alternatif à une fréquence proche d'une transition. Les pertes diélectriques se traduisent par dégagement de chaleur dans l'isolant, et l'augmentation de la température augmente la conductivité.

La chaleur produite par effet joule est donnée par :

$$\sigma E^2 = C_v \rho \frac{dT}{dt} - \text{div}[K \text{grad} t]$$

Avec C_v : capacité thermique massique à volume constant,

ρ : Masse volumique,

σ : Conductivité électrique,

K : conductivité thermique,

t : temps en s.

I.4.3.4. Claquage pratique

Dans la pratique, le claquage diélectrique des isolants solides se produit le plus souvent à des valeurs de champ électrique très inférieures à celles citées dans les théories précédentes. La raison en est que le claquage se produit toujours au point le plus faible du volume de

l'isolation soumise au champ. Ce point correspond généralement à la présence d'un défaut par exemple :

- Les inclusions gazeuses,
- Les parties d'électrode à faible rayon de courbure,
- Les inclusions solides.

Le claquage peut se produire également à partir de dégradations progressives du matériau

- décharge partielle ou décharge superficielle,
- arborescence électrique ou électrochimique [2].

I.5. Constante diélectrique ou permittivité

La constante diélectrique est un facteur propre à chaque matériau isolant, il indique combien de fois la capacité d'un condensateur est plus élevée avec ce matériau diélectrique qu'avec l'air.

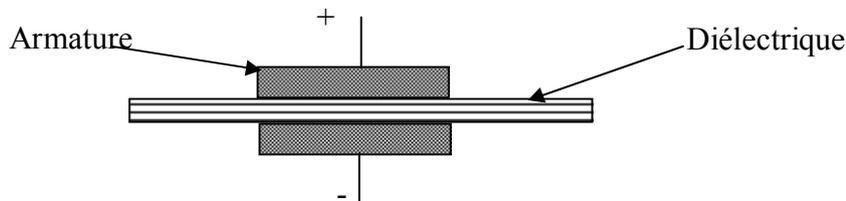


Fig.I.6. Principe de mesure de la permittivité

La permittivité relative d'un diélectrique est le rapport de la capacité d'un condensateur placé dans le vide C_0 et celle mesurée après l'introduction du matériau. Elle permet le choix

des matériaux, on trouve que le rapport : $\frac{C}{C_0} = \epsilon_r$

$\epsilon_r > 1$ est la permittivité relative du matériau elle est souvent appelée constante diélectrique ou pouvoir inducteur spécifique, c'est une caractéristique du diélectrique. La permittivité absolue ϵ est définie par la relation : $\epsilon = \epsilon_r \epsilon_0$

I.6. la polarisation

Considérons le cas d'un diélectrique dont les molécules ne peuvent pas être assimilées à des dipôles permanents. En soumettant le matériau à un champ électrique, les centres des charges positives et négatives ne vont plus coïncider ; chaque atome ou molécule se déforme et peut être assimilé alors à un dipôle dont le moment a pour valeur [4]

$$\vec{p} = q\Delta\vec{l}$$

$\vec{\Delta l}$ est le vecteur qui joint les charges q et $-q$.

Si les dipôles existent déjà, cela peut avoir comme effet de les aligner tous dans la même direction d'un point de vue microscopique. On peut relier l'amplitude de l'onde aux dipôles créés via la notion de polarisabilité, qui est une caractéristique propre à chaque atome. Il est donc impossible de mesurer de telles grandeurs microscopiques, on préfère utiliser une grandeur macroscopique [3].

La polarisation \vec{P} est souvent proportionnelle au champ électrique \vec{E} qui la crée

$$\vec{P} = \epsilon\chi\vec{E}$$

ϵ_0 : Permittivité du vide,

χ : Susceptibilité électrique.

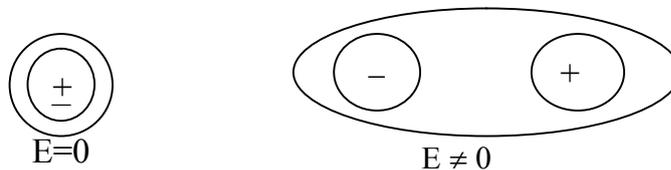
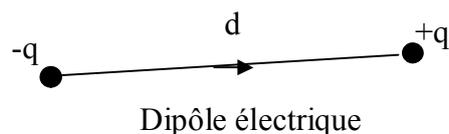


Fig. I.7. La polarisation électronique

I.6.1. Moment dipolaire

Un dipôle électrique est un système formé de deux charges ponctuelles de même valeur mais de signes opposés



Dipôle électrique

L'importance de ce dipôle est mesurée par son moment dipolaire \vec{p} défini par :

$$\vec{P} = q \cdot \vec{d}$$

I.6.2. Mécanisme de polarisation

On conçoit que sous l'action d'un champ électrique, les molécules non polaires et polaires vont être polarisées selon des mécanismes différents [3].

I.6.2.1. Polarisation électronique

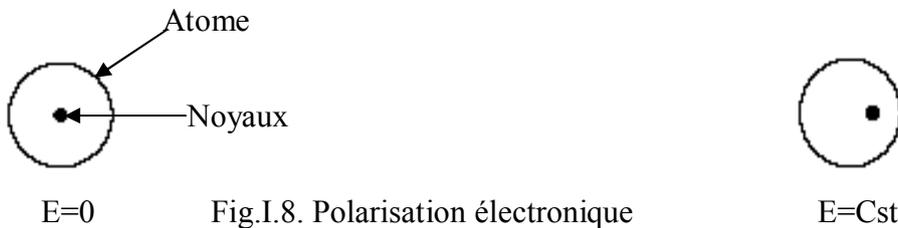
Le déplacement des électrons par rapport au noyau d'un atome fait apparaître une polarisation dont le temps d'établissement est très court [$\approx 10^{-15} s$].

$$\vec{p}_e = N\alpha_e \vec{E}_L$$

Avec \vec{E}_L : Champ local,

α_e : est une constante dépendant du rayon r de l'atome ($\alpha_e = 4\pi\epsilon_0 r^3$).

Pour un diélectrique neutre, en pratique non polaire, présentant ce type de polarisation, la relation de Maxwell $\mu = \sqrt{\epsilon_r}$ entre l'indice de réfraction et la permittivité relative est vérifiée. L'application d'un champ externe produit un déplacement mutuel des ions constituant la molécule en un temps de l'ordre 10^{-13} à $10^{-12} s$, la relation de Maxwell n'est plus satisfaite.



I.6.2.2. Polarisation dipolaire ou d'orientation

Une molécule formée d'atomes différents possède un moment dipolaire indépendant qui est orienté aléatoirement en l'absence de champ extérieur, il en résulte une polarisation nulle à l'échelle macroscopique. Sous l'effet d'un champ, ces moments s'alignent, ce qui donne une polarisation par orientation :

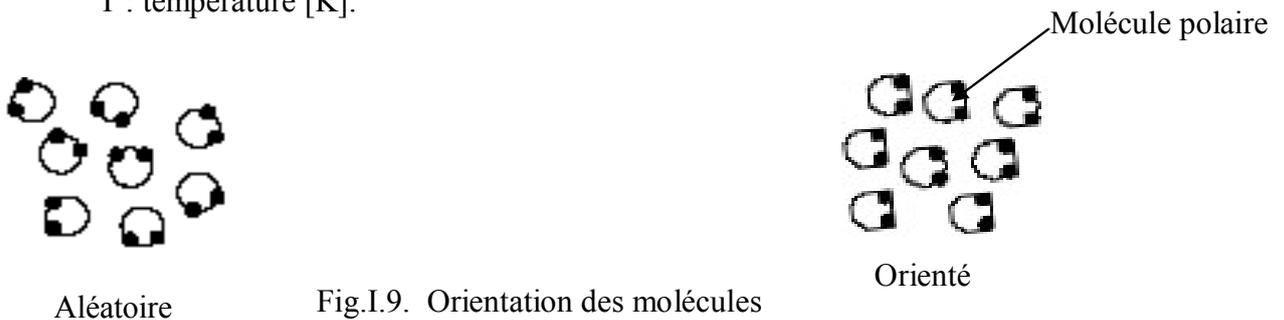
$$\vec{P}_O = N\alpha_o \vec{E}_L$$

Avec : $\alpha_o = \frac{P^2}{3kT}$

P : moment dipolaire,

k : constant de Boltzmann,

T : température [K].



I.6.2.3. Polarisation inter faciale

Les porteurs de charges existent dans un diélectrique, ils se déplacent sous l'effet d'un champ électrique pour s'accumuler autour des défauts (impuretés, lacunes). Ce phénomène est appelé polarisation inter faciale, il est caractérisé par un temps d'établissement très long. Cette polarisation est due aux différents défauts où il peut y avoir accumulation de charges des centres d'impuretés, d'interfaces de matériaux hétérogènes.



Fig.I.10. Polarisation inter faciale

I.6.2.4. Polarisation ionique

Elle est due au déplacement Δx des ions de signes opposés en sens contraire, sous l'action du champ local E_L . Cette polarisation n'existe que dans les cristaux ioniques et elle s'établit lentement. Elle est donnée par :

$$p_i = N\alpha_i E_L$$

Avec : $\alpha_i = \frac{ne^2}{\gamma}$ Facteur de polarisation ionique

n : nombre de charges électroniques portés par les ions,

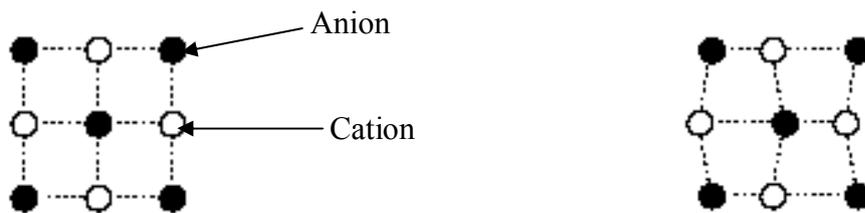


Fig.I.11. Polarisation ionique

I.7. Pertes diélectriques

Comme l'isolant n'est pas parfait, il contient des impuretés et de l'humidité donc il est le siège des pertes diélectriques dues au courant de polarisation et au courant de conduction. En considérant globalement les effets des phénomènes d'absorption et de conduction, on peut représenter l'isolant sous forme d'un circuit équivalent composé d'une résistance et d'une capacité montée en parallèle [3].

Dans ce cas :

$$I = V \sqrt{\frac{1}{R_p^2} + \omega^2 C_p^2}$$

Avec :

R_p : Résistance diélectrique,

C_p : Capacité d'un condensateur parfait,

ω : Pulsation du courant alternatif.

Le courant I n'est pas en quadrature avec la tension, l'écart se mesure à l'aide de $tg\delta$

$$tg\delta = \frac{1}{\omega R_p C_p}$$

La $tg\delta$ est appelée le facteur de dissipation diélectrique et δ est l'angle de pertes

Le facteur de puissance $\cos\varphi = \frac{tg\delta}{\sqrt{tg^2\delta + 1}}$

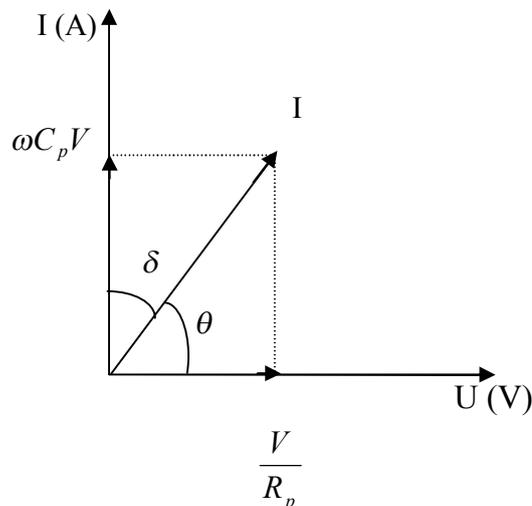


Figure. I.12. Schéma permettant de calcul de $tg\delta$

$$I_p = \frac{V}{R_p}$$

$$I_c = \omega C_p V$$

➤ Relaxation

En champ alternatif le mouvement des charges de moments dipolaires permanents se fait plus ou moins librement et leurs chocs induisent un retard de la polarisation par rapport au champ électrique qui peut-être caractérisé par un temps τ dit de relaxation du diélectrique. Quand la polarisation ne suit plus les variations du champ on dit qu'il y a coupure et on définit la fréquence de relaxation comme étant :

$$\omega_c = \frac{1}{\tau}$$

En tension alternative, la polarisation par orientation des dipôles est plus difficile, elle entraîne des pertes d'énergie active d'où

$$\vec{D} = \varepsilon \vec{E}$$

Où, ε est la permittivité complexe absolue du diélectrique, définie comme :

$\varepsilon = \varepsilon_0 \varepsilon_r$ et où ε_r est la permittivité complexe relative du diélectrique définie comme

$$\varepsilon_r = \varepsilon_r' - j\varepsilon_r''$$

ε_r' est la permittivité relative du diélectrique définissant la composante du courant passif I_c (composante des pertes réactives) ;

$$\varepsilon_r' = \frac{I_c}{J\omega CV}$$

Lorsqu'on néglige les pertes ; $\varepsilon_r''=0$ et $\varepsilon_r' = \varepsilon_r$

I.8. Conclusion

Le rôle essentiel des solides isolants est de servir de barrière au courant électrique. En pratique aucun isolant n'est parfait, c'est pourquoi il est nécessaire de définir certaines propriétés comme la résistance, la rigidité et la permittivité, ainsi que les différents types de polarisation et les mécanismes de claquage.

