

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE
MINISTERE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR
ET DE LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE

Université Mouloud MAMMERI de Tizi-Ouzou
Faculté de Génie Electrique et d'Informatique
Département d'Electrotechnique

MEMOIRE

De fin d'études

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

Option : Réseaux Electriques

Thème :

**Etude des courants de
décharge dans une isolation
mixte PMMA/air**

Réalisé par :

M^{lle} BOUALI SALIMA

Proposé et dirigé par :

M. M.A. HANDALA

Promotion 2010

REMERCIEMENTS

*Je souhaite exprimer ma reconnaissance
à mon promoteur M. M.A.HANDALA qui a
dirigé cette étude.*

*Mes remerciements vont aux membres de jury qui
me feront l'honneur de juger ce modeste travail.*

*Je ne peux oublier de remercier tous les
membres de ma famille pour leurs soutiens,
particulièrement ma mère.*

Sommaire

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

Chapitre I : Rappel sur les décharges dans l'air

I.1. Introduction	4
I.2. Processus d'excitation et d'ionisation	4
I.2.1. Ionisation thermique	4
I.2.2. Ionisation par choc	4
I.2.3. Ionisation par photon	5
I.3. Processus de désexcitation et de désionisation	5
I.4. Attachement électronique	5
I.5. Recombinaison	6
I.6. Décharge de Townsend	6
I.6.1. Processus d'avalanche	6
I.6.2. Coefficient de Townsend	6
I.6.3. Critère de Townsend	7
I.6.4. Limite de la théorie de Townsend	8
I.7. Théorie de streamer	8
I.7.1. Critère de Meek	9
I.7.2. Critère de Raether	9
I.8. conclusion	9

Chapitre II : Décharge électrique de surface

II.1. Introduction	11
II.2. Définition	11
II.3. Processus de décharge de surface dans l'isolant solide	11

II.4. Lois de Toepler	13
II.5. Figure de Lichtenberg	14
II.6. Travaux de Mooroka	15
II.7. Processus de propagation des décharges glissantes	15
II.7.1. Décharges glissantes positives	16
II.7.1.1. Processus A	16
II.7.1.2. Processus C	17
II.7.2. Décharges glissantes négatives	18
II.7.2.1. Processus A	19
II.7.2.2. Processus C	19
II.8. Similarité de la décharge glissante avec la décharge de foudre	20
II.9. Paramètres influent sur les décharges de surface	20
II.9.1. La résistivité superficielle	21
II.9.2. La permittivité relative	22
II.9.3. Paramètres géométriques	23
II.9.3.1. L'état de surface de l'isolant solide	23
II.9.3.2. Le diamètre de l'électrode haute tension	23
II.9.3.3. L'épaisseur de l'isolant	24
II.9.3.4. Rayon de courbure de la pointe	26
II.9.3.5. Influence de la forme de l'électrode	27
II.10. Conclusion	28

Chapitre III : Présentation du polyméthacrylate de méthyle

III.1. Introduction	30
III.2. Définition	30
III.3. Polymérisation	30
III.3.1. Polyaddition	30
III.3.2. Polycondensation	30

III.4. Caractéristiques générale des polymères	30
III.4.1. Résistivité superficielle-Résistivité transversale	30
III.4.1.1. Influence de la température sur la résistivité	32
III.4.1.2. Influence d'humidité sur la résistivité	32
III.4.1.3. Influence du champ appliqué sur la résistivité	32
III.4.1.4. Influence de la nature des électrodes sur la résistivité	32
III.4.2. Rigidité diélectrique	33
III.4.2.1. Influence de la tension appliquée sur la rigidité diélectrique	33
III.4.2.2. Influence de l'épaisseur de l'éprouvette sur la rigidité diélectrique...	33
III.4.2.3. Influence de la température sur la rigidité diélectrique	34
III.4.2.4. Influence du milieu ambiant sur la rigidité diélectrique	34
III.4.3. Permittivité	34
III.4.4. Perte diélectrique	34
III.5. Description générale du polyméthacrylate de méthyle	35
III.6. Procédé de fabrication	36
III.6.1. Principe de production du monomère	36
III.6.2. Production du PMMA	37
III.7. Propriétés du PMMA	37
III.7.1. Propriétés physiques	37
III.7.2. Propriétés mécaniques	38
III.7.3. Propriétés électriques	38
III.7.4. Propriétés thermiques	39
III.7.5. Propriétés chimiques	39
III.7.6. Propriétés optiques	39
III.7.7. Propriétés acoustiques	40
III.7.8. Autre propriétés	40
III.8. Recyclage	40

III.9. Domaines d'utilisation	40
III.10. Avantages et inconvénients du PMMA	41
III.10.1. Avantages	41
III.10.2. Inconvénients	41
III.11. Commercialisation	41
III.12. Conclusion	42

Chapitre IV : Essais et mesures

IV.1. Introduction	44
IV.2. Montage expérimental	44
IV.3. Electrodes	45
IV.4. Echantillon utilisé	46
IV.5. Mesure du courant de préclaquage.....	46
IV.6. Protection de l'oscilloscope.....	46
IV.7. Essais préliminaires	47

Chapitre V : Interprétation des résultats

V.1. Introduction	49
V.2. Formes des impulsions du courant de décharge	49
V.3. Influence de la tension sur le courant maximum de décharge	51
V.4. Influence de l'intervalle d'air	53
V.5. Influence du vieillissement	55

Conclusion générale	57
----------------------------------	----

Introduction générale

Le progrès dans le domaine de la haute tension a pris un élan considérable. De nos jours, la théorie d'isolement s'enrichit de plus en plus par de nouvelles découvertes. En fait, l'ingénieur devra maîtriser et cerner tous les phénomènes liés à la haute tension de manière à concevoir des appareils résistants aux contraintes d'exploitation subies lors du transport d'énergie électrique.

En pratique, l'association d'un isolant solide avec un gaz est souvent indispensable pour assurer une rigidité mécanique ou pour jouer le rôle d'une barrière électrique assurant une meilleure rigidité diélectrique au système. L'étude de telles isolations constitue un sujet de recherche d'actualité.

Comme il est connu, les décharges superficielles qui apparaissent à l'interface d'une structure mixte gaz/solide, sont très nuisibles aux systèmes d'isolation haute tension. La maîtrise des phénomènes liés à ces décharges revêt un grand intérêt du point de vue scientifique, économique et du rendement.

Notre travail consiste à étudier les différentes phases du développement des décharges superficielles dans une configuration à champ non uniforme, ainsi qu'à visualiser les courants de préclaquage. Dès lors, une approche théorique et pratique du phénomène s'impose.

Pour ce faire, notre travail a été scindé en deux parties. La première à caractère purement théorique, débute par un rappel sur les décharges dans l'air, suivie dans un second lieu d'un chapitre sur les décharges électriques de surface. Nous terminerons cette partie par une description générale du polymère utilisé.

Pour concrétiser la première partie, la deuxième partie s'impose d'elle-même. Purement expérimentale, elle concernera plus précisément, le courant de préclaquage des décharges superficielles. Nous commencerons par présenter le montage expérimental ainsi que le mode opératoire utilisé pour réaliser les différentes expériences. On terminera par présenter, analyser et interpréter les résultats obtenus lors de ces essais.

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

Chapitre I

Rappel sur les décharges dans l'air

I.1. Introduction

Les gaz constituent un des éléments de base de l'isolation à haute tension des matériels électriques, car ils ont de bonnes propriétés isolantes, et ils sont autorégénérateurs.

Dans certaines conditions, un gaz peut être traversé par un courant intense, lié au déplacement des ions et des électrons sous l'effet du champ électrique E . On dit qu'il est le siège d'une décharge.

L'existence d'une décharge électrique résulte alors du passage d'un courant dans le diélectrique gazeux, et donc de la possibilité de créer des particules chargées à partir des atomes ou molécules neutres constituant ces gaz. En fait ce courant est porté essentiellement par les électrons libres.

Il est donc important de reconnaître tous les mécanismes régissant l'existence de ces derniers, et d'étudier les phénomènes complexes d'ionisation, de formation et de développement des décharges qui se produisent dans l'air.

I.2. Processus d'excitation et d'ionisation

I.2.1. Ionisation thermique [1]

L'énergie cinétique de translation acquise par les particules joue un rôle très important dans la production des chocs.

A température ordinaire, cette énergie n'est pas assez suffisante pour générer ces chocs. A une élévation de température, l'agitation thermique croît, ce qui explique l'élévation de la densité des particules. Par conséquent l'élévation de la fréquence des chocs ainsi que la diminution du temps moyen entre les chocs successifs sont tels que les excitations successives d'atomes se cumulent pour aboutir à l'ionisation.