II.1. Introduction

Les polymères appelés communément « matières plastiques » sont des substances organiques ou inorganiques, liquides (verni, peinture) ou solides, à température ambiante. Ils se sont imposés dans tous les domaines de nos activités, des objets les plus banals jusqu'aux applications techniques sophistiquées, en passant par leur utilisation dans les produits d'hygiène ou alimentaires le plus souvent synthétiques, quelque fois naturels. Ils doivent cet essor à leur large gamme de caractéristiques, durs, mous ou élastiques, transparents ou opaques, isolants et quelques fois conducteurs, plus ou moins résistants aux conditions agressives de leur usage. Toujours légers c'est la nature particulière de leurs molécules en forme de chaînes, ainsi que la variété des modes d'assemblage qu'elles adoptent, qui est à l'origine de cette diversité [4].

II.2. Définition

Un polymère est un système formé par un ensemble de macromolécules c'est-à-dire d'entités moléculaires de grandes dimensions issues de l'assemblage covalent d'un grand nombre d'unités répétitives plus communément appelées unités (ou motifs) monomères. La science des polymères a donc été développée dans le but d'obtenir de nouveaux matériaux, avec des propriétés diélectriques, ainsi qu'une résistance à la température et à l'humidité améliorée [4].

II.3. Utilisation des polymères

Les polymères sont utilisés pour couvrir les fils conducteurs servant à construire des bobines de moteurs, transformateurs, électro-aimants, relais ...etc. Ainsi pour isoler les fils servant à la distribution de l'électricité dans les bâtiments. Parfois on combine ces isolants avec des matériaux tels que la fibre de verre pour créer des feuilles et des plaques isolantes possédant une grande dureté mécanique, une excellente résistance à la haute température et des propriétés électriques supérieures [5].

II.4. Classification des polymères

Cette classification peut se faire en se basant sur :

- L'origine du matériau,
- La nature chimique,
- La structure moléculaire,
- Le type de polymérisation.

II.4.1. Origine des matériaux

Il existe deux types de polymères ; les polymères naturels et les polymères synthétiques.

➤ Polymères naturels

Le bois, le cuire, la laine, le caoutchouc, la soie et le papier imprégné sont les plus utilisés pour des isolations électriques [6].

➤ Polymères synthétiques

Obtenus par synthèse chimique à partir d'éléments intermédiaires tels que la cellulose, le benzène, l'acétylène tiré à partir de produits naturels dont les principaux sont le pétrole et le bois [6].

II.4.2. La nature chimique

On distingue :

➤ Les Polymères minéraux

Ils sont constitués soit de chaînes renfermant un seul corps simple (graphite, soufre,...) soit de chaînes renfermant plusieurs hétéro atomes (silicates,...) [6].

➤ Les Polymères organiques

C'est la classe la plus riche. Les polymères organiques constituent la presque totalité des polymères utilisés couramment (les polyoléfinés, polyéthylènes,...).

➤ Les Polymères mixtes

Dotés d'une bonne résistance thermique (300°-350°), les plus représentants de cette classe sont surtout les silicones [6].

➤ Les polymères polaires

Les polymères polaires possèdent dans leurs molécules des atomes (généralement électronégatifs tels que F, Cl, O, N) qui fournissent des dipôles. Ils ont une permittivité élevée (3.5 à 10) et un indice de perte élevé (10^{-2} à 10).

➤ Les polymères apolaires

Les polymères apolaires sont généralement de très bons isolants avec un faible indice de pertes, de l'ordre de 10^{-4} à 10^{-3} et une permittivité quasi constante (2.5 à 3) dans un large domaine de températures et de fréquences. Ils ne contiennent pas des atomes électronégatifs, tels que le fluor.

II.4.2. Structure moléculaire des polymères

Suivant la structure du polymère on distingue :

a- Les homopolymères

Ce sont des polymères formés d'un seul type de monomère, les homopolymères peuvent présenter trois structures différentes [6].

➤ Linéaires

Les polymères sont constitués de longues chaînes où la cohésion est assurée par des liaisons covalentes. A chaud, ces chaînes peuvent glisser facilement les unes par rapport aux autres. Le polymère prend alors la forme d'un liquide plus ou moins visqueux au cours du refroidissement. L'agitation thermique décroît, les chaînes ne peuvent plus glisser facilement les unes par rapport aux autres

➤ Ramifiés

La chaîne comporte des ramifications plus ou moins importantes, constituées par la répétition soit de la même séquence que celle du monomère principale, soit d'autres séquences.

➤ Réticulés

Ce sont des réseaux à trois dimensions, ils représentent environ 30% des polymères industriels. La structure tridimensionnelle peut être obtenue à partir de polymères linéaires par des réactions de réticulation (pontage), telle la vulcanisation du caoutchouc.

b) Les copolymères

Les copolymères comprennent deux ou plusieurs monomères différents. Les structures d'un copolymère sont plus nombreuses et plus complexes que celles d'un homopolymère, car elles dépendent de la disposition régulière ou aléatoire des différents monomères le long de la chaîne [6].

➤ Copolymères statiques

Les monomères M et N, cités dans le tableau (II.1), sont répartis aléatoirement dans la chaîne. Un cas limite du copolymère statique est le copolymère alterné qui est également un matériau homogène.

➤ Copolymères séquences

Ce sont des molécules linéaires ou radiales, constituées d'une alternance de longues séquences homogènes.

➤ Copolymères greffés

Un copolymère greffé est constitué d'une chaîne principale (tronc), formée d'unités constitutives (M), portant des chaînes latérales de structures chimiques (N). Un cas particulier est celui des copolymères en peigne dont les greffons sont de même longueur.

➤ Copolymères étoiles

Constitués de modules et de branches, les copolymères étoiles à quatre branches sont parmi les plus faciles à réaliser

II.4.3. Polymérisation

La polymérisation est un processus de transformation d'un mélange de monomères en polymère. Elle désigne une réaction chimique, fonction de temps et de température [7].

➤ La polyaddition (Polymérisation par addition)

Se fait par assemblage des monomères sans formation d'un produit de réaction [7].

➤ Polycondensation

La polymérisation par étapes fait intervenir des réactions classiques de la chimie organique avec élimination d'un résidu simple [7].

II.5. Procédés de polymérisation

Soit le type de polymérisation, polyaddition ou polycondensation, la synthèse industrielle des polymères est effectuée selon quatre méthodes principales [7].

➤ **En masse**

La polymérisation s'effectue en présence d'un catalyseur sous une pression et température élevées, ce qui nécessite un appareillage complexe. Le polymère présente une pureté élevée [7].

➤ **En solution**

Dans ce cas, le monomère et le catalyseur sont dissous dans un solvant, ce qui permet d'opérer des températures, plus basses [7].

Par rapport à la polymérisation en masse, une opération supplémentaire est nécessaire, pour la séparation du polymère solvant. Les impuretés du solvant sont susceptibles de polluer le polymère [7].

➤ **En émulsion**

Les agents émulsifs sont des catalyseurs solubles dans l'eau (savon, acides gras sulfonés.....), leur utilisation conduit à une émulsion de particules très petites [7].

➤ **En suspension**

Très grande mais l'élimination des agents émulsifs est difficile. On disperse un monomère insoluble dans l'eau en gouttelettes de $10\ \mu\text{m}$ à 5mm par agitation rapide dans une phase aqueuse, qui est ensuite additionnée à un agent stabilisateur ou introduit dans le monomère. Le monomère en suspension est ensuite polymérisé sous une température variant de 80°C à 110°C .

A la fin de la réaction, le polymère se trouve sous forme de perles si ce dernier et le monomère sont soluble l'un dans l'autre, ou sous forme de graminées s'ils ne le sont pas [7].

II.5. Différent types de polymères

Tableau II.1. Classification des polymères selon la nature de chaînes

La nature des chaînes	Les homo-polymères	linéaires	-M-M-M-M-M-M-M-M-M-
		Ramifiés	<pre> M-M-M-M-M-M / \ M-M M-M \ / M-M \ M-M </pre>
		Réticulés	<pre> M-M-M-M-M-M-M-M-M-M M M / \ M—M—M—M—M—M—M—M M M-M </pre>
	Les Copolymères	Statique	-M-N-M-N-N-N-M-
		Séquencés	-MMM M-NNN N-MMMM
		Greffés	<pre> -M-M-M-M-M-M-M-M-M- N N N N N N N N N N </pre>

II.6. Les familles des polymères

Il existe une variété importante de polymères utilisés dans l'industrie ; comme celle des peintures, des caoutchoucs, des plastiques, des fibres de synthèse, du papier et leur nombre s'accroît chaque année [8].

II.6.1. Les thermoplastiques

Le polyéthylène est le plus courant des thermoplastiques, ces derniers sont souvent décrits comme des polymères linéaires. Les molécules des polymères linéaires ont des masses très variables et elles se rangent dans une grande variété de configuration. Parmi les thermoplastiques on a (Polyéthylène (PE), Polypropylène (PP), Polystyrène (PS), ...) [9].

II.6.2. Les élastomères

Les élastomères, ou caoutchoucs sont des polymères quasiment linéaires avec des ponts occasionnels dans lesquels les liaisons secondaires ont déjà fondu à température ambiante (Poly -isoprène, Polybutadiène, Polychloroprène)[9].

II.6.3. Les thermodurcissables

Les polymères thermodurcissables sont fabriqués en mélangeant deux constituants qui réagissent et durcissent tantôt à chaud, tantôt à température ambiante. Ils sont utilisés généralement pour l'appareillage électrique. Parmi ces polymères on a le poly époxyde, et le polyester (UP) [9].

II.7. Propriétés des polymères

II.7.1. Propriétés mécaniques

La rigidité mécanique des polymères résulte des interactions secondaires entre les macromolécules de la chaîne. Le module d'élasticité est relié à l'énergie de cohésion des matériaux. Si on considère cette dernière comme étant l'énergie qui existe dans un ensemble d'ions et d'atomes de cette substance, les propriétés mécaniques des polymères dépendent de la masse molaire et de la cristallinité. Parmi elles on peut citer :

- La résistance à la traction qui varie entre 9 et 23 Mpa,
- L'allongement à la rupture variant de 150 mm à 1000mm,
- Le module d'élasticité en traction variant de 200 Mpa à 500Mpa.

II.7.2. Propriétés physiques

Les propriétés physiques des matériaux forment une moyenne de celles de leurs composants. Quant il s'agit de la masse volumique ou de la reprise d'humidité, ces matériaux sont souvent inhomogènes et il n'y a pas de règle d'addition pour prévoir les propriétés à partir de celles des composants.

II.7.3. Propriétés optiques

La propriété optique à un intérêt pour la lumière visible et la transparence, c'est-à-dire l'absence de diffusion et d'absorption dans le visible. L'indice de réfraction dépend de la nature des atomes et des liaisons qui les relient. La réfraction moléculaire R se calcule par la formule suivante :

$$R = \frac{n^2 - 1}{n^2 + 2} \frac{M}{D}$$

n : indice de réfraction.

M : masse molaire (de l'ensemble).

D : masse volumique.

II.7.4. Propriétés thermiques

Le coefficient de dilatation linéique est fonction du type de liaison qui assure la cohésion de l'ensemble des atomes ou des molécules des matériaux. Il est d'autant plus élevé que l'intensité des liaisons est faible. Les polymères plastiques semblent intéressants pour être utilisés comme isolants thermiques à cause de leur conductibilité.

II.7.5. Propriétés électriques

Les matières plastiques ont une résistivité très élevée (excellents isolants), elle varie avec la prise de l'humidité.

Les variations du champ électrique alternatif provoquent des mouvements moléculaires. Une consommation d'énergie transformée en chaleur se traduit par une perte électrique qui caractérise l'aptitude du matériau à supporter des tensions élevées sans perforation.

II.7.6. Propriétés chimiques

Le comportement chimique des polymères dépend de leur accessibilité aux agents extérieurs. Sous la chaleur, les thermoplastiques se fondent, les thermodurcissables peuvent se décomposer sans se fondre mais en émettant des vapeurs ou des liquides inflammables. Cette

nature chimique des polymères et sa réticulation prédominant pour la résistance aux agressions chimiques à la température et au gonflement par le solvant.

Conclusion

L'étude bibliographique entreprise dans ce chapitre nous a permis de prendre connaissance de l'importance de l'utilisation des polymères comme matériaux diélectriques, dans les équipements électriques. Ils présentent de nombreux avantages : une rigidité électrique élevée, de faibles pertes diélectriques, faible poids, une hydrophobicité élevée et des propriétés mécanique, électrique, thermique, bonnes.

III. 1. Introduction

L'application d'un champ électrique suffisamment élevé à un diélectrique donne la possibilité d'avoir, par ionisation partielle du milieu, un courant dont la valeur dépend de celle du champ appliqué. Dans ce chapitre nous étudions les différents types de décharges électriques (partielle, arborescente), ainsi que les décharges de surface.

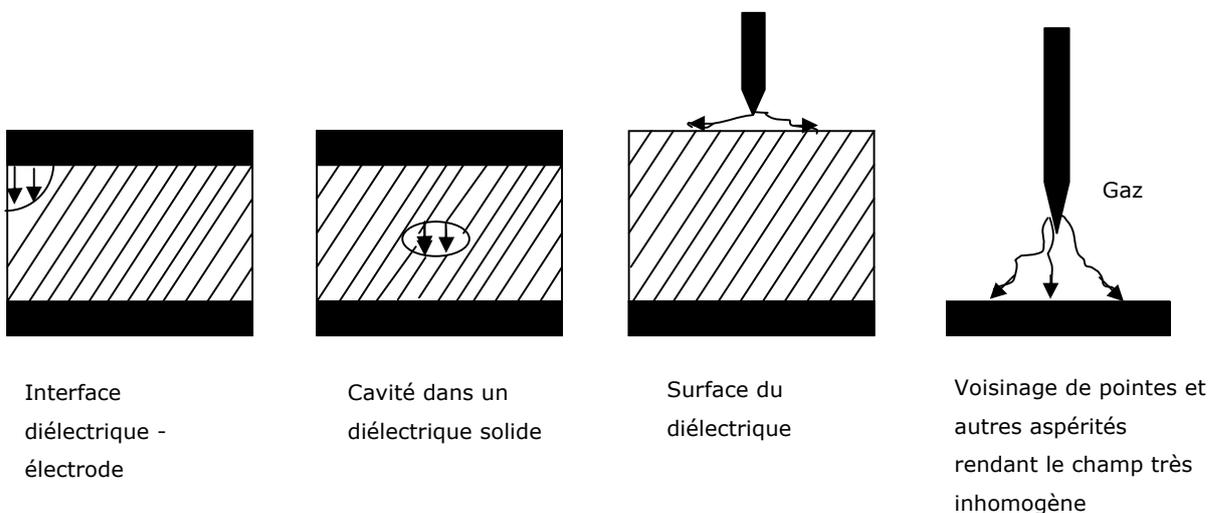
III.2. Les différentes décharges électriques

III.2. 1. Définition d'une décharge électrique

On désigne par l'expression décharge électrique, ou simplement décharge, le passage de courant dans un isolant. Les décharges électriques peuvent prendre plusieurs formes.

III.2.2. Les décharges partielles

La décharge partielle est l'origine des dégradations subies par les matériaux diélectriques dans une isolation soumise à une haute tension. Elle se produit de façons localisées à l'intérieur ou à la surface d'isolants composites, au voisinage des électrodes, ou le champ est très inhomogène. Le courant véhiculé par les décharges partielles ne présente généralement qu'une petite fraction du courant de déplacement.



FigIII.1 : Quelques exemples de lieux où peuvent se produire des décharges partielles.

On peut distinguer plusieurs types de décharges partielles auxquelles sont soumis effectivement les matériaux isolants dans les isolations en service. [12]

III.2.2.1. Les décharges internes

Les décharges partielles internes se produisent dans les inclusions gazeuses emprisonnées dans la masse d'un isolant solide. Lorsque les isolants sont soumis à une certaine tension alternative à fréquence industrielle, on constate que le champ électrique est

plus élevé dans les vacuoles gazeuses que dans l'isolant, alors il peut y avoir des décharges internes dans les vacuoles de gaz qui peuvent provoquer le claquage du matériau. Parmi les facteurs contribuant à l'apparition des décharges internes on a :

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

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

Les décharges internes s'amorcent à la tension alternative V_i telle que :

$$V_i = E_C \left[d + \frac{(d_0 - d)\epsilon_{rg}}{\epsilon_{rs}} \right]$$

Avec :

ϵ_{rg} : Permittivité relative du gaz,

ϵ_{rs} : Permittivité relative du solide.

E_C est le champ correspondant à la tension de claquage du gaz de la cavité d'épaisseur d , supposée faible devant son diamètre et l'épaisseur $(d_0 - d)$ de l'isolant solide de permittivité relative ϵ_r . [12]

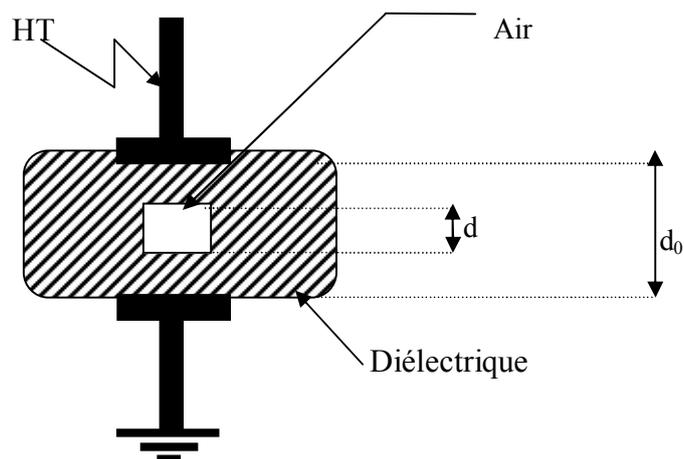


Fig. III.2 : Dispositif d'étude des décharges partielles.

III.2.2.2. La décharge couronne

L'effet couronne est le phénomène d'ionisation du gaz isolant autour de l'électrode haute tension. Cet effet apparaît lorsque la valeur maximale du champ électrique atteint celle

du champ d'ionisation du gaz (air). Il se manifeste sur toute la gamme de fréquence de la tension. Dans la décharge couronne, comme toutes les décharges électriques ; les espèces créées sont les ions, les électrons, les photons et l'espèce excitée.

La tension d'apparition d'effet couronne appelé V_0 augmente avec le rayon de courbure de la pointe. Pour des grandes valeurs de d (distance inter électrode), l'augmentation de V_0 est très significative. [13]

III.2.2.3. Les décharges superficielles

La décharge électrique de surface, désigne une décharge qui se produit en contact avec la surface d'un diélectrique solide placée dans un gaz ou un liquide isolant. De bonnes illustrations sont obtenues par la méthode de Lichtenberg qui consiste à mettre un film photosensible à travers ou le long de la décharge. [14]

III.2.2.4. Les décharges glissantes

Les décharges glissantes font partie des décharges superficielles qui peuvent avoir lieu dans l'air près de la surface d'un diélectrique solide [15].

III.2.3. Les décharges arborescentes

Les isolants solides utilisés en haute tension, ne sont pas parfaits, ils contiennent toujours des impuretés et des défauts microscopiques, ces défauts sont à l'origine de la distorsion et la concentration locale du champ électrique qui conduit à la formation des canaux appelées « arborescences » [15].

L'arborescence est un phénomène de dégradation de l'isolant haute tension qui se manifeste par des formations rappelant une forme d'arbre.

Ces arborescences sont en relation avec :

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

Les claquages par arborescences sont assez peu nombreux, mais le phénomène est toujours considéré comme dangereux. On distingue deux types d'arborescences :

- Les arborescences électrochimiques,
- Les arborescences électriques.

III.2.3.1. Les arborescences électrochimiques

Les arborescences croissent au cours du temps provoquant un claquage dès que leur taille est suffisante. La présence d'humidité dans certains polymères semble favoriser l'apparition de ce type d'arborescences. La présence simultanée de l'eau et d'un champ

électrique intense provoque l'apparition d'arborescences d'eau qui a tendance à suivre les lignes du champ électrique.

III.2.3.2. Les arborescences électriques

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

III.3. Les décharges de surface

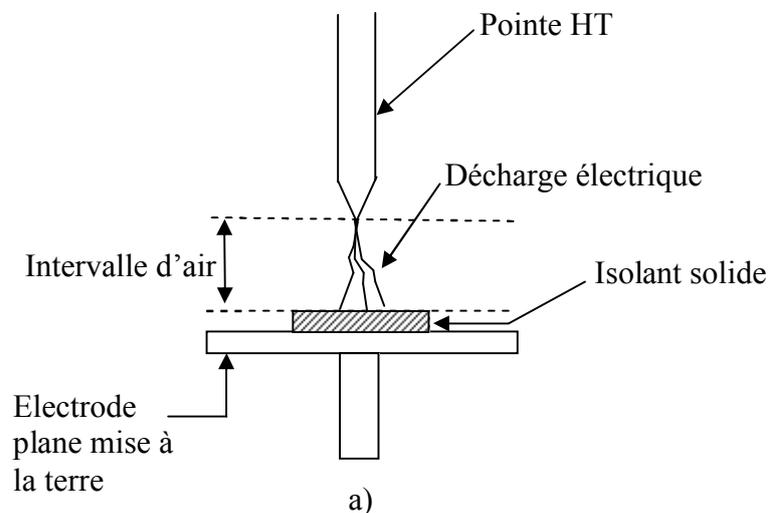
Dans notre étude nous nous sommes intéressées aux décharges surfaciques. Lors de la fabrication ou de l'utilisation d'un matériau, les surfaces jouent très souvent un rôle prépondérant à cause de leurs propriétés physico-chimiques. Il est donc d'un intérêt primordial de les caractériser pour comprendre la nature des interactions mises en jeu afin de contrôler et d'améliorer les performances des matériaux.

III.3.1. Processus de décharge de surface dans l'isolant solide

Selon la disposition et la forme des électrodes, la décharge superficielle dépend de la polarité et le niveau de la tension appliquée, elle se propage point par point à la surface d'un diélectrique où la tension augmente.

On peut distinguer deux catégories de décharges se produisant à la surface d'un solide isolant : la décharge à barrière diélectrique « DBD », et la décharge glissante.

Les décharges à barrière diélectrique (fig.III.a et b) où les isolants gazeux et solides sont généralement en série entre les deux électrodes, avant de se propager sur la surface du solide, se développent d'abord dans le volume du gaz [14].



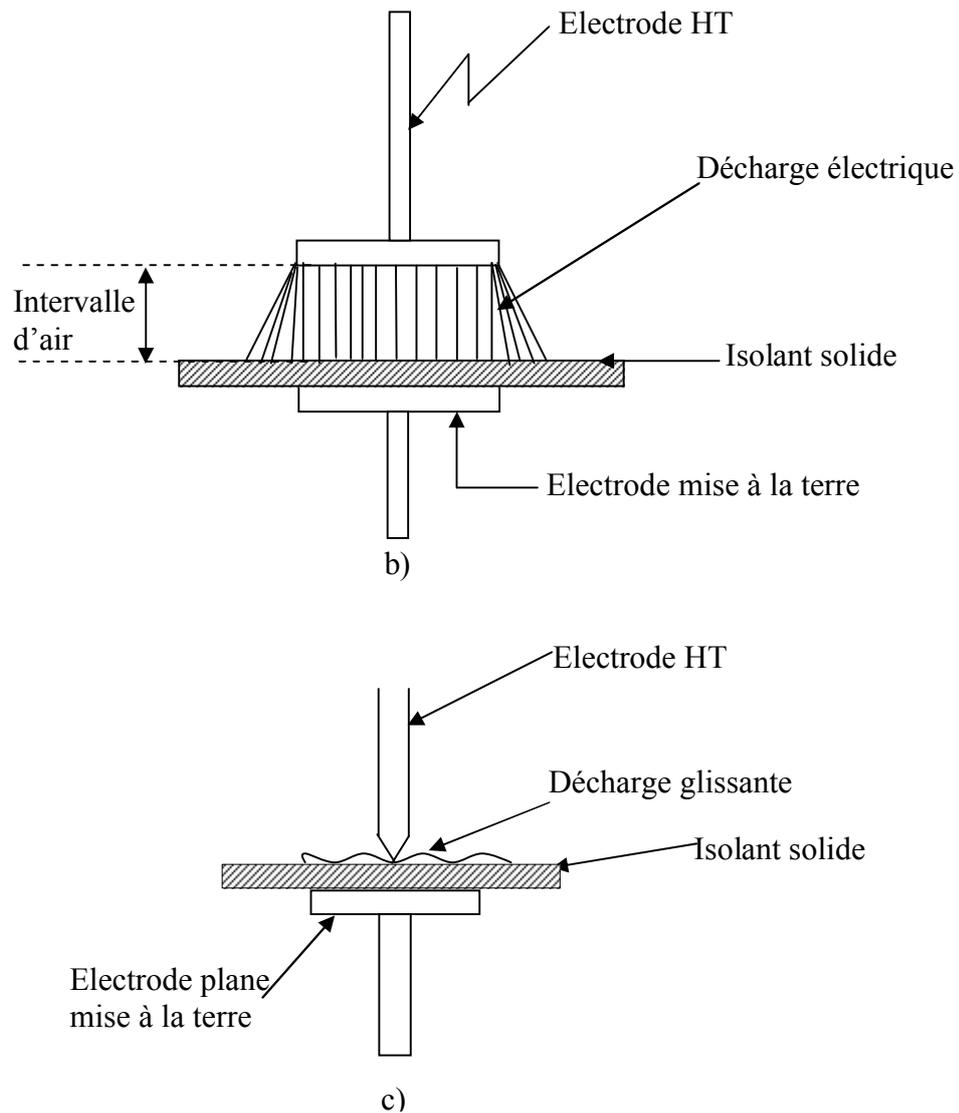


Fig. III.3 : Décharge de surface ;
 a) DBD (pointe plan);
 b) DBD (plan - plan);
 c) Décharge glissante.

L'interaction de la décharge avec le solide se produit aussi bien pour la « DBD » que pour la décharge glissante. Par conséquent, les deux types des décharges ont un effet sur les propriétés physico-chimiques du solide.