I.2.2. Ionisation par choc [1]

Un électron peut ioniser une particule neutre si son énergie est supérieure à l'énergie requise pour l'ionisation « $e V_i$ », donc on a :

$$\frac{1}{2}mv^2 \geq e.V_i$$

Dans le cas d'une collision avec une particule excitée, l'énergie requise par ionisation est plus faible :

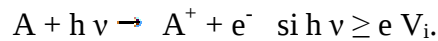
$$\frac{1}{2}mv^2 = e.V_i - e.V_e$$

Où V_e est le potentiel d'excitation de l'atome.

L'ionisation peut être produite aussi par les ions positifs, mais ce processus exige que la particule incidente ait un haut niveau énergétique.

I.2.3. Ionisation par photon [1]

Un photon peut exciter ou même ioniser une particule neutre suivant le principe :



I.3. Processus de désexcitation et de désionisation [1]

A tout processus d'excitation ou d'ionisation est associé un processus inverse tendant à ramener les particules à leur état fondamental.



Le processus de désexcitation peut se produire lorsque l'électron d'un atome excité revient sur son orbite fondamentale. La perte d'énergie est composée par l'émission d'un photon, ayant une énergie égale au potentiel de désexcitation.

Il peut aussi résulter du choc avec une particule, celle-ci bénéficiant alors, sous forme d'énergie cinétique, de la perte d'énergie interne subie par l'atome.

I.4. Attachement électronique [1] [2]

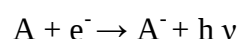
Dans le gaz, il n'y a pas seulement le phénomène d'ionisation d'origine photonique, ou dû aux impacts électroniques ; il existe un autre phénomène qui consomme les électrons libres c'est l'attachement électronique.

Il consiste à la fixation d'un électron par une molécule ou un atome neutre et conduit à la formation d'un ion négatif. Ce processus ne peut pas avoir lieu si les électrons sont trop énergétiques.

Il s'avère qu'en présence d'un champ électrique faible, l'attachement des électrons est extrêmement rapide, et que le nombre d'électrons libres diminue de moitié en quelques secondes.

Ce mécanisme est défini par un coefficient η qui est le nombre d'attachements électroniques par unité de longueur du parcours des électrons dans la direction du champ.

Ce processus est décrit par l'équation :



I.5. Recombinaison [1]

Elle peut être obtenue par collision entre ions, ou par collision entre ion positif et électron.

- Ø La recombinaison entre ions est caractérisée par la présence d'ions positifs et négatifs qui échangent leurs charges pour y revenir à l'état neutre. Ces réactions inverses des réactions d'ionisations, libèrent une certaine énergie, soit sous forme de photons, soit sous forme d'énergie cinétique cédée à une molécule de gaz voisine.
- Ø Lorsqu'un électron se recombine avec un ion positif pour redonner un atome neutre, la réaction libère une énergie égale à l'énergie d'ionisation. Cette énergie est sous forme de photons. Ces photons émis peuvent à leurs tours ioniser le gaz à une distance.

I.6. Décharge de Townsend

La décharge de Townsend est une décharge autonome, qui se produit à de très faibles pressions ($0.1 \text{ atm} \leq P \leq 1 \text{ atm}$), dans un système d'électrodes planes. Sa théorie se base sur la multiplication électronique par ionisation du gaz.

I.6.1. Processus d'avalanche [1] [2]

Quand on soumet un électron germe à un champ électrique, crée par un potentiel appliqué à un intervalle gazeux, compris entre deux électrodes séparées par une distance d , il peut ioniser une espèce neutre si son énergie dérivant du champ excède le potentiel d'ionisation de cette dernière. Alors un deuxième électron sera créé, deux électrons sont alors disponibles.

Accélérés à leur tour par le champ, ils peuvent ioniser deux atomes ou molécules si leur énergie le leur permet, pour former quatre électrons et ainsi de suite. C'est ce phénomène qu'on appelle avalanche électronique.

I.6.2. Coefficient de Townsend [1] [2]

Le phénomène de multiplication est caractérisé par un facteur d'ionisation α qui représente le nombre moyen de paires «ion-électron» formées par un seul électron sur un parcours de 1cm dans la direction du champ.

Ce facteur est aussi appelé premier coefficient de Townsend qui dépend de la nature et de la pression P du gaz ainsi de l'intensité du champ E .

Dans le cas d'un champ homogène, créé par les électrodes planes, le nombre de nouveaux électrons produits sur un parcours élémentaire dl est donné par :

$$dN = N \alpha dl \dots (*)$$

Les expériences montrent que pour un même gaz, α dépend de l'énergie $E\lambda_q$ acquise par l'électron le long du libre parcours λ et donc de E/P , mais aussi de la fréquence des collisions, donc de P , d'où :

$$\alpha = P f(E/P)$$

En effet, quand la pression augmente, le nombre de collisions augmente, alors que le libre parcours moyen λ diminue. On exprime α indépendamment de la pression par la loi :

$$\alpha/P = f(E/P)$$

En posant : $\alpha' = f(E/P)$ et $E' = E/P$

On aura : $\alpha' = f(E')$

α' est une fonction de E' , et E' dépend de l , d'où la solution générale de l'équation (*) :

$$N = \exp \int_0^l \alpha'(E') dl$$

Pour mieux décrire la multiplication électronique dans les zones du champ faible, où l'attachement ne peut pas être négligé, on est amené à écrire l'équation (*) comme suite :

$$N = \exp \int_0^l (\alpha' - \eta') dl$$

Où $\eta' = \eta / P$ désigne le coefficient d'attachement réduit.

La formation d'une avalanche est impossible lorsque l'attachement équilibre la production de nouveaux électrons, c'est-à-dire ($\alpha' - \eta' = 0$). C'est le cas dans l'air, à des valeurs du champ électrique inférieures à 26 kV/cm à la pression atmosphérique.

I.6.3. Critère de Townsend [1] [2]

Le critère de Townsend s'interprète en considérant qu'un électron produit dans l'avalanche e^{ad} ions. Ces derniers, en bombardant la cathode, vont produire γe^{ad} électrons. Le deuxième coefficient noté γ , représente le nombre moyen d'électrons produits à la cathode par un ion positif incident. Ainsi la décharge autonome apparaît d'après Townsend quand le critère suivant est rempli :

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

Où d est la distance inter électrodes.

Si α est très grand, on aura $e^{ad} \gg 1$; alors on néglige 1 devant e^{ad} ; le critère de Townsend devient alors :

$$\gamma e^{ad} = 1$$

La théorie de Townsend ne tient pas compte de la charge d'espace due à la différence de mobilité des électrons et des ions. Cette charge d'espace provoque une distorsion importante du champ électrique, particulièrement pour les pressions supérieures ou égales à la pression atmosphérique.

La densité du courant de décharge croît avec la pression ; la faible mobilité des ions positifs crée alors une concentration de la charge d'espace qui modifie le champ appliqué initialement. On peut alors réécrire le critère de Townsend sous une forme plus générale :

$$g \left[\exp \left(\int_0^d (a dx) - 1 \right) \right] = 1$$

I.6.4. Limite de la théorie de Townsend [1] [2]

La théorie de Townsend a été remise en cause par Meek, Loeb et Raether, lors de la mesure du temps de claquage qu'ils ont effectuée, concernant le mécanisme proposé par Townsend, lorsque les valeurs du produit pression distance sont supérieures à 200 torr.cm.

En effet, quel que soit les valeurs plausibles du coefficient d'émission secondaire γ , la théorie de Townsend semble incapable d'expliquer des temps de formation aussi brefs que ceux observés pour les étincelles à haute tension. C'est pour combler cette anomalie que la théorie des streamers a été proposée.

I.7. Théorie du streamer [1] [2]

La vitesse des électrons étant environ 100 fois supérieure à celle des ions, l'avalanche conduit à la formation d'une structure à deux régions ; une région vers l'anode à forte densité d'électrons, et une autre vers la cathode à forte densité d'ions positifs. Si ces densités sont importantes, le mécanisme de streamer se déclenche.

Le champ électrique est fortement perturbé par les charges d'espaces ; en direction de la cathode, le champ est augmenté par les ions positifs. Dans cette région de nombreux électrons sont créés par la photo-ionisation, et de nouvelles avalanches secondaires se développent en direction de la principale. Les électrons de ces avalanches viennent neutraliser la charge d'espace positive.

De l'endroit où naissent les avalanches secondaires, de nouvelles têtes de charges d'espace positives apparaissent augmentant le champ électrique en aval. Le déclenchement de nouvelles avalanches est encore favorisé vers la cathode.

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

I.7.1. Critère de Meek

L'avalanche peut se transformer en streamer si le champ de charge d'espace E_c des ions positifs est sensiblement égal au champ appliqué E_g .

$$E_c = K.E_g \quad K \approx 1$$

Ceci est vérifié pour des valeurs de Pd de l'ordre de 10000 torr.cm.