Les décharges à la surface de la barrière isolante font l'objet d'étude dans le cas de leur application dans l'industrie. Elles sont utilisées particulièrement dans le domaine de traitement de surface et de la dépollution. [14]

III.3.2. Similarité de la décharge glissante avec la décharge de foudre

En étudiant les décharges glissantes, on remarque que leur propagation est similaire à celle de la foudre, mais ce n'est pas en ce seul aspect visuel que les similitudes entre les deux

phénomènes existent. En effet, en plus de cette ressemblance à caractère optique, les deux décharges ont la capacité de se propager sur de longues distances sous l'effet d'un champ électrique faible par rapport au champ disruptif. La comparaison ne s'arrête pas là, puisque l'ordre de grandeurs des vitesses de propagation est le même ($V = 10^6$ m/s) ainsi que le processus de propagation par bonds qui est identique dans les deux décharges [14].

III.3.3. Méthode de Lichtenberg

Cette méthode consiste en l'utilisation d'une poudre polarisable, composée d'un mélange d'oxyde de plomb rouge (PB_3O_4) et de soufre jaune pâle. Ces poudres chargées sont étalées sur la surface isolante. La tension de choc est appliquée aux électrodes qui sont en contact avec la surface. L'électrode HT est ajustée de telle sorte que la pointe touche la plaque d'isolation au centre. Les dimensions des particules de la poudre sont de 5 à $10 \mu m$.

Les particules de la poudre rouge (chargée positivement) s'attachent aux charges négatives et les jaunes chargés négativement s'attachent aux charges positives.

Cette méthode permet d'enregistrer l'étendue du développement du streamers sur la surface isolante ainsi que la distribution des particules chargées.

L'intérêt de l'imagerie électrique réside dans la facilité d'emploi, elle peut permettre de cerner très rapidement un aspect particulier du phénomène ou d'explorer un grand nombre de possibilités en un minimum de temps. Elle autorise également l'analyse de détails inaccessibles à la photographie traditionnelle, ainsi que des mesures fines de certaines dimensions caractéristiques de l'étincelle [15].

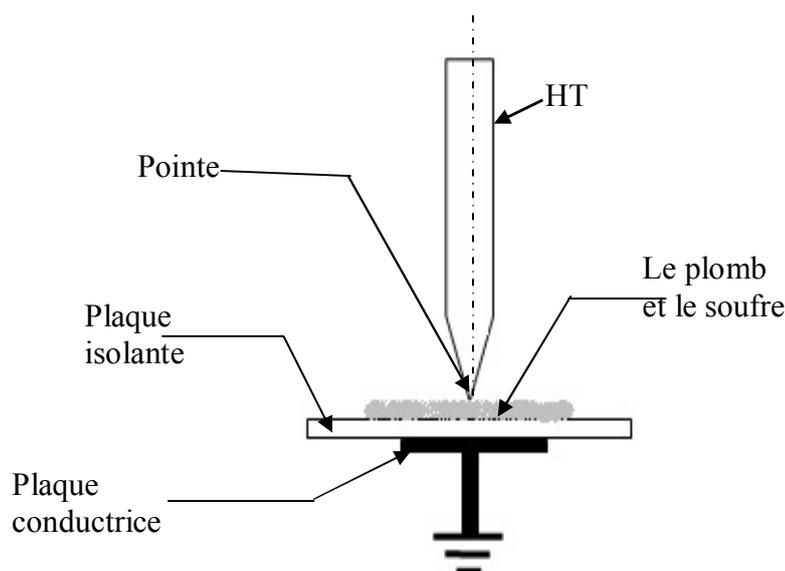


Fig.III.4 : Le Klydonographe

III.3.4. Travaux de Mooroka

Mooroka et ses coéquipiers ont étudié le phénomène de la décharge superficielle en utilisant les méthodes des figures de “Lichtenberg” ou (technique dust figure) dans le but d’étudier l’effet de la tension appliquée et de la pression sur le développement de la décharge superficielle.

Le procédé expérimental utilisé, consiste en l’utilisation de la technique (dust figure) avec un générateur à impulsions carrées sous les conditions suivantes : Une tension appliquée de 5 à 20 kV, une pression du gaz de 50,100, 150,.....,760 mmHg. De plus la plaque isolante est placée sur l’électrode plane de telle sorte que l’électrode pointe touche cette dernière au centre.

Cette méthode a l’avantage de permettre la mesure de la vitesse de développement des décharges négatives sur la plaque isolante. [15]

III.3.5. Tension d’apparition de décharges glissantes

Les travaux les plus remarquables sur les décharges glissantes ont été menés par M.Toepler Le résultat principal de ces recherches est sa formule donnant la tension d’apparition des décharges glissantes, dont l’expression générale est la suivante :

$$U_{dgl} = K C^{-0.3} \text{ [kVF/cm}^2 \text{]}$$

Avec K : Une constante dépendante de la polarité de l’électrode,
 C : La capacité superficielle spécifique du système étudié.

On peut dire que la tension d’apparition des décharges glissantes dépend de la capacité superficielle spécifique. Mais les formules contenant ce paramètre (C) ne peuvent pas être généralisées pour être employée dans la technique de la haute tension. [13]

III.3.6. Propagation des décharges glissantes

La propagation et le développement des décharges superficielles diffèrent selon la polarité de l’électrode active et le type de tension appliquée.

Lorsque la tension appliquée au système augmente il y a d’abord apparition d’effet couronne. Ceci se produit lorsque l’intensité du champ aux alentours de cette électrode dépasse la rigidité diélectrique de l’air. Les porteurs de charges par effet couronne sont concentrés à la surface de l’isolant solide. Pour des tensions plus importantes, des canaux de plasma ou filets lumineux apparaissent. Ces derniers possèdent à leurs extrémités une concentration de charge de polarité donnée. Des électrons se trouvant à la proximité de celui-ci engendrent des avalanches et ainsi les canaux de plasma évoluent et glissent sur la surface

du diélectrique vers la contre électrode. C'est pour cette raison qu'on les appelle « décharges glissantes ».

Si l'on continue à augmenter la tension appliquée, la décharge glissante atteint la contre électrode et le contournement se produit.

En fonction de la polarité de l'électrode active, il existe deux types de décharges superficielles :

- En pointe positive, on obtient des « décharges superficielles positives »,
- En pointe négative, on obtient des « décharges superficielles négatives ».

Si la tension appliquée sur l'électrode active est alternative la décharge de contournement qu'on observe est la décharge superficielle positive. [13]

a. pointe positive

Lors de l'apparition d'une première avalanche au voisinage de la pointe, les électrons vont vers l'anode où ils sont neutralisés et les ions positifs forment une charge d'espace devant la pointe. Cette charge d'espace constitue un canal ionisé dont l'aspect visuel est celui d'une chevelure issue de l'électrode positive ; on a un streamer.

Le champ électrique est renforcé à la pointe de la charge d'espace qui constitue un prolongement fictif de l'électrode positive. D'autres avalanches secondaires sont alors créées devant la charge d'espace. Elles constituent des streamers qui vont s'allonger. Au point de jonction de ces streamers le courant électronique peut devenir très intense pour thermaliser le canal ionisé. Il se forme en ce point une zone à très forte conductivité qui se développe pour former un canal appelé « leader ». Ce canal transforme le potentiel de l'électrode jusqu'à sa pointe, ce qui permet la formation de nouveaux streamers en avant de cette pointe.

Le leader se développe alors dans l'espace à une vitesse quasi uniforme d'environ $2 \text{ cm}/\mu \text{ s}$.

Lorsque les streamers atteignent l'électrode opposée, commence le processus appelé « saut final ». A cet instant le leader se propage très rapidement jusqu'à la cathode et un pont de forte conductivité est ainsi établi dans l'espace inter électrodes.

Un courant intense peut circuler, le leader se transforme en un arc très lumineux qui constitue un véritable court-circuit de l'intervalle d'air [16].

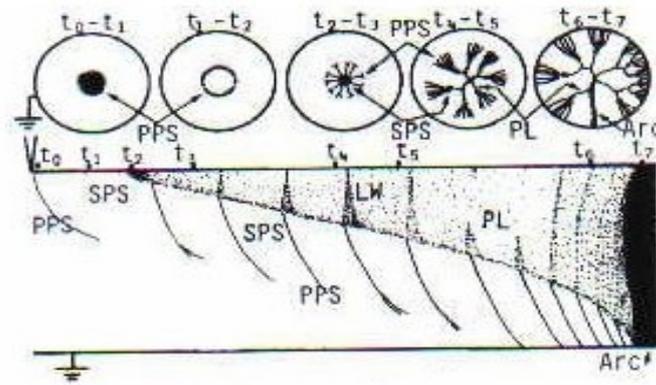


Fig.III.5 : Figure développée de la décharge superficielle positive

b. pointe négative

Dans ce cas l’avalanche prend naissance sur la pointe, l’électron étant une charge négative. Elle va être repoussé par la pointe elle même chargée négativement.

L’électron libre se déplace de la région du champ électrique fort vers la région du champ électrique faible en causant l’ionisation par collision. Dans ce cas les ions positifs produits par collision ne peuvent pas se déplacer. De plus ils exercent une force d’attraction électrique sur les électrons libres, ce qui engendre la diminution de la vitesse de déplacements des électrons.

Ainsi les avalanches secondaires vont naître si la tension est augmentée mais de plus en plus difficilement, car plus en s’élève de la pointe plus le champ diminue.

En augmentant la tension le champ se renforce, ainsi à partir d’une certaine distance, un canal de plasma se crée constituant une zone de forte conductivité. D’autres avalanches forment un pont pour le canal jusqu’à ce que celui-ci atteigne l’anode, on aura alors un arc électrique [16].

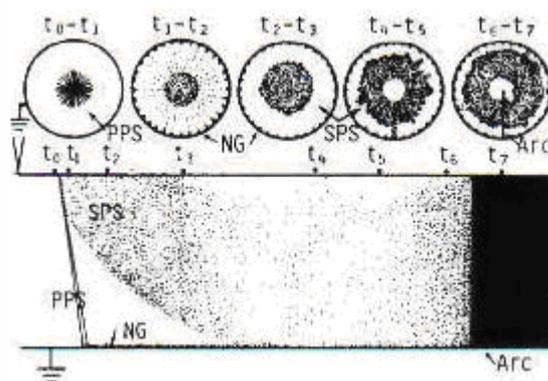


Fig.III.6 : Figure développée de la décharge superficielle négative

III.4. Influence de la distance inter électrode sur $V_{C50\%}$ et $V_{50\%}$

Le phénomène de décharge surfacique a été étudié sous l'impulsion positive de la tension à la pression atmosphérique. L'expérience consiste à mesurer la tension $V_{C50\%}$ (tension donnant 50% d'effet courant) et $V_{50\%}$ (tension donnant 50% de claquage) à la surface de l'échantillon. Le phénomène de décharge sera ensuite observé en fonction des images (sous l'impulsion positive à l'air libre). Pour enfin comparer les résultats à ceux observé pour un système pointe- plan, en faisant varier la distance « d ».

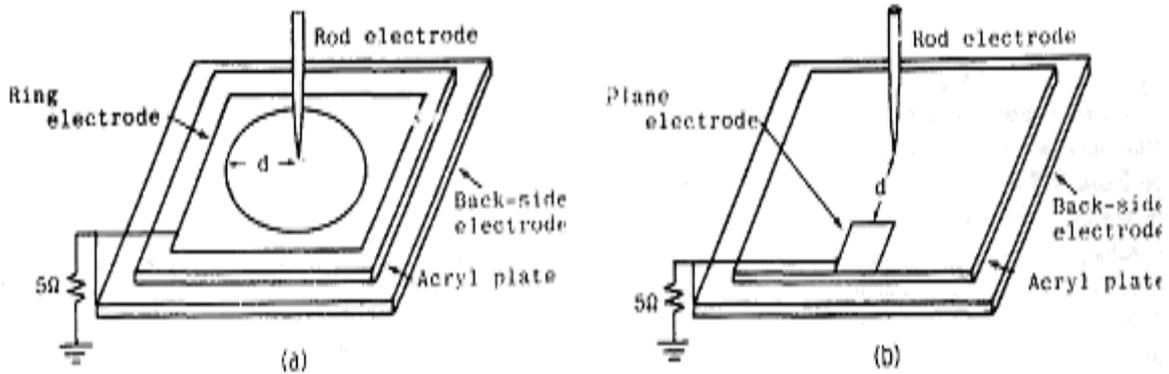


Fig.III.7 : Description du système d'électrode [17]

Des expériences ont été faites, en utilisant des plaques acryliques de différentes épaisseurs (1, 1.5, 2, 3, 4, et 5mm).

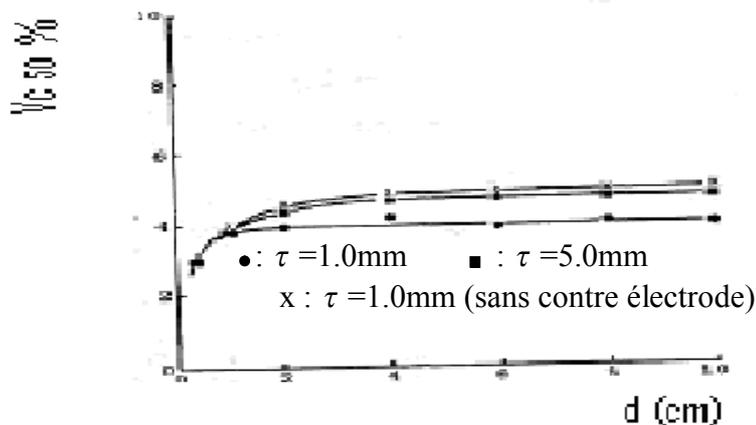


Fig. III.8.a : Variation de la tension d'apparition d'effet couronne en fonction de la distance inter électrode.