I.7.2. Critère de Raether

L'avalanche peut se transformer en streamer si le nombre de charges de l'avalanche principale atteint 10^8 à 10^{10} électrons. Critère énoncé pour une pression atmosphérique.

I.8. Conclusion

Malgré les avancées qui sont faites ces dernières années, le phénomène de décharge électrique dans les gaz reste assez complexe, à cause de nombreux facteurs tels que la pression du gaz, la longueur et la forme des électrodes, le type de tension appliquée et le milieu ambiant.

Chapitre II

Décharge électrique de surface

II.1. Introduction

Depuis le début du siècle, le phénomène de la décharge superficielle revêt un grand intérêt du point de vue scientifique, car les décharges superficielles sont très nuisibles aux systèmes d'isolation haute tension.

Le système d'isolation le plus exposé aux dangers d'apparition des décharges glissantes est l'isolateur de traversée. Un tel système est constitué de deux électrodes, l'une de faible et l'autre de grande dimension. Ces électrodes sont séparées par un système d'isolation composé gaz / solide.

Pour y remédier, plusieurs recherches ont été menées en utilisant la méthode optique de Lichtenberg. Cette méthode a pour avantage d'enregistrer le développement de la décharge à la surface de l'isolant.

II.2. Définition [3]

La décharge électrique de surface désigne une décharge qui se produit en contact avec la surface d'un diélectrique solide placé dans un gaz ou un liquide isolant, lorsque la composante tangentielle du champ électrique appliqué est élevée. Le courant de ces décharges est un courant de déplacement qui résulte de la variation du champ électrique ($I_d = \frac{dE}{dt}$). C'est pour cette raison qu'en tension continue, le risque de voir se produire des décharges glissantes est minime du fait que $I_d = 0$. Dans ce cas, leur apparition est due au courant de conduction.

II.3. Processus de décharge de surface dans l'isolant solide [3]

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.

- Ø Les décharges à barrière diélectrique (Fig.II.1) où les isolants gazeux et solides sont généralement en série entre les deux électrodes. La décharge électrique se développe d'abord dans le volume du gaz, puis se propage sur la surface du solide isolant.

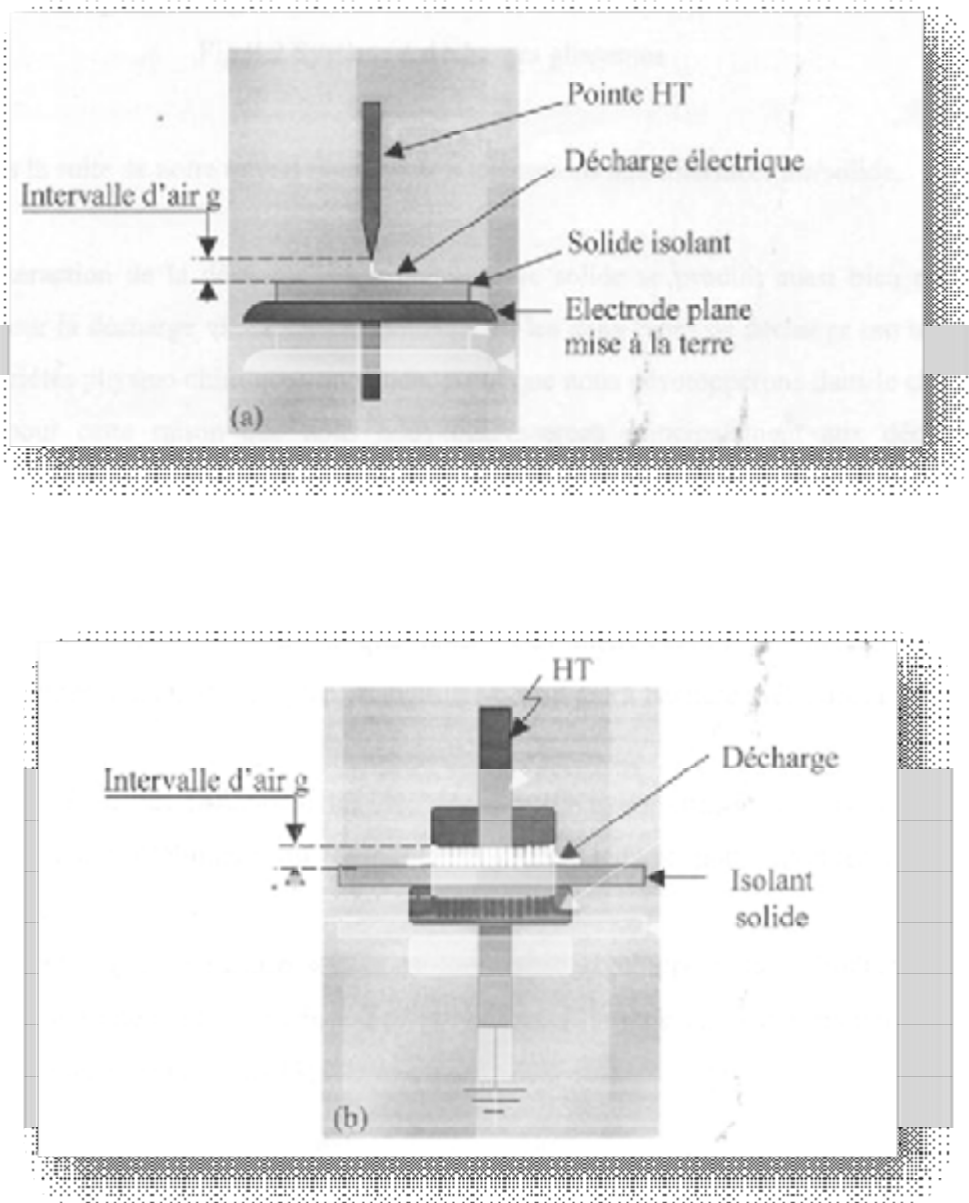


Fig.II.1. Décharge à barrière diélectrique [3]

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

Ø Les décharges glissantes (Fig.II.2) où les deux électrodes sont toujours en contact avec la surface du diélectrique solide. La décharge électrique prend naissance et se développe dans le gaz en restant en contact avec la surface de l'isolant solide sur laquelle elle se propage.

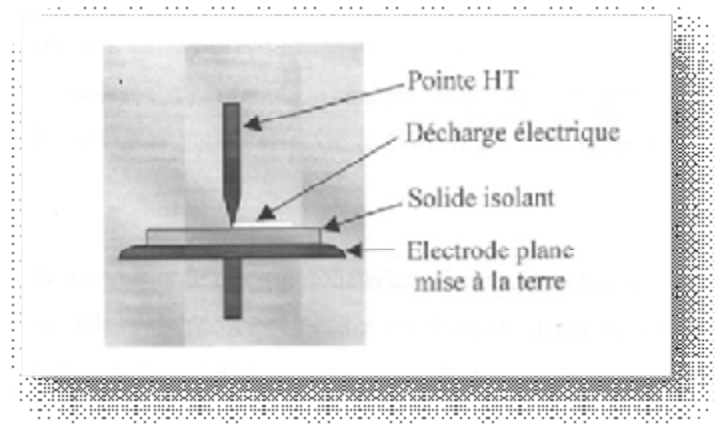


Fig.II.2. Système à décharges glissantes [3]

II.4. Lois de Toepler [4]

C'est en 1906, que le physicien allemand Toepler a mis au point des lois empiriques qui régissent le développement radial des décharges glissantes.

Il utilisera pour faire son étude, un système pointe métallique-plan isolant. C'est avec cette configuration qu'il a pu mettre en évidence l'existence de deux catégories distinctes d'étincelles, et ceci en faisant varier très rapidement la tension appliquée sur la pointe

$$\frac{dV}{dt} \text{ f } 10^8 \text{ kV/s.}$$

Il appela les étincelles de la première catégorie gerbes polaires. Elles sont matérialisées par leur luminosité diffuse, à symétrie circulaire autour du pôle que constitue l'électrode pointue. Des rayons divisent les tracent circulaires en secteur lorsque la polarité est négative ; En polarité positive, L'aspect des gerbes polaires est moins ordonné et la structure lumineuse est formée par une multitude de filaments indéfiniment ramifiés. C'est en analysant ces gerbes polaires qu'il a remarqué que leur extension radiale – le rayon (r) de la gerbe polaire- est proportionnelle à la tension impulsionnelle V appliquée à l'électrode. C'est aussi qu'il nous donne sa première loi :

- o En polarité positive : $\frac{V}{r} = 5.5 \text{ kV/cm.}$
- o En polarité négative $\frac{V}{r} = 11.5 \text{ kV/cm.}$

Comme on le voit, l'extension radiale de ces gerbes est indépendante du substrat diélectrique.