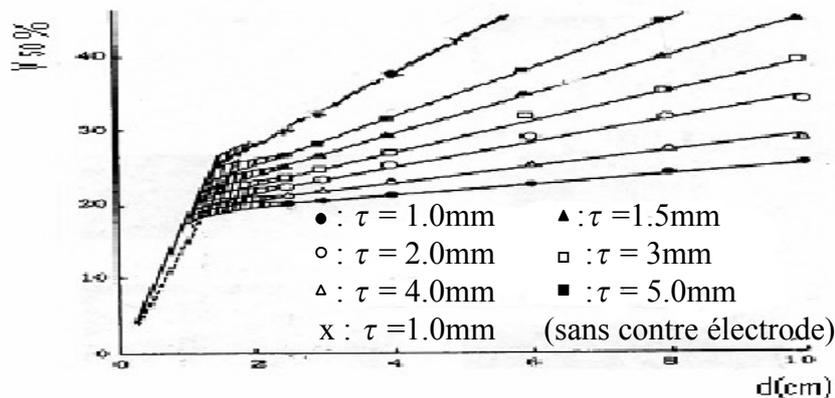


Fig.III.8.b : Variation de la tension de décharge en fonction de la distance inter électrode.

On remarque que pour une distance allant de 0 à 1cm, les trois courbes sont confondues, ce qui implique que $V_{C50\%}$ ne dépend pas de l'épaisseur de l'échantillon. Puis on remarque la croissance de chaque courbe vers une valeur constante.

Pour V_{50} (tension donnant 50% de claquage), on remarque le même comportement dans la plage [0-1cm], puis l'augmentation de la distance implique celle de la tension.

On peut conclure de cette expérience, que l'effet couronne apparaît avec une petite tension puis sa tension reste constante. Et pour avoir la décharge électrique il faut une tension assez importante.

III.5. Conclusion

Nous avons présenté dans ce chapitre une brève revue sur les différents types de décharges électriques, en particulier les décharges de surface et leurs développements, malgré que les recherches consacrées à l'étude de ces derniers restent peu nombreuses. Tous cela rend très difficile l'étude théorique de la plupart des phénomènes superficiels qui sont donc encore mal connus.

IV.1. Introduction

L'action combinée de tous les facteurs et l'influence de toutes les contraintes (électriques, mécaniques et thermiques) et celles du milieu ambiant se traduisent par un vieillissement de l'isolant selon certaines conditions relatives au champ électrique et à la surface du matériau [18].

IV.2. Définition

Le vieillissement est un abaissement irréversible des caractéristiques d'un système isolant, par l'application d'un champ inférieur au champ disruptif qui se termine généralement par un claquage dans le temps [18].

IV.3. Les différentes contraintes de dégradation superficielle

IV.3.1. Contraintes thermiques

Pour certains matériels (câbles isolés, transformateurs, moteurs), les contraintes thermiques sont des composantes qui conditionnent la conception. Les contraintes thermiques en fonctionnement normal sont dues :

- à l'échauffement des conducteurs par effet joule et par courant de Foucault (câbles isolés) ;
- aux pertes magnétiques (transformateurs) ;
- aux pertes électriques par conduction électrique.

Les matériaux qui constituent ces matériels doivent supporter les températures de fonctionnement et assurer l'isolation du système. La température influe sur leurs caractéristiques en faisant évoluer leurs propriétés.

Ainsi, on peut constater, selon les matériaux en présence :

- des pertes de masse,
- une variation dimensionnelle,
- une diminution des caractéristiques mécaniques,
- une augmentation des pertes diélectriques et une diminution de la résistivité électrique.

Le vieillissement thermique en présence d'oxygène accélère en général les processus de dégradation. On est en face, dans ce cas d'un phénomène de dégradation oxydante qu'il convient de connaître au préalable. Pour limiter ce phénomène, il est d'usage d'utiliser des antioxydants tels que des noirs de carbone, des composés organiques aromatiques et d'autres additifs appropriés [19].

En résumé, à la conception du système d'isolation, la prise en compte de la contrainte thermique a pour objectif de définir les matériaux :

-qui doivent supporter les températures de fonctionnement et les températures limites admissibles au cours du temps

-qui se dégradent le moins possible au cours du temps.

IV.3.2. Contraintes climatiques

Le vieillissement climatique « weathering » résulte de l'exposition directe des matériaux au rayonnement solaire, aux intempéries et à diverses pollutions (marine, industriels). Ce vieillissement climatique peut dégrader les caractéristiques électriques de la surface d'un isolant et provoque la formation de cheminement. [19].

IV.3.2.1. Rayonnement ultraviolet

Les photons de cette zone spectrale ont des énergies qui correspondent à celles de certaines liaisons chimiques et peuvent provoquer les réactions suivantes : réaction d'ionisation et réaction d'excitation, mais aussi formation de radicaux libres. Dans le cas de certaines liaisons chimiques de fortes énergies (-C=C-, -C=N-), des réarrangements chimiques peuvent avoir lieu et se traduire par une coloration. L'énergie d'un rayonnement de longueur d'onde donnée peut être calculée selon la formule de Planck.

$$E = h\nu = h \frac{c}{\lambda}$$

E : énergie,

ν : fréquence,

c : vitesse de la lumière,

λ : longueur d'onde,

h : constante de Planck.

IV.3.2.2. Rayonnement visible et infrarouge

Ces rayonnements ont principalement un effet thermique (plus important pour l'infrarouge) et provoquent une accélération de la cinétique des réactions de dégradation : oxydation, scission de chaîne, hydrolyse.

IV.3.3. Contraintes mécaniques

Dans tous les matériels électriques, les isolants solides ont à transmettre les efforts qui s'exercent entre les conducteurs et le support. On en déduit que les isolants doivent également supporter les efforts mécaniques. L'origine des contraintes mécaniques en fonctionnement est due :

- aux forces électromécaniques (jeux de barres, température, et dilatations cycliques....),
- aux force dues aux mouvements (machines tournantes, vibrations),
- aux forces de charge (isolateurs de ligne),
- aux efforts exceptionnels : courts circuits, régimes transitoires, surcharges...) [19].

IV.3.4. Contraintes électriques

Les isolants des systèmes électriques sont dimensionnés de telle façon qu'ils supportent des champs électriques plus ou moins élevés. Les modes de défaillance des isolants en service dépendent du système considéré. Divers types de dégradation peuvent apparaître suivant les conditions d'utilisation et l'orientation relative du champ électrique par rapport à la surface des isolants [19].

On peut citer :

➤ Les phénomènes d'arborescences électriques dus à des décharges électriques internes qui détruisent localement le matériau en formant des canaux très fins .Ces derniers évoluent et peuvent finalement provoquer le claquage .La présence d'inclusions conductrices et de protubérances d'écran dans les câbles sont des exemples de formation d'arborescences électriques ;

➤ Les phénomènes d'arborescences d'eau ou d'arborescences électrochimiques dus à l'existence simultanée d'eau, de vacuoles, d'inclusions, de protubérances en présence de champs électriques, peut se transformer en arborescences électriques et conduire au claquage. Ces phénomènes évoluent très lentement par rapport aux phénomènes d'arborescences électriques ;

➤ Les décharges partielles (par exemple la présence de vacuoles) qui dégradent l'isolant et peuvent conduire au claquage par arborescence électrique. Dans les huiles minérales, l'apparition de décharges partielles entraîne la formation de bulles gazeuses pouvant conduire au claquage.

➤ Les phénomènes dits de cheminement apparaissent en surface des matériaux sous faibles contraintes lorsque la tension est élevée, un arc s'établit en provoquant une carbonisation de la surface de l'isolant. La dégradation de l'isolant est contrôlée par les

conditions ambiantes en particulier le degré d'humidité et l'existence de décharges électriques.

➤ Les charges d'espace sont à l'origine des mécanismes précurseurs des phénomènes d'arborescences.

La dégradation de la surface d'un isolant solide dépend de la fréquence et de l'amplitude de la tension, des conditions ambiantes et des éventuelles contraintes mécaniques auxquelles l'isolation est soumise. Le vieillissement électrique peut faire intervenir des phénomènes purement physiques (érosion, migration, plastifiant) ou phénomènes chimiques (oxydation, réticulation).

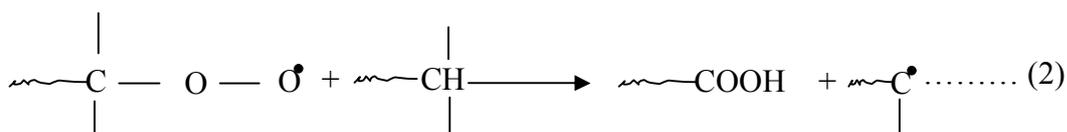
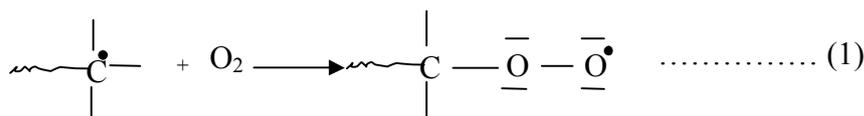
IV.4. Les différents processus de dégradation superficielle

IV.4.1. Les processus chimiques

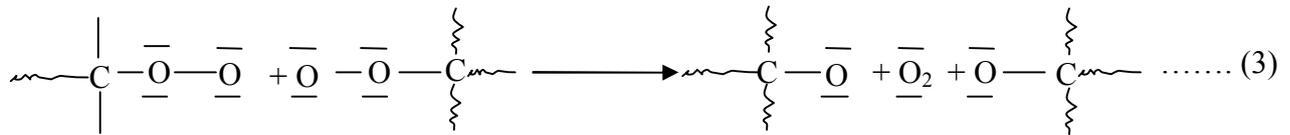
Les décharges partielles dans l'air atmosphérique ionisent l'air et produisent des espèces chimiques (l'ozone, électrons énergétique, ions, photons). L'interaction de ces espèces avec les molécules de la surface du solide isolant (C-H, C-O, C-C.....), provoque les processus suivants : Oxydation, hydrolyse coupeur de chaîne statique, dépolymérisation et réticulation [20].

IV.4.1.1. Oxydation

L'oxydation résulte de la fixation de l'oxygène par des radicaux qui proviennent d'une rupture des liaisons de la chaîne. La facilité avec laquelle un polymère s'oxyde dépend de la présence de liaisons de faible intensité. L'oxydation de la surface du polymère par attachement de l'oxygène activé dans la décharge avec des atomes de carbone pour former des groupements carbonyles C=O. La fixation d'atome d'oxygène à la surface du solide isolant rend celle-ci hydrophile. Des molécules d'eau s'attachent alors à la surface du matériau solide, d'où l'apparition des groupements hydroxyles OH [20].



Ces réactions sont situées pratiquement toujours dans les zones amorphes. Une autre réaction, mais très lente peut avoir lieu



IV.4.1.2. Hydrolyse

Sous l’influence de humidité (≥95%) et de la température (au moins 100°C), certains polymères (polyesters, polyuréthane, ...etc.) peuvent se dégrader. Ce vieillissement climatique peut dégrader les caractéristiques électriques à la surface d’un isolant et provoquer la formation de cheminements [20].

La vapeur d’eau est toujours présente et joue des rôles divers dans la dégradation des matériaux. Les réactions directes avec des matériaux organiques dites réaction d’hydrolyse ont pour effet de couper des liaisons chimiques, l’eau fait gonfler les structures amorphes et facilitant ainsi la pénétration d’autres polluants.

Erosion de la surface par bombardement par les ions de la décharge. La surface devient rugueuse, son hydrophobicité diminue et elle peut se couvrir d’humidité par adsorption de molécule d’eau. Des courants superficiels peuvent alors développer, accélérer l’érosion et réduire encore l’hydrophobicité de la surface.

La réaction d’hydrolyse s’effectue en présence de l’eau (H₂O). Elle peut être schématisée comme suit :



Le groupement -X-Y- peut être latéral [par exemple ester dans le poly (acétate de vinyle) ou les polymères acryliques et méthacrylique] [20].

IV.4.1.3. coupure de la chaîne statique

Les longues chaînes des polymères peuvent être cassées (coupées) suite à l’augmentation de la température, ce qui provoque une diminution de la longueur de chaîne, diminution de la masse moléculaire moyenne (polymères linéaires), diminution du taux de réticulation donnant une augmentation de la masse moléculaire dans les polymères tridimensionnels. Les propriétés affectées par ces coupures sont celles liées à des interactions

polymères –solvant. La solubilité, la diffusion et la perméabilité augmentent avec le taux de dégradation.

IV.4.1.4. Dépolymérisation

C'est la réaction inverse de la polymérisation, un cas particulier de la réaction de coupure de chaîne. Elles font donc intervenir une élimination séquentielle de molécule de monomère (par exemple extrémité de chaîne) ; ou résultant d'une coupure statique. Les processus de dépolymérisation sont purement anecdotiques, car ils n'interviennent pratiquement qu'à température élevée, loin des conditions usuelles d'utilisation. On sait qu'ils se produisent plus facilement dans les polymères ayant des liaisons dans la chaîne à faible énergie de dissociation : PMMA [20].

IV.4.1.5. Réticulation

C'est la réaction formant un pont covalent entre les segments voisins de chaînes. Elle provoque une diminution de la mobilité moléculaire des segments de chaînes [20].

IV.4.2. Les processus physiques

La composition chimique du matériau n'est pas modifiée. Entraîner l'apparition de fissures. Il peut se produire avec ou sans transfert de masse.

IV.4.2.1. Avec transfert de masse

Un solvant peut pénétrer dans le matériau dans le polymère il peut y avoir plastification accompagnée d'un gonflement, perte d'adjuvant par extraction ou évaporation. Le solvant peut provoquer une craquelure, la déformation du polymère se poursuit, il se développe un phénomène de fissuration ou cracking.

Avec l'eau il peut exister des gradients de concentration dû à la diffusion, un gonflement différentiel fibre – polymère pour les matériaux composites ou un gonflement dû aux hétérogénéités du matériau. Cette pénétration de l'eau dans le matériau contribue à diminuer la résistance d'isolement ; elle se produit généralement lorsque les matériels sont à l'arrêt.

➤ Absorption d'un solvant

Les solvants dont l'eau sont des petites molécules qui peuvent pénétrer entre les chaînes moléculaires du polymère. Ce faisant les solvants agissent comme des plastifiant parce qu'ils

augmentent la distance entre ces chaînes, la valeur du module d'élasticité du matériau diminue. En pénétrant dans les polymères le solvant provoque un gonflement local ou généralisé de la pièce qui engendre des contraintes internes, L'effet de ces contraintes peut se traduire par l'apparition de craquelures ou même de fissuration dans la pièce

➤ **Migration d'adjuvant**

Les adjuvants permettant d'abaisser la température de transition vitreuse des matières plastiques utilisées largement dans les polychlorures de vinyle (PVC) au cours du temps ces adjuvants peuvent migrer ou s'évaporer, ce qui modifie les propriétés du matériau. Plus le poids moléculaire des adjuvants est faible (petite molécule mobile), plus leur migration est rapide. La migration et l'élimination des adjuvants peuvent se produire soit par leur évaporation, soit par leur extraction ou par l'exsudation.

IV.4.2.2. Sans transfert de masse

Des chocs peuvent entraîner des ruptures mécaniques induites par dilatation différentielle (gradient de température dans l'épaisseur ou matériaux hétérogènes), un matériau peut se fissurer sous contrainte en présence d'un composé tension-actif. Si le matériau est dans un état thermodynamique instable après sa mise en œuvre, il peut en résulter un vieillissement physique interne.

➤ **Fissuration sous contraintes en milieu tension actif**

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

➤ **Relaxation de volume et d'enthalpie**

Le vieillissement physique se traduit par une augmentation de la capacité de réseau macromoléculaire, autrement dit par une réduction de volume spécifique. Dans les polymères semi cristallins certains segment stéréo réguliers (donc capable de cristalliser), qui se trouvaient piéger dans la phase amorphe, vont progressivement diffuser et s'incorporer à des zones cristallin.

➤ **les chocs thermiques**

Les chocs thermiques peuvent entraîner des ruptures mécaniques induites par une dilatation différentielle, deux mécanismes sont susceptibles d'intervenir :

➤ **Matériaux hétérogènes**

Dans les matériaux composites soumis à des variations de température les dilatations différentielles entraînent des contraintes internes susceptibles d'endommager le matériau, il s'agit d'un phénomène de fatigue mécanique.

➤ **Gradient de température dans l'épaisseur**

Les matériaux organiques sont cas particuliers des isolants thermiques, lorsque la température du milieu varie rapidement un gradient de température établi dans l'épaisseur du matériau d'où dilatation différentielle, zone superficielle –zone interne. Dans le cas d'un choc thermique de grande amplitude une seule excursion en température peut entraîner la rupture.

Tous ces processus transformeront les propriétés physico-chimiques de la surface de l'isolant solide, ainsi que les propriétés (électrique, mécanique) qui conduit a la modification des propriétés d'usage.

IV.5. Les différentes méthodes d'analyse

Les décharges surfaciques sont connues par la modification des propriétés physico-chimiques de la surface d'un matériau isolant. Pour mieux comprendre ces phénomènes superficiels, il suffit de pouvoir les analyser en utilisant différentes techniques d'analyses grâce à la microscopie et à la spectroscopie qui nous permet d'obtenir des informations en particulier sûres:

- La topographie de surface en utilisant la microscopie à balayage électronique (MEB).
- La nature des liaisons, le degré d'oxydation et les groupements fonctionnels en utilisant l'analyse de la spectroscopie infrarouge à transformée de fourrier.
- La constitution élémentaire et quantitative des couches superficielles du nanomètre à quelques dizaines de micromètres. (EDS analyse spectroscopique à énergie dispersive).

IV.5.1. Microscopie électronique à balayage (MEB)

Le microscope électronique à balayage est un puissant outil d'observation et d'étude des matériaux. Un faisceau d'électrons est envoyé sur l'échantillon par un canon à électron. En contact avec la matière, ces électrons interagissent de différentes façons. Le MEB est très efficace pour la détection de défauts tels que les trous, les fissures ...etc. [14]

➤ Analyse élémentaire de la surface de l'isolant solide (EDS)

Cette analyse permet de déterminer l'apparition, à la surface du solide, de nouveaux éléments tels que l'oxygène ou la variation de la proportion d'éléments existants tels que le carbone [14].

IV.5.2. Hydrophobicité

L'étude de l'hydrophobicité des surfaces revêt un grand intérêt aussi bien dans le domaine de l'isolation électrique que dans les applications industrielles. L'hydrophobicité de la surface d'un isolant solide est évaluée à l'aide de la mesure de l'angle de contact, lorsqu'une goutte de liquide est déposée sur une surface solide plane. L'angle de contact s'interprète de la façon suivante : plus l'angle est grand plus l'hydrophobicité d'un matériau est importante. Cela signifie qu'un isolant plus hydrophobe, aura un angle de contact avec une goutte d'eau plus important que celui d'un matériau hydrophile [14].

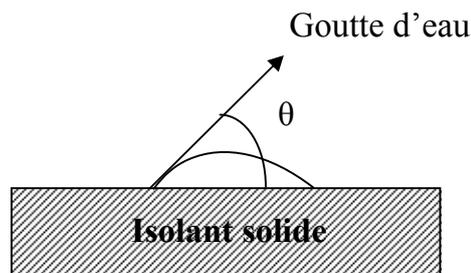


Fig.IV.1 : L'angle de contact

IV.5.3. Spectroscopie infrarouge

La spectroscopie infrarouge (IR) est l'une des méthodes les plus efficaces pour l'identification des molécules organiques et inorganiques à partir de leur propriété vibrationnelle. Le moyen infrarouge est riche en informations sur les secteurs des composés

examinés. De ce fait, il est utilisé pour analyser les surfaces des matériaux, dont il permet de garder une sorte d'empreinte digitale.

IV.5.3.1. Définition

Le rayonnement infrarouge (IR) est un rayonnement électromagnétique d'une longueur d'onde supérieure à celle de la lumière visible mais plus courte que celle des micro-ondes. Le domaine infrarouge entre 4000 cm^{-1} et 400 cm^{-1} ($2.5\text{-}25\ \mu\text{m}$), correspond au domaine d'énergie de vibration des molécules, l'infrarouge est associé à la chaleur car, à température ambiante ordinaire, les objets émettent spontanément des radiations dans le domaine infrarouge.

IV.5.3.2. Source du rayonnement infrarouge

Tous les corps émettent de l'infrarouge, dans des proportions plus ou moins importantes suivant leur température, on cite : le soleil, la terre, le corps humain, les sources d'éclairage et les sources de signaux (la diode émettrice d'infrarouge).

IV.5.3.3. Présentation de l'absorption dans l'infrarouge

Les absorptions des échantillons peuvent être réunies sur un document de base obtenu avec un spectromètre appelé spectre infrarouge.

IV.5.3.4. Spectroscopie infrarouge à transformée de Fourier

La spectroscopie infrarouge à transformée de Fourier (IRTF) est basée sur l'absorption d'un rayonnement infrarouge par le matériau analysé. Elle permet la détection des vibrations caractéristiques des liaisons chimiques, et d'effectuer l'analyse des fonctions chimiques présentées dans le matériau [21].

IV.5.3.4.1. Principe

L'analyse s'effectue à l'aide d'un spectromètre à transformée de Fourier qui envoie sur l'échantillon un rayonnement infrarouge et mesure les longueurs d'onde auxquelles le matériau absorbe, et les intensités de l'absorption.

Le faisceau infrarouge provenant de la source est dirigé vers l'interféromètre de Michelson qui va moduler chaque longueur d'onde du faisceau à une fréquence différente. Dans l'interféromètre le faisceau lumineux arrive sur la séparatrice constituée d'un film semi transparent de germanium déposé sur une lame de KBr . Ce dispositif permet de générer deux

faisceaux dont l'un se dirige vers le miroir fixe, et l'autre passe à travers la séparatrice et se dirige sur le miroir mobile. Quand les deux faisceaux se recombinent, des interférences destructives ou constructives apparaissent en fonction de la position du miroir mobile. Le faisceau modulé est alors réfléchi des deux miroirs vers l'échantillon où des absorptions interviennent. Le faisceau arrive ensuite sur le détecteur pour être transformé en signal électrique.

Le signal du détecteur apparaît comme un interférogramme, c'est à dire une signature de l'intensité en fonction de la position du miroir. L'interférogramme est la somme de toutes les fréquences du faisceau. Cet interférogramme est ensuite converti en un spectre infrarouge par une opération mathématique appelée transformée de Fourier [21].

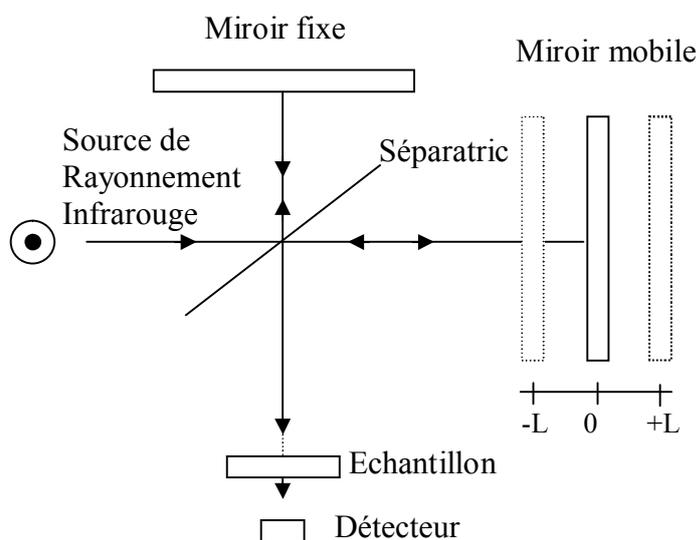


Fig. IV.2 : schéma d'un interféromètre de Michelson

IV.5.3.5. Réflexion totale atténuée

Le principe de l'ATR consiste à faire subir au faisceau optique une ou plusieurs réflexions à l'interface entre un matériau transparent dans l'IR parallélépipédique ou trapézoïdal, d'indice de réfraction n élevé tel le germanium ($n=4$) sur lequel l'échantillon a été déposé. Si l'angle d'incidence est supérieur à l'angle critique, la lumière ne pénètre que faiblement dans l'échantillon à une profondeur qui dépend de la longueur d'onde, des indices réactifs du cristal et de l'échantillon et de l'angle d'incidence. On admet que cette onde évanescente pénètre de quelques micromètres. La succession de plusieurs réflexions totales mais atténuées de ce type conduit à un trajet optique effectif comparable à celui qui aurait été

obtenu par transmission. On corrige néanmoins le spectre pour tenir compte de la profondeur de pénétration, étant donné qu'elle varie avec la longueur d'onde [21].

IV.6. Conclusion

Nous avons consacré notre étude dans ce chapitre aux différents facteurs de dégradation superficielle des polymères (électriques, thermiques, mécaniques et climatiques), les différents processus de dégradation superficiel (chimiques, physiques) et aux différentes techniques d'analyse utilisés pour caractériser l'état de surface.

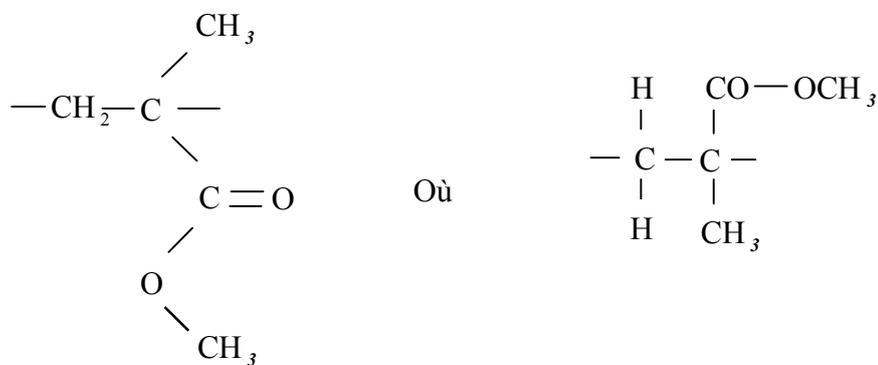
V.1. Introduction

La décharge électrique est une contrainte qui peut affecter les propriétés physico-chimiques d'un thermoplastique, il devient donc moins performant. C'est pour cette raison qu'on s'est intéressé à l'étude de l'effet de la décharge sur la surface d'un isolant solide [22].