La deuxième catégorie d'étincelles, Toepler les appela gerbes glissantes qui apparaissent lorsque la tension appliquée sur l'électrode pointe dépasse un seuil critique V_s qui est fonction de l'épaisseur et de la permittivité diélectrique de la plaque isolante. La symétrie circulaire des gerbes polaires est alors rompue et des canaux d'étincelles apparaissent accompagnant la propagation des gerbes polaires.

La valeur absolue de la tension critique V_s est fonction de la capacité surfacique du matériau diélectrique et suit une loi de la forme :

$$\epsilon_0 \epsilon_r V_s^2 / e = \text{cste} \quad (2^{\text{ème}} \text{ loi de Toepler}).$$

Où

e : épaisseur de l'isolant solide [cm].

ϵ_0 : permittivité du vide [A.s/V.cm].

ϵ_r : permittivité relative.

II.5. Figure de Lichtenberg [5] [6]

Depuis 1777, quand Lichtenberg a trouvé une nouvelle méthode d'enregistrement du phénomène de la décharge superficielle se produisant à la surface des matériaux isolant, le mécanisme des streamers dans les gaz a été l'objet de plusieurs recherches.

Cette méthode est connue sous le nom «technique des figures de Lichtenberg» ou «technique dust figure». Elle consiste à saupoudrer une plaque isolante placée sur une électrode mise à la terre, d'une poudre composée d'un mélange d'oxyde de plomb rouge (PB_3O_4) et de soufre jaune pâle ; l'autre électrode qui est une pointe, mise sous tension, est ajustée de sorte que la pointe touche la plaque isolante au centre, ce système est appelé klydonographe (Fig.II.3).

L'électrode haute tension est soumise à des impulsions de tension, la distribution de la couleur de la poudre autour de la pointe diffère avec la polarité de la décharge appliquée. En effet, pour une décharge positive, la couleur autour de la pointe, est rouge qui correspond à la couleur du mélange d'oxyde de plomb, elle est jaune dans le cas d'une décharge négative, qui correspond à la couleur du soufre. Grâce à cette technique, on peut connaître la polarité ainsi que les événements lumineux associés au développement de la décharge.

L'avantage de la technique des figures de Lichtenberg 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.

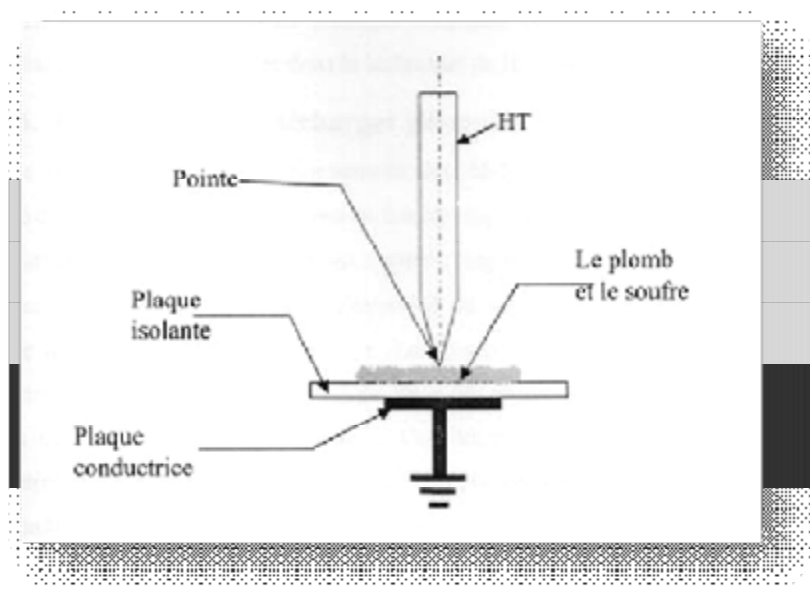


Fig.II.3. Le klydonographe [4]

II.6. Travaux de Mooroka [4]

Depuis 1967, Mooroka et ses coéquipiers ont étudié le phénomène de la décharge superficielle en utilisant la 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 20kV, une pression de gaz de 50, 100, 150... 760mm.Hg. De plus la plaque isolante est placée sur 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.

II.7. Processus de propagation des décharges glissantes [7]

La propagation et le développement des décharges glissantes diffèrent selon la polarité de l'électrode active et le type de la 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 charge par effet couronne sont concentrés à la surface de l'isolant 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 :

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

II.7.1. Décharges glissantes positives [7]

Les décharges glissantes positives peuvent se propager suivant deux processus différents. C'est ainsi, que pour des distances inter-électrodes allant de 0.4 à 1cm le processus de propagation est appelé processus C ; et pour des distances inter-électrodes supérieures à 2,5cm il est appelé processus A.

II.7.1.1. Processus A

L'application d'une tension égale à V_{50} (tension pour laquelle la probabilité d'avoir un certain nombre de streamers positifs filamenteux est de 50%) à un système d'électrode, engendre la formation des streamers positifs primaires (SPP) qui seront suivis de streamers positives secondaires (SPS) qui se développent le long des canaux des SPP, entretenant la luminosité de ces derniers. D'autre SPP se forment, qui seront suivis d'autre SPS et se développent tout en évitant les canaux des streamers précédents.

Ces canaux vont fusionner pour former le leader positif, qui va se développer et générer des streamers filamenteux intermittents appelés leaders corona. Après la formation de ces derniers, à partir de l'extrémité du leader positif, une onde lumineuse se propage vers l'anode augmentant ainsi la conductivité du canal. Quand les leaders corona atteignent la

cathode, le leader positif croit rapidement pour atteindre lui aussi la cathode, d'où la formation de l'arc.

II.7.1.2. Processus C

Après l'application d'une tension égale à V_{50} , des SPP apparaissent à partir de l'électrode active qui seront suivis par des SPS. Puis, les SPP vont s'allonger en perdant de leurs luminosités jusqu'à ce qu'ils prennent la forme de points lumineux qui se dirigent vers la cathode. Lorsqu'ils l'atteindront, une lueur sera alors visible pendant une période relativement longue, tandis que les canaux des SPS maintiennent leur luminosité jusqu'à ce que la tension atteigne sa valeur de crête. Dès que cette dernière est atteinte, la luminosité des SPS diminue du côté de l'anode. Ce qui va engendrer le raccourcissement du canal lumineux en direction de la cathode. Pendant que des SPS se développent radialement, d'autre donnent l'impression de former une bague lumineuse augmentant de diamètre.

Après que certain SPS atteignent la cathode, leurs extrémités se trouvant du côté de l'anode se développent en arrière de celle-ci. Ce phénomène est dû aux électrons émis par la cathode, ceux-ci se déplacent le long des streamers augmentant le degré d'ionisation des canaux des streamers secondaires. Lorsque la cathode et l'anode sont reliées, il y a formation d'arc.

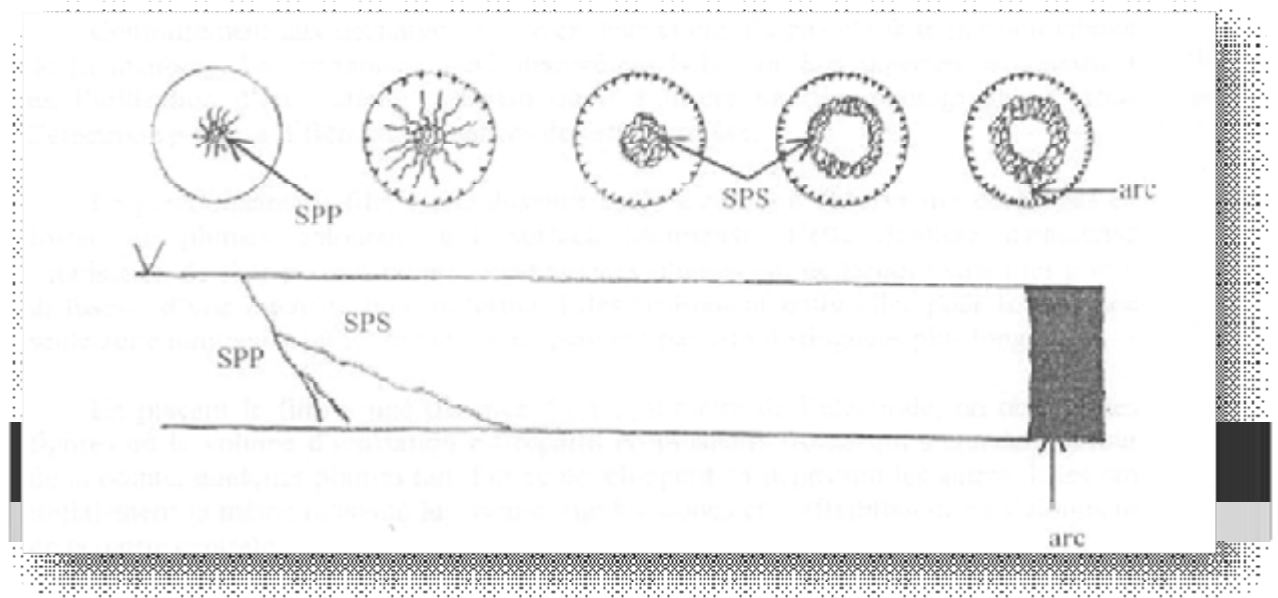


Fig.II.4. Décharge superficielle positive selon le processus C [7]