V.2. Polyméthacrylate de méthyle (PMMA)

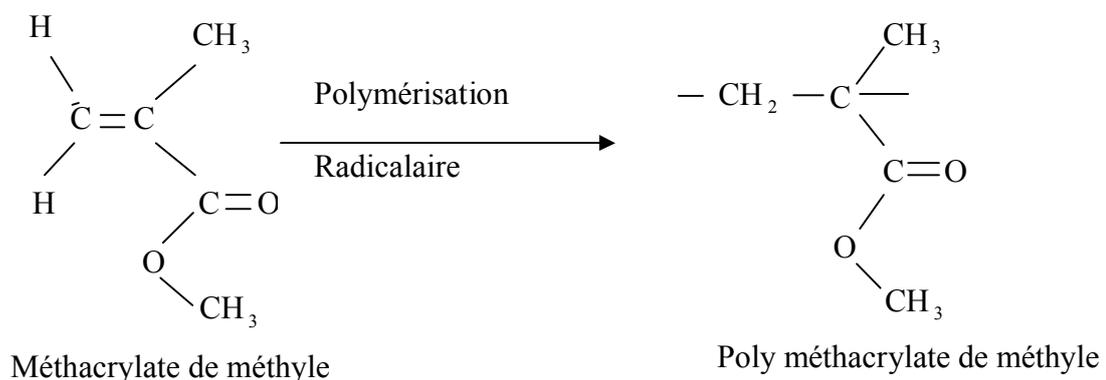
Le Polyméthacrylate de méthyle (PMMA) est un thermoplastique amorphe aux excellentes propriétés optiques. Il est obtenu par polymérisation radicalaire du monomère méthacrylate de méthyle.

Ce polymère est connu sous son nom commercial plexiglas, mais aussi sous les noms de perpex, polyacrylique et lucite [22].



Structure de PMMA ($\text{C}_5\text{O}_2\text{H}_8$)

Synthèse :



V.3. Propriétés de PMMA [22]

V.3.1. Propriétés physiques

- Le PMMA est surtout connu par ces propriétés optiques exceptionnelles [92% de transition lumineuse],

- Le PMMA est un polymère rigide et cassant,
- En surface, le PMMA se raye facilement et se polit aisément,
- Légèreté ; densité de 1.19g/cm^3 ,
- Excellente résistance aux agents atmosphériques,
- Masse volumique 1.18 g/cm^3 ,
- Indice de réfraction 1.491.

V.3.2. Propriétés chimiques

- Le PMMA est insipide sans odeur,
- Résiste assez bien aux acides organiques et minéraux dilués,
- Il présente une excellente tenue aux rayons ultras violets et à la corrosion.

V.3.3. Propriétés électriques

Les propriétés électriques peuvent être nettement affectées par la reprise d'humidité.

- La résistance à l'arc est excellente,
- Il est électrostatique, ce qui peut nuire à sa présentation (attraction de poussière),

On peut plier cet inconvénient en utilisant des produits antistatiques. Pour le PMMA coulé on a :

- Résistivité transversale est supérieure à $10^{15}\ \Omega\cdot\text{cm}$,
- Tension de claquage dans l'air est entre 13 et 15 kV/cm,
- Constante diélectrique 50 à 10 MHz 3.7 à 2.8,
- Facteur de pertes diélectrique 0.06-0.03.

V.3.4. Propriétés mécaniques

Le PMMA est un polymère amorphe dont la température de transition vitreuse est de 110°C jusqu'à 135°C .

Il est hygroscopique, dans des conditions extrêmes l'eau absorbée agira comme un plastifiant et modifiera les propriétés du matériau.

- Fluage : son fluage est assez limité,
- Choc : la résistance aux chocs est relativement faible,
- Dureté : le PMMA résiste bien à la rayure dans des conditions normales d'usage,

- Les PMMA se polit facilement,
- Contrainte au seuil (rupture) (50-70) [Mpa]
- Allongement au seuil (rupture) (2-4) %
- Module de traction 3100 -3300 [Mpa]
- Module de réflexion 3200[Mpa]

V.3.5 Propriétés thermiques

- Le PMMA est combustible et brûle sans fumée excessive,
- Son retrait au moulage est faible comme pour les polymères amorphes,
- Son coefficient de dilatation linéaire étant très différent de celui des métaux et son élasticité faible.
- La température maximale d'utilisation est faible $< 80^{\circ}\text{C}$.
- Température de fusion 190-240°C
- Transition vitreuse 110-135°C
- Plage de température de résistance continue 80-90°C
- Retrait au moulage 0.3-0.5 %
- Conductivité thermique 0.19 [W/m.K]
- Dilatation thermique 0.7-0.8 [10^{-4}K^{-1}]

V.4. Domaines d'utilisation

- **Les applications industrielles :** Cadran, capot de machine à laver, portes de fours à micro-ondes, les écrans de contrôle industriel, les synoptiques de contrôle du trafic routier et ferroviaire.
- **L'ameublement et décoration :** Salons, tables, ébénisterie, escalier, mobiliers hospitaliers, couveuses.
- **Les sanitaires :** Baignoires, bacs à douche, lavabos (pièces thermoformées et colorées).
- **Le bâtiment :** concernant tout particulièrement.

Les parties transparentes des immeubles modernes (garde-corps de balcon, pare-soleil, brise vent).

L'éclairage : dômes, coupes, voûtes, survitrage.

La réalisation de toitures, parois de locaux industriels, pour lesquels on utilise le PMMA extrudé [22].

- **Les loisirs** : les articles de publicité, enseignes, présentoirs, affiches...
- **L'optique et l'électronique** : Les fibres optiques (l'automobile, aviation, l'informatique, les connections industrielles). En optique, le PMMA est utilisé pour les lentilles, les épiscopes.
- **L'électrotechnique** : pour des applications telles que les condensateurs, enrobage de composants, supports divers.
Isolant dans les générateurs d'onde de chocs.
- **La médecine** : il a une bonne compatibilité avec le tissu humain
 - L'orthopédie : pour apposer implanté et remplacer l'os perdu.
 - La chirurgie
 - Cosmétique pour réduire de manière permanente des rides [22].

V.5. Recyclage

Le PMMA peut être fondu puis remoulé, mais c'est surtout par dépolymérisation qu'on peut le recycler facilement par chauffage. Le PMMA redonne son monomère de départ qui peut alors être réutilisé pour une nouvelle polymérisation [22].

V.6. Avantages et inconvénients [22]

V.6.1. Avantages

- Transparence exceptionnelle,
- Bonne tenue aux UV,
- Surface brillante,
- Thermoformage aisé,
- Possibilité de couler,
- Facile à coller.

V.6.2. Inconvénients

- Cassant, fragile, rayable,
- Tenue en température limitée (80°C),
- Résistance chimique très moyenne,
- Fendillement sous charge possible.

V.7. Commercialisation

Le PMMA se présente sous plusieurs formes commercialisées :

- La poudre dont la granulométrie est de l'ordre de $300 \mu m$
- PMMA en granulés : issu de la polymérisation en suspension.
- Les plaques coulées : délivrée généralement en plaques d'épaisseur variant de 2mm à 8cm
- Les plaques extrudées : qui se développent plus que celle des plaques coulées, car elles sont moins chères [22].

V.8. Dispositif expérimental

V.8.1. Objectif d'étude

Ce chapitre est consacré aux travaux expérimentaux effectués sur le PMMA au niveau de laboratoire « haute tension » de l'université Mouloud- Mammeri de Tizi-ouzou.

L'objectif de notre travail consiste à étudier l'influence de la décharge électrique sur la surface de solide isolant.

V.8.2. Préparation des échantillons

Les éprouvettes utilisées pour les essais ont une épaisseur de 2.8mm et ont été découpées en carrés de 8cm de côté. Les éprouvettes sont ensuite nettoyées, lavées à l'eau savonneuse et rincées à l'eau puis séchées.

V.8.3. Matériels utilisés

- Un transformateur d'essais : 100kV ,50HZ, 10kVA,
- Un autotransformateur pour varier la tension du transformateur,
- Deux électrodes planes,
- Une table de travail sur laquelle on fixe notre cellule d'essais,
- Un échantillon de PMMA.

V.8.4. Description du dispositif expérimental

Les essais électriques ont été effectués au laboratoire de haute tension. Le schéma du dispositif expérimental est représenté sur la (fig.V.2.). Nous avons utilisés une configuration plan-plan. Les décharges superficielles ont été obtenues par la variation de la tension de transformateur d'essai, dont les caractéristiques suivants, 100kV, 50HZ, 10kVA, la variation de la tension se fait à l'aide d'un autotransformateur qui se trouve au niveau du pupitre de commande, la valeur est fixée à 16kV.

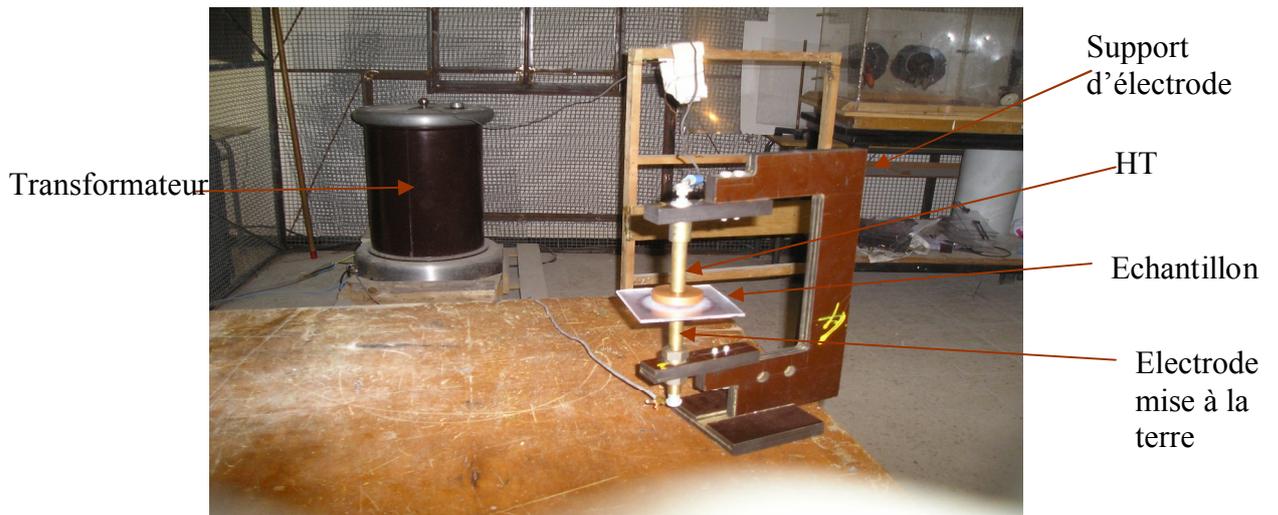


Fig.V.1. Dispositif expérimental

V.8.5. Observation visuelle de la surface des échantillons

Pendant ces essais, nous avons pu observer la décharge apparue sous forme d'effet couronne détecté à l'oeil (lumière).

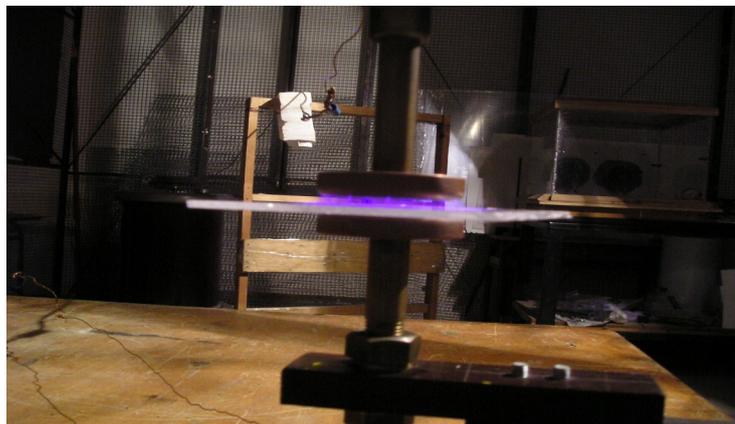


Fig.V.2. Observation d'effet couronne

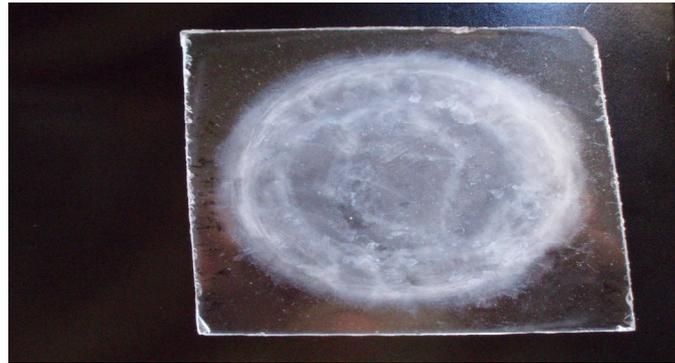


Fig.V.3. Vieillissement du PMMA durant 12h

Nous avons soumis aux décharges de surface l'échantillon d'isolant solide sous une tension de 16 kV (entre électrodes).

La figure (V.3) illustre les changements de l'état de surface du PMMA vieilli sous décharges électriques.

Une érosion sévère de la surface du solide isolant (PMMA) a été constatée. La zone érodée forme une sorte d'anneau blanchâtre au contour plus ou moins distinct. Cet anneau fait face au bord circulaire de l'électrode haute tension. En effet, la dégradation la plus importante se produit dans la région soumise au champ électrique renforcé par le phénomène d'effet de bord. La région centrale de l'échantillon est d'un blanc plutôt clair, signe d'une dégradation moins importante. Des dégradations ponctuelles localisées d'environ 2mm de diamètre sont observées même dans cette région.