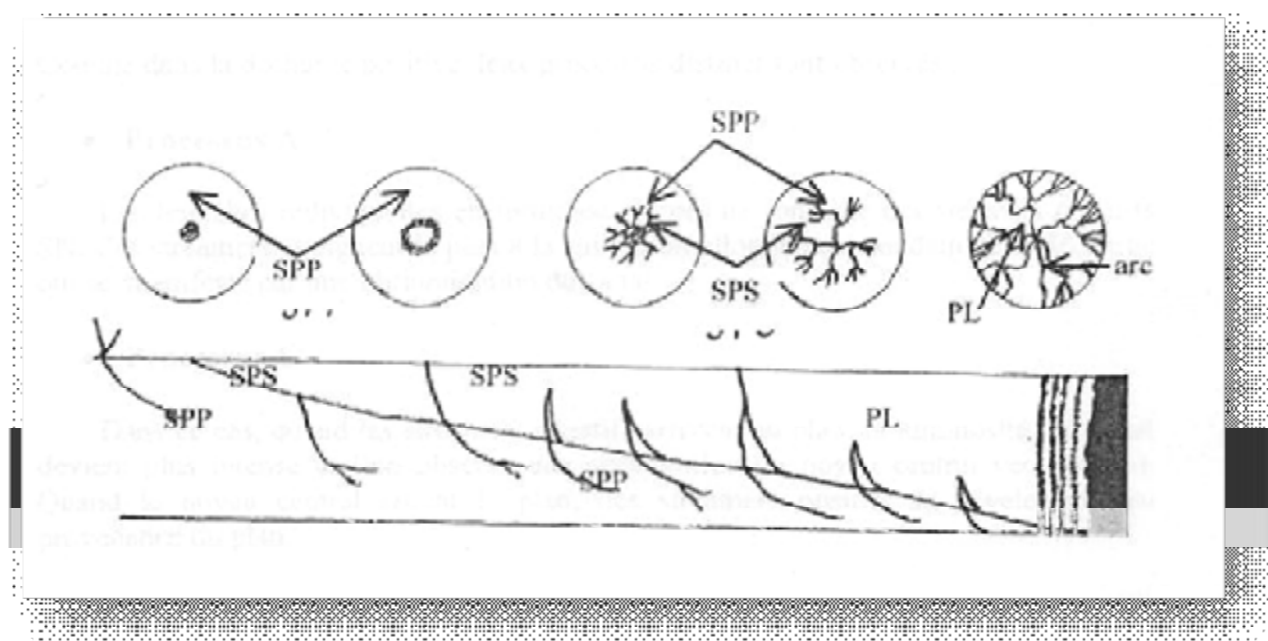


Fig.II.5. Décharge superficielle positive selon le processus A [7]

II.7.2. Décharges glissantes négatives [8]

Contrairement aux décharges positives, leur étude n'a pas été faite par la méthode de Lichtenberg. Le phénomène a été observé par N. Essam. Ses expériences consistent en l'utilisation d'un système tige-plan où il a inséré un film photographique sous l'électrode pointe à différentes distances de cette dernière.

En positionnant le film à une distance égale à zéro, on observe des décharges en forme de plumes entourant une surface lumineuse. Cette dernière caractérise l'ionisation de l'air pour la pointe négative. Ces plumes ont de larges extrémités plutôt diffuses, d'une intensité non uniforme. Elles fusionnent entre elles pour former une seule zone lumineuse où les branches ne peuvent pas être distinguées plus longtemps.

En plaçant le film à une distance d'un centimètre de l'électrode, on obtient des figures où le volume d'ionisation est réparti en plusieurs troncs qui s'étendent autour de la pointe, quelque plumes ramifiées se développent en dépassant les autres. Elles ont initialement la même intensité lumineuse que les troncs et s'affaiblissent en s'éloignant de la partie centrale.

En augmentant la distance de placement du film de fines plumes sont observées. Elles diminuent considérablement en nombre et longueur. Cependant, les troncs deviennent plus vagues et s'étendent sur une large surface, plus loin ils se rattrapent et leur nombre diminue pour ne former qu'une masse lumineuse autour de l'électrode.

Comme dans la décharge positive deux processus distinct sont observés :

II.7.2.1. Processus A

Les branches individuelles en forme de plumes ne sont que des streamers négatifs SN. Ces streamers atteignent le plan à la suite d'un allongement soudain de la décharge qui se manifeste par une réillumination du canal.

II.7.2.2. Processus C

Dans ce cas, quand les streamers négatifs arrivent au plan, la luminosité du canal devient plus intense et l'on observe une accélération du noyau central vers le plan. Quand le noyau central atteint le plan, des streamers positifs se développent en provenance du plan.

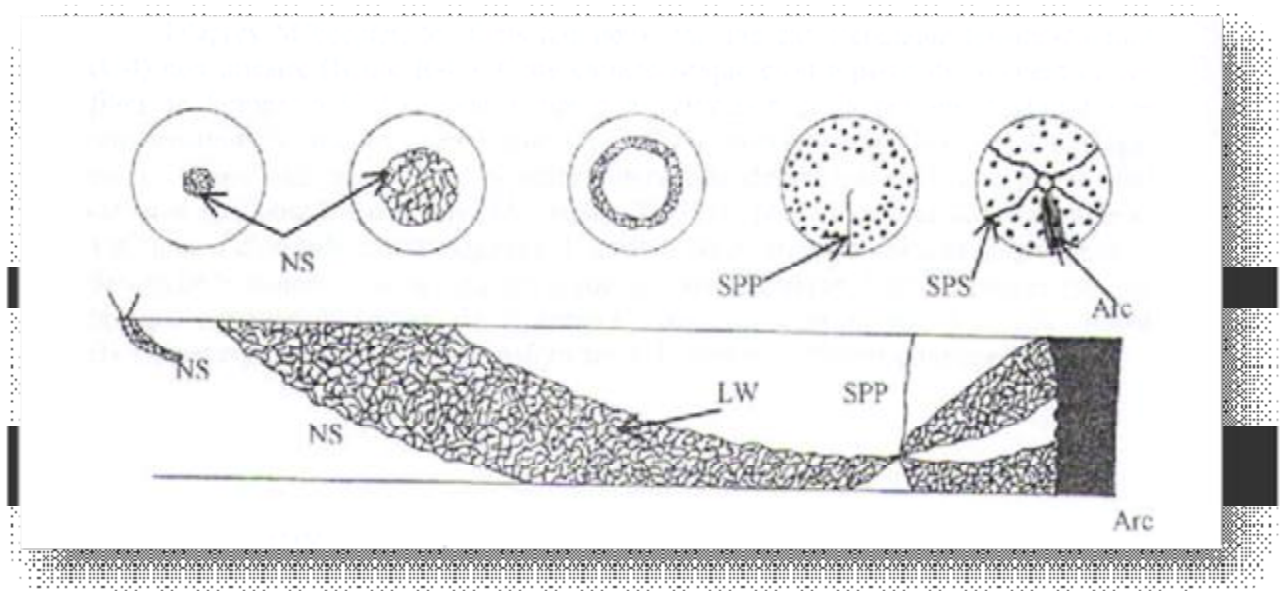


Fig.II.6. Décharge superficielle négative selon le processus C [8]

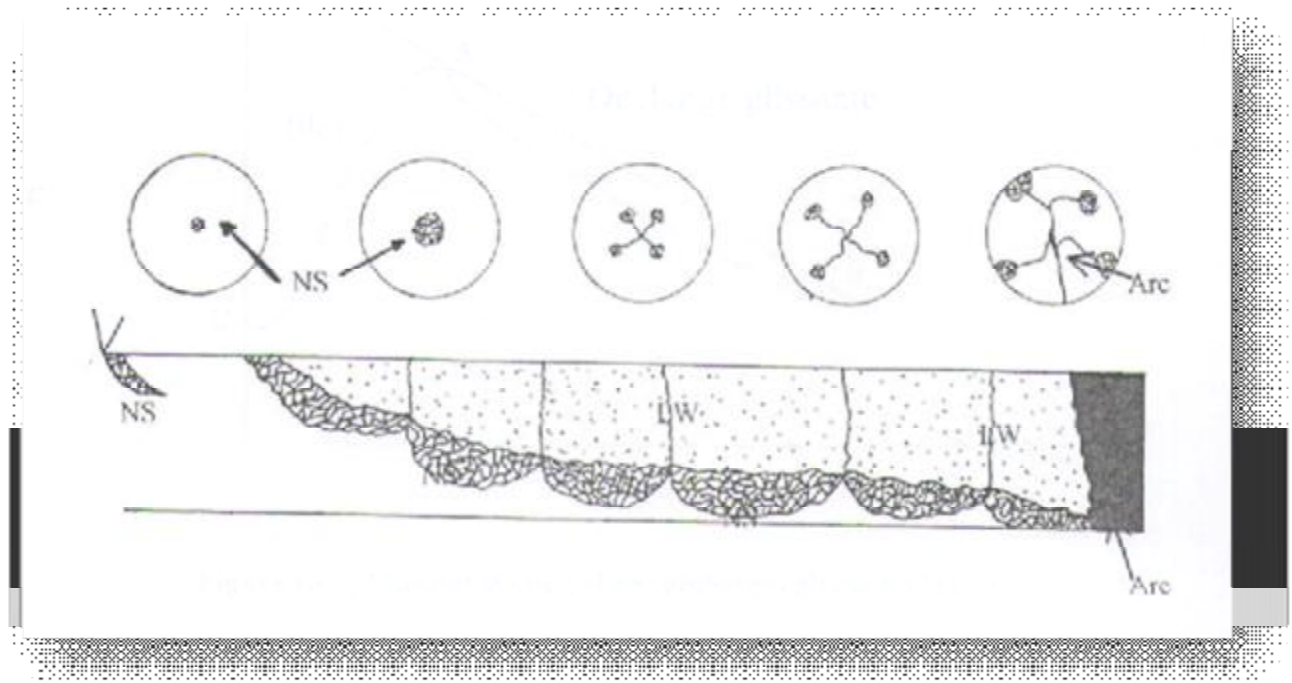


Fig.II.7. Décharge superficielle négative selon le processus A [8]

II.8. Similarité de la décharge glissante avec la décharge de foudre [4]

En étudiant les décharges glissantes, on remarque qu'on peut les considérer comme un modèle réduit bidirectionnel du phénomène atmosphérique car leur propagation visuelle est similaire à celle de la foudre, mais ce n'est pas en ce seul aspect optique que les similitudes entre les deux phénomènes existent. En effet, les deux décharges se propagent sur de longues distances sous l'effet d'un champ électrique faible vis-à-vis du champ disruptif. Ajouter à cela, la transition de la décharge lumineuse d'arc est réalisée par étape ou par bond, et aussi l'ordre de grandeur des courants et des vitesses de propagation est la même ($I=50A$; $V=10^6m/s$), ainsi que le processus de propagation est identique dans le cas des deux décharges.

II.9. Paramètres influent sur les décharges de surface

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

II.9.1. La résistivité superficielle [7] [9] [10]

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

Pour définir ce paramètre, on est amené à définir la résistance superficielle. En effet, la résistance superficielle (R_s) mesurée entre les deux électrodes est le rapport de la tension continue appliquée par le courant qui parcourt la mince couche de l'humidité qui pourrait exister à la surface de l'isolant, et dans les couches superficielles de ce dernier.

D'où la définition de la résistivité d'un matériau isolant comme étant une résistance superficielle par unité de surface, elle s'exprime en $\Omega \cdot \text{cm}$.

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

Où :

R_s : Résistance superficielle [Ω]

S : Section de l'électrode [cm^2]

d : Distance inter électrode [cm]

A.Kawshim et S.Holt ont montré que la tension d'apparition de la première décharge glissante dépend surtout de la résistance superficielle de l'isolant solide.

La figure (II.8) montre la variation de la tension d'apparition de la décharge glissante en fonction de la résistance superficielle pour sept types de matériaux (Bakélite, verre, Epoxyde, téflon, Acrylique, caoutchouc, polyéthylène).

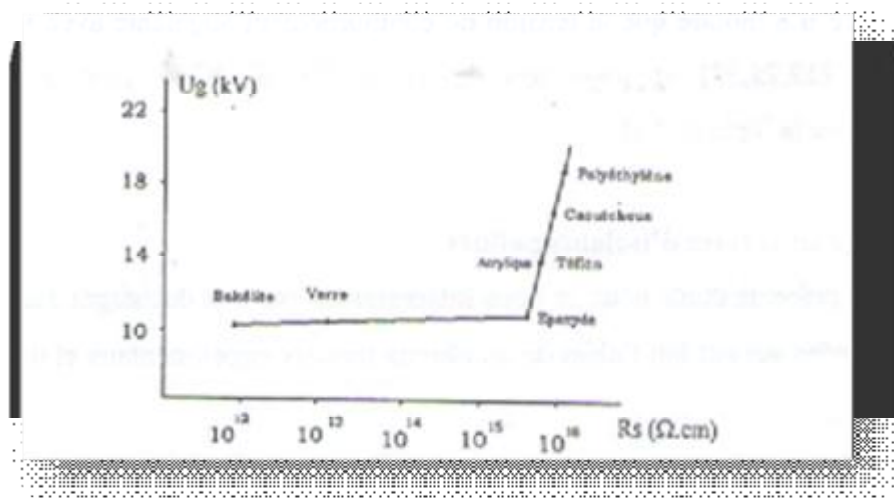


Fig.II.8. Tension d'apparition de décharge glissante en fonction de la résistance de la surface (Échantillon d'épaisseur $e = 1$ mm)

II.9.2. La permittivité relative [5] [11]

La permittivité relative caractérise les propriétés macroscopiques du matériau ; lorsqu'un diélectrique est soumis à l'action du champ électrique, il se produit à l'échelle moléculaire diverses modifications, qui ont pour effet de créer un champ électrique extérieur comme dans le cas d'un milieu conducteur.

D'après la deuxième loi de Toepler, il existe une relation entre l'épaisseur et la permittivité du diélectrique de la plaque isolante. Lorsque la tension appliquée sur l'électrode pointe dépasse un certain seuil (V'_s), celle-ci est en fonction de la capacité surfacique du matériau diélectrique qui suit une loi de forme :

$$\epsilon_0 \epsilon_r V_s^2 / e = \text{cste}$$

Pour les étincelles en polarité négative, se propageant sur une surface de plexiglas et une surface de verre, en tenant compte de leurs permittivités relatives respectivement ($\epsilon_r = 3$, $\epsilon_r = 6$), la deuxième loi de Toepler s'écrit :

- o Pour le plexiglas : $V'_s \text{ (kV)} = 69 \sqrt{e}$ e en cm
- o Pour le verre : $V'_s \text{ (kV)} = 48.5 \sqrt{e}$ e en cm

La figure ci-dessous montre comment la permittivité du matériau peut influencer sur la tension d'apparition des impulsions de courant de préclaquage.

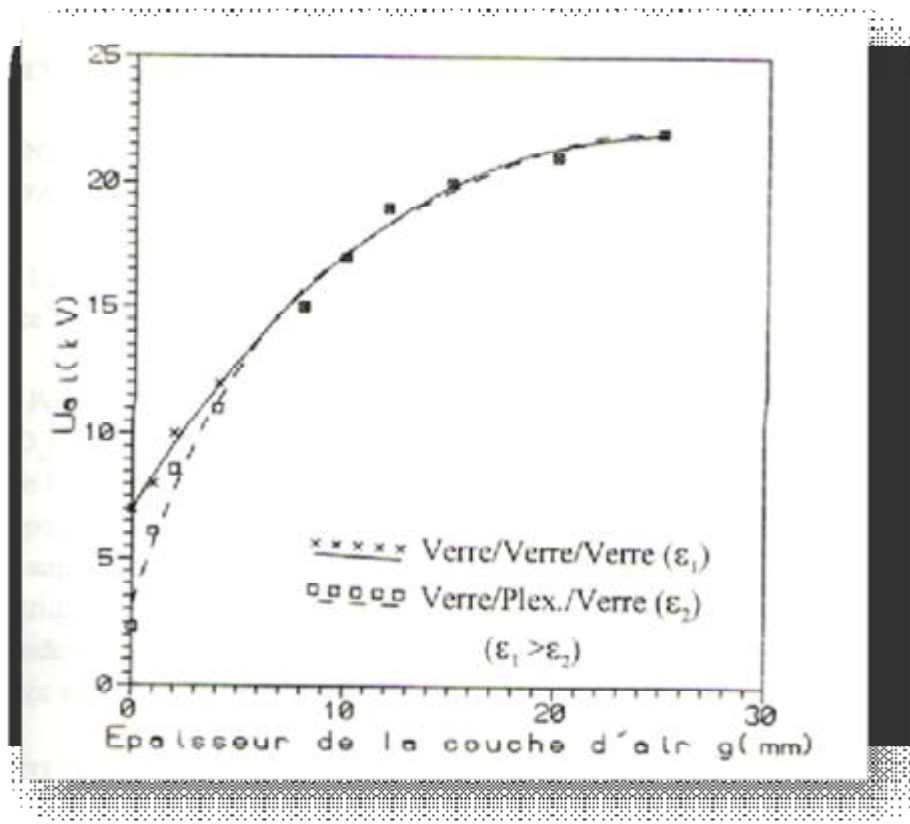


Fig.II.9. Influence de la permittivité sur la tension d'apparition des impulsions de courant de préclaquage [11]

II.9.3. Paramètres géométriques

II.9.3.1. L'état de surface de l'isolant solide [12]

Certains traitements de surface, quoiqu'ils n'améliorent pas leurs performances, augmentent leur résistance à la détérioration, il est donc nécessaire de nettoyer les surfaces des isolants avant chaque manipulation pour éviter les débris et les impuretés superficielles ou toute autre pollution.