Nous avons constaté que le rayon de la surface qui a subi l'érosion augmente légèrement avec le temps de vieillissement. La surface attaquée par les décharges perd sa transparence. Pour montrer la perte de la transparence des zones érodée par les décharges, nous avons photographié l'échantillon en le plaçant sur une surface sombre. Ainsi, les parties transparentes (non érodée) apparaissent noires sur la photographie et les régions dégradées sous l'action des décharges sont blanches. Le changement de couleur de la surface des polymères soumis à des décharges est aussi relevé par d'autres chercheurs. Ceci est expliqué par l'oxydation ou l'élimination de groupements fonctionnels le long de la chaîne de polymère.

Nous avons aussi observé la formation d'un dépôt blanchâtre après assèchement de l'échantillon dans un dessiccateur.

V.8.6. Analyse du processus de dégradation de la surface du PMMA – Modèle de schéma cinétique [15].

Le spectre FTIR du PMMA est donné par la figure (V.4).

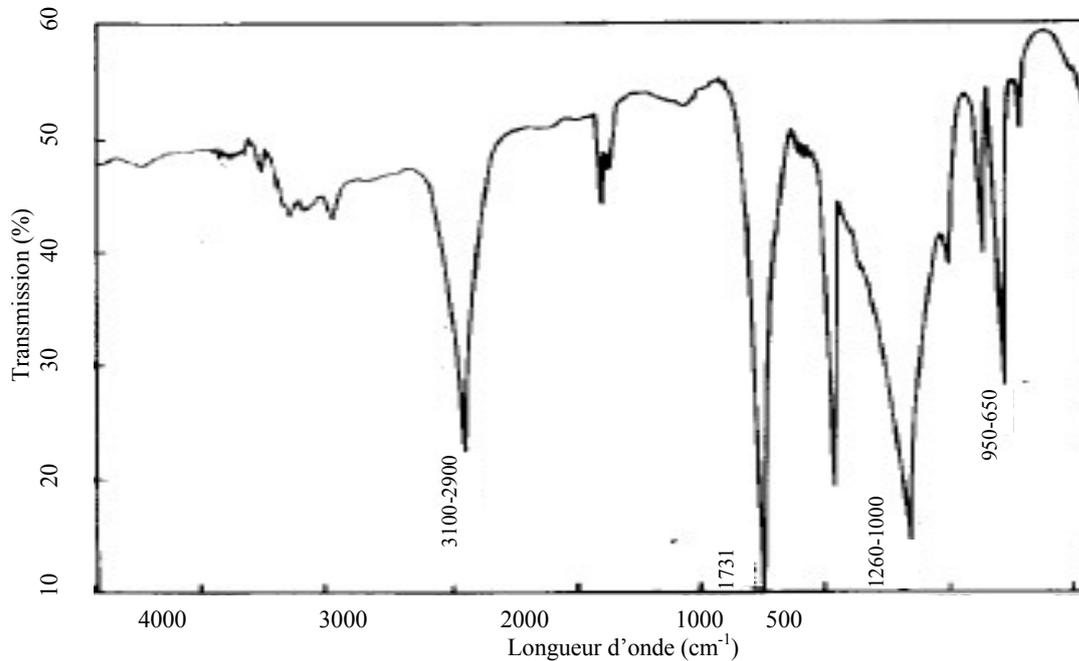
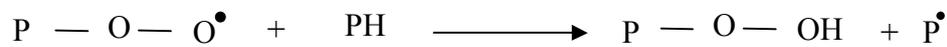
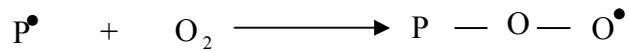
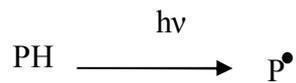


Fig.V.4. Spectre FTIR du PMMA

- La large bande de 950 à 650 cm^{-1} , est due à la torsion de la liaison C - H.
- La large bande s'étalant de 1260 à 1000 cm^{-1} peut s'expliquer par la vibration d'élongation ester C-O.
- Un pic étroit intense est observé à 1731 cm^{-1} , il est dû à la présence d'un groupement carbonyle d'ester.
- Le large pic de 3100 à 2900 cm^{-1} est due à la présence de vibration d'élongation.

En présence d'oxygène, l'application d'une décharge couronne accélère les réactions d'oxydation à la surface du polymère. Les réactions chimiques responsables de la dégradation d'un polymère donné (p) ont fait l'objet de nombreuses études, et la plupart des chercheurs ont basant leur analyse sur le schéma cinétique simplifié suivant :



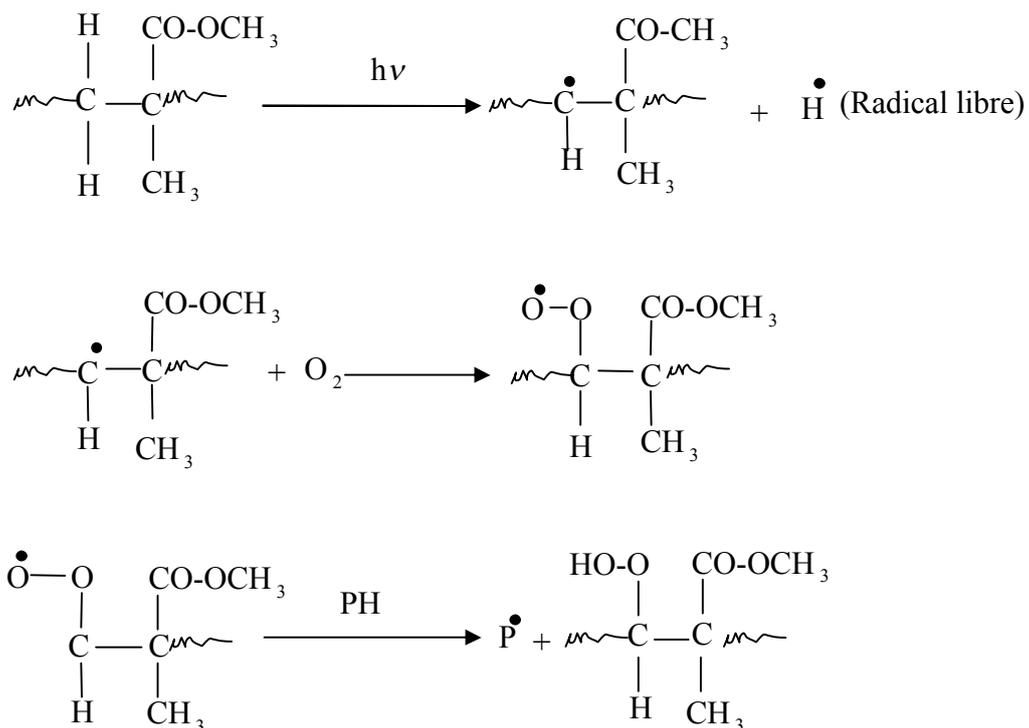
PH : polymères,

P^\bullet : radical libre,

$h\nu$: énergie de photon.

Nous nous basons sur ce schéma, on propose l'analyse suivante pour expliquer la dégradation du PMMA. Nous expliquons comme suit, le processus d'oxydation de la surface de l'isolant et la formation de certains produits de dégradation. L'énergie $h\nu$ que peut recevoir une molécule d'oxygène au sein de la décharge électrique provoque la rupture de la liaison π qui est plus fragile que la liaison σ de la molécule O_2 pour donner un oxygène activé très réactif. Le polymère PMMA réagit avec l'oxygène activé pour former un hydroperoxyde (O-OH) à la place de l'atome d'hydrogène qui a été arraché sous l'action de l'énergie $h\nu$ communiquée au matériau par la décharge. La liaison O-OH de l'hydrogène attaché au polymère étant la plus fragile, elle se rompra facilement sous l'action de l'énergie de la décharge. Un groupement hydroxyle (OH) se détachera :

- Soit par rupture de la chaîne principale,
- Soit par rupture de la liaison C-H.



V.9. Observation visuelle de la surface de l'électrode haut tension



Fig.V.5. Formation d'humidité et oxyde de cuivre sur l'électrode

L'observation visuelle de la surface de l'électrode en cuivre montre aussi la formation d'une couche d'humidité et d'oxyde de cuivre (Fig.V.3). Les produits très réactifs, tel que l'ozone, créés par la décharge sont responsables de cette oxydation.

V.10. Conclusion

Dans cette partie, nous avons mis en évidence la dégradation de la surface de l'échantillon de PMMA, soumis aux décharges de la surface.

L'observation visuelle a montré un changement de couleur des régions soumises aux décharges.

Nous avons établi un modèle chimique pour expliquer comment les particules très énergétiques et les rayonnements émis par les décharges agissent sur les chaînes moléculaires de la surface du solide isolant. Des ruptures des liaisons chimiques se produisent et de nouveaux groupements fonctionnels apparaissent. Ceci se traduit par la transformation des propriétés physico-chimiques de la surface du solide qui se dégradera, deviendra plus mouillable et facilitera la circulation de courant de surface.

Conclusion générale

Au terme de notre travail qui a pour objet, contribution à l'étude de l'effet des décharges électriques sur la surface d'un solide isolant sous tension alternative 50Hz, il peut sortir que :

- La science des polymères a été développée dans le but d'obtenir de nouveaux matériaux, avec des propriétés diélectriques, ainsi qu'une résistance à la température et à l'humidité améliorées.

- Les décharges de surface connaissent un grand intérêt avec l'accroissement du nombre de problèmes rencontrés en pratique tel que la dégradation des surfaces des espaceurs utilisés dans les câbles de puissance, des barrières utilisées dans les transformateurs haute tension.

- Malgré la mise en œuvre des différentes méthodes d'étude des décharges surfaciques, il est difficile d'analyser théoriquement tout ce qui est lié à ces décharges parce qu'il dépend de plusieurs facteurs tels que la tension appliquée, la forme de l'onde de tension, la pression et la nature de milieu où est plongé l'isolant solide, la nature et la forme de ces derniersetc.

- L'observation visuelle d'échantillon de PMMA soumis à des décharges électriques montre une dégradation importante de la surface.

Nous espérons que ce modeste travail sera d'une aide appréciable pour ceux qui poursuivront l'étude de ce phénomène.

Références bibliographiques

- [1] R.Fournié, R.Coelho ; « Bases théoriques » ; Technique de l'ingénieur D 2 300, 2007.
- [2] C. Menguy ; « Mesure des caractéristiques des matériaux isolants solides » ; Technique de l'ingénieur D 2 315, 2007.
- [3] R.Fournié; « les isolants en électrotechnique concept et théorie »
Edition Eyrolles 1986.
- [4] JP. Trignon, J. Verdu, A. Dobrazynski ; « Précis de matériaux plastiques » ;
5^{eme} Edition Afnor 1994.
- [5] Internet File://G:_Les matériaux plastiques .htm.
- [6] G. Mouheb, S Rekhou ; « Influence du vieillissement thermique sur la conduction électrique du polystyrène » ; mémoire de fin d'études d'ingénieur UMMTO, 2007.
- [7] Ph. Robert ; « Matériaux de électrotechnique » Edition Georgie, 1979.
- [8] Y. Brechet, J. Courbon, M. Dupeux ; « Matériaux 2. Microstructure et mise en œuvre » ;
Edition Dunod, Paris 1991.
- [9] C. Oudet ; « Polymères structure et propriété, introduction » ; Edition Masson 1994.
- [10] A .Boudet ; « Voyage au cœur de la matière plastique » ; Edition C NRS Paris, 2003.
- [11] N .Heymans, H Henning Kauscsh, P Decroly, Ch Jon Pluma; « Traité des matériaux Polymères »; Edition Lausanne, PPUR, 2001.
- [12] M. Aguet, M lanoz ; « Traité d'électricité » ; Haute tension
Edition Georgie Vol XXII ; 2001.

- [13] A.Amrouni, A.Mohand ousaid; « Contribution à l'étude des décharges superficielles en tension alternative 50Hz»; mémoire de fin d'études UMMTO, 2001
- [14] M. M.A. Handala; « Etude de la décharge de surface sous tension alternative 50Hz »; thèse de doctorat 2007.
- [15] F. Lounes ; « Contribution à l'étude du vieillissement électrique d'interfaces isolantes air – solides »; mémoire de fin d'études UMMTO, 2007.
- [16] Cours haute tension (4^{ème} année ETH) assurée à l'université de M. Mammeri de T.O diriger par M. M.A. Handala.
- [17] T.Shimazaki, I.Tsuneyasu «Flashover processes on the surface of solid insulators under positive impulse voltage in the atmosphere »; IEEE Vol 25 No 6 December 1990.
- [18] F. Robert; les isolant en électrotechniques ; « Essais, mécanisme de dégradation. Application industrielle»; 1990.
- [19] B. Pinel, F. Duchateau ; « Fonction d'isolation dans les matériels électriques»; Technique de l'ingénieur D 2 302, 2007.
- [20] J. Verdu ; « Transformation et vieillissement des polymères » ; Technique de l'ingénieur AM 3 152.
- [21] F. Rouessac, A. Rouessac ; « Méthode et technique instrumentale modernes, cours et exercice résolus»; Edition Dunod, Paris 2000.
- [22] M.Carrega et Coll ; « Matériaux polymères» Edition Dunod, juin 2000.