II.9.3.2. Le diamètre de l'électrode haute tension [11]

La figure (II.10) montre la variation de la tension d'apparition de la décharge superficielle et la tension de claquage en fonction de diamètre de l'électrode haute tension.

On remarque que la tension augmente avec l'augmentation du diamètre, cette augmentation est due à la diminution de la concentration du champ avec le diamètre de l'électrode active.

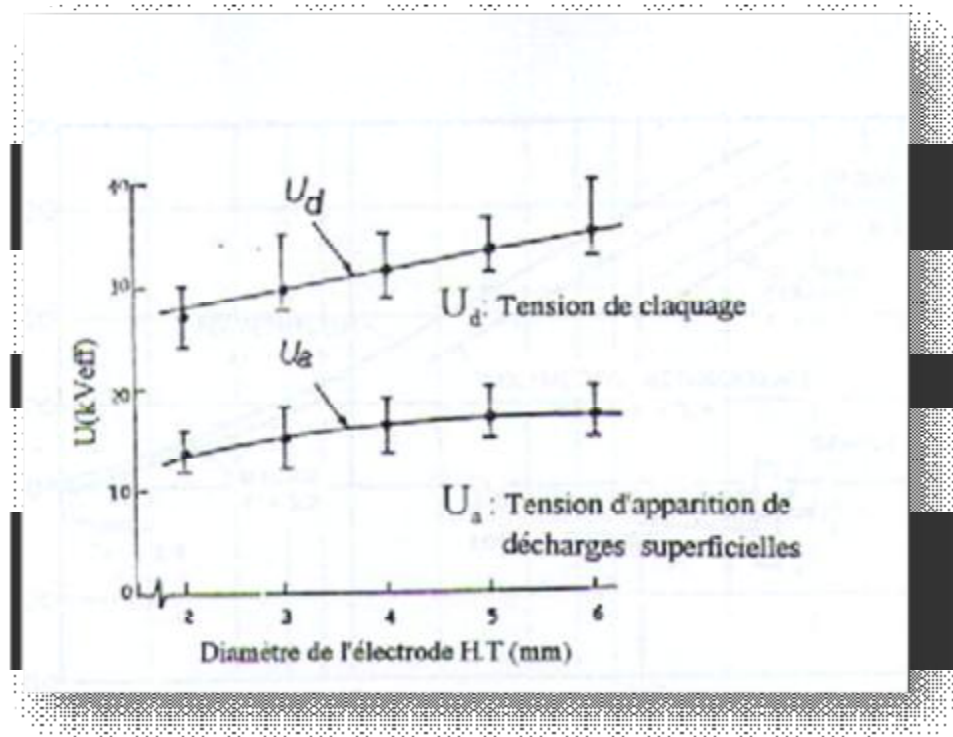


Fig.II.10. L'influence du diamètre de l'électrode HT sur la rigidité diélectrique du système solide/air [11]

II.9.3.3. L'épaisseur de l'isolant [11] [13]

L'épaisseur d'un isolant influe sur la rigidité diélectrique d'un système, cette influence varie selon la nature de la tension appliquée et de la nature du matériau (permittivité).

On constate que la tension de seuil augmente avec l'épaisseur quelque soit la nature du matériau et la distance inter électrodes.

En général, la rigidité des systèmes composés solide/air s'exprime en fonction de l'épaisseur efficace (e/ϵ_r), et cela, d'après Dakin, Grzybowski et Kuffel, Taher et Eish, celle-ci augmente avec l'épaisseur de l'isolant solide, quelque soit la nature de la tension appliquée et du matériau (figure II.11, II.12).

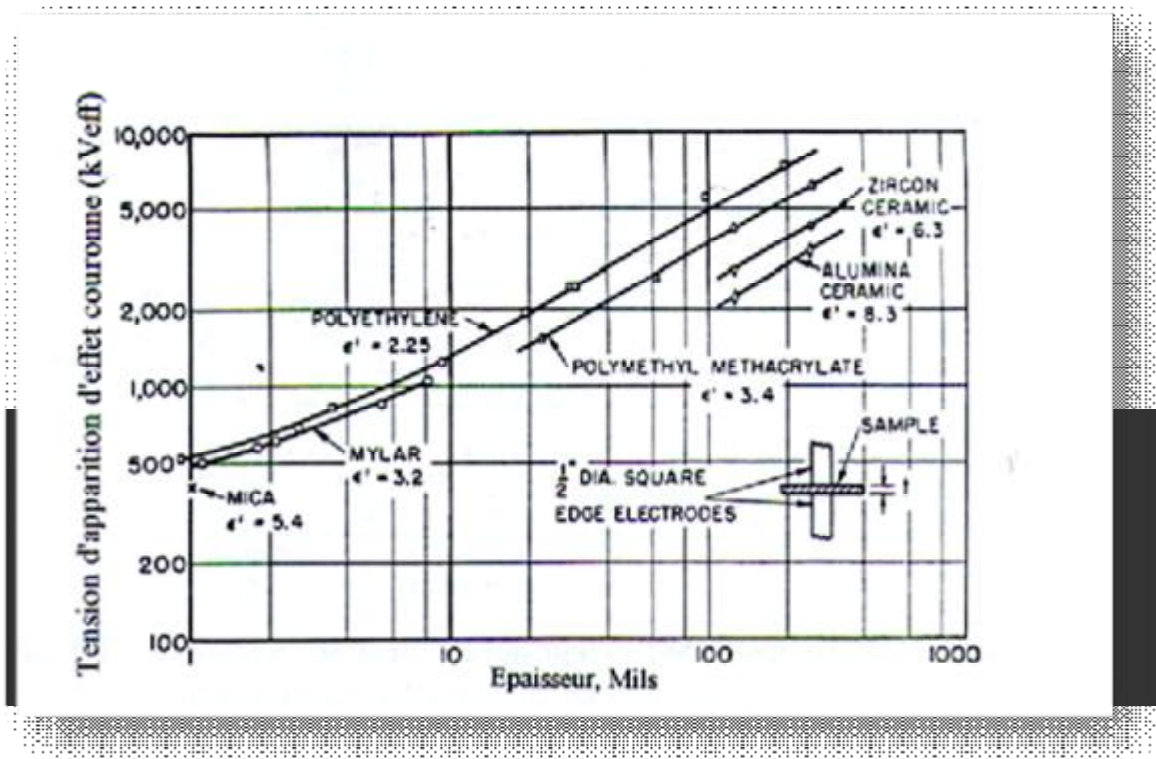


Fig.II.11. Tension d'apparition des décharges couronne en fonction de l'épaisseur pour différentes valeurs de la permittivité [11]

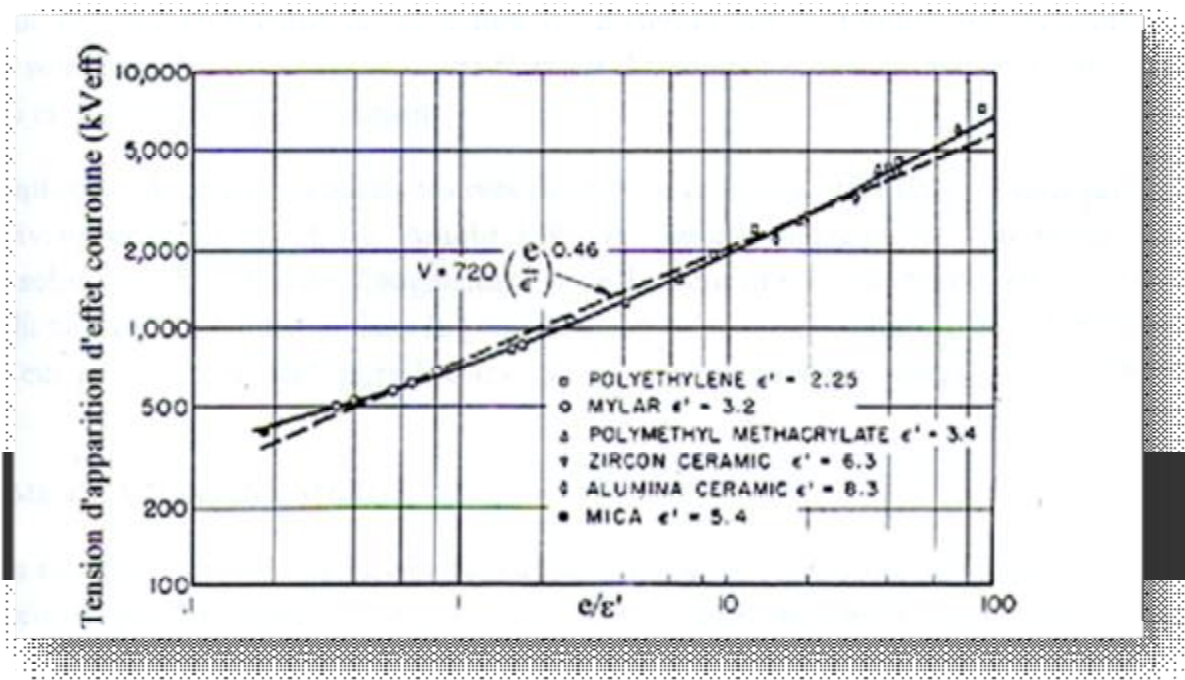


Fig.II.12. Tension d'apparition de décharge couronne en fonction de l'épaisseur efficace (e/ϵ_r)

[11]

II.9.3.4. Rayon de courbure de la pointe [6] [11]

D'après les deux figures (II.13) et (II.14), on peut constater que la rigidité diélectrique d'un intervalle d'air, avec et sans isolant solide est d'autant plus grande que le rayon de courbure de la pointe est grand. Ceci est dû au fait que le champ électrique, au niveau de la pointe, diminue avec l'augmentation du rayon de courbure de la pointe.

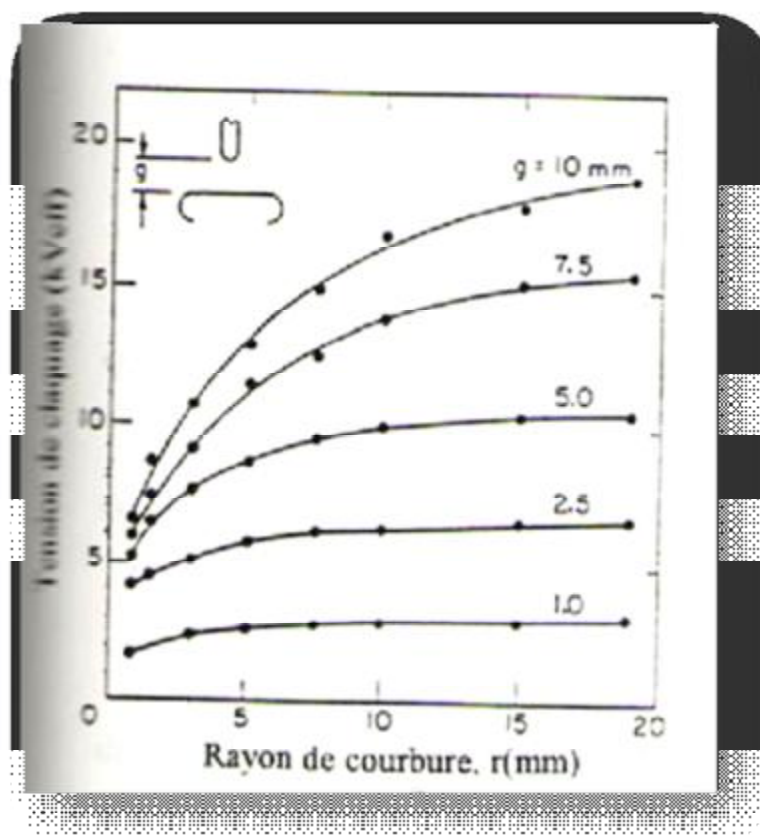


Fig.II.13. Influence du rayon de courbure de la pointe sur la rigidité diélectrique d'un intervalle d'air [11]

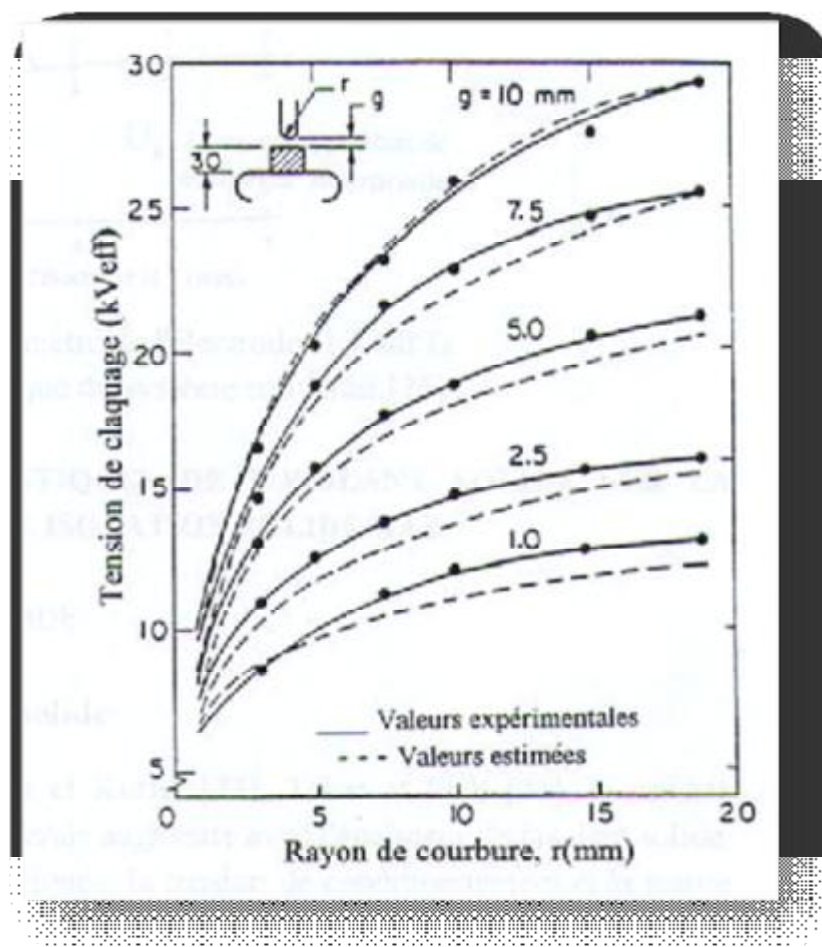


Fig.II.14. Influence du rayon de courbure de la pointe sur la rigidité diélectrique d'une isolation composée solide/air [11]

II.9.3.5. Influence de la forme de l'électrode [13]

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

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

En champ homogène dès son apparition, la décharge transite rapidement vers l'arc électrique autrement dit la décharge couronne n'existant pas et les tensions V_s et V_a sont confondues.

II.10. Conclusion

Nous avons présenté dans ce chapitre les décharges de surface et leurs développements ainsi que les paramètres influençant celles-ci, malgré le nombre limité des recherches consacrées à l'étude de ces décharges. Tout cela rend très difficile l'étude théorique de la plupart des phénomènes superficiels qui sont donc encore mal connus.

Chapitre III

Chapitre III

Description générale du polyméthacrylate de méthyle

III.1. Introduction

Lors d'une réaction chimique, dite de polymérisation, certaines molécules simples peuvent s'unir de façon à former une grosse molécule appelée polymère.

Les polymères sont largement utilisés dans les équipements électriques pour les avantages qu'ils présentent : esthétique, une rigidité diélectrique élevée, des faibles pertes diélectriques, un faible poids, un faible prix, une hydrophobicité élevée et bonnes propriétés mécaniques.

Dans ce chapitre, nous nous intéresserons à la présentation des propriétés principales des polymères, et à la description du polyméthacrylate de méthyle.

III.2. Définition [14]

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 appelées unités 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.

III.3. Polymérisation [15]

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

III.3.1. Polyaddition [15]

La polyaddition se fait par assemblage des monomères sans formation d'un produit de réaction.

III.3.2. Polycondensation [15]

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

III.4. Propriétés diélectriques des polymères

III.4.1. Résistivité superficielle – Résistivité transversale [16]

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

$$\rho_s = R_s P/g$$

$$P = \pi (d_1 + g)$$

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.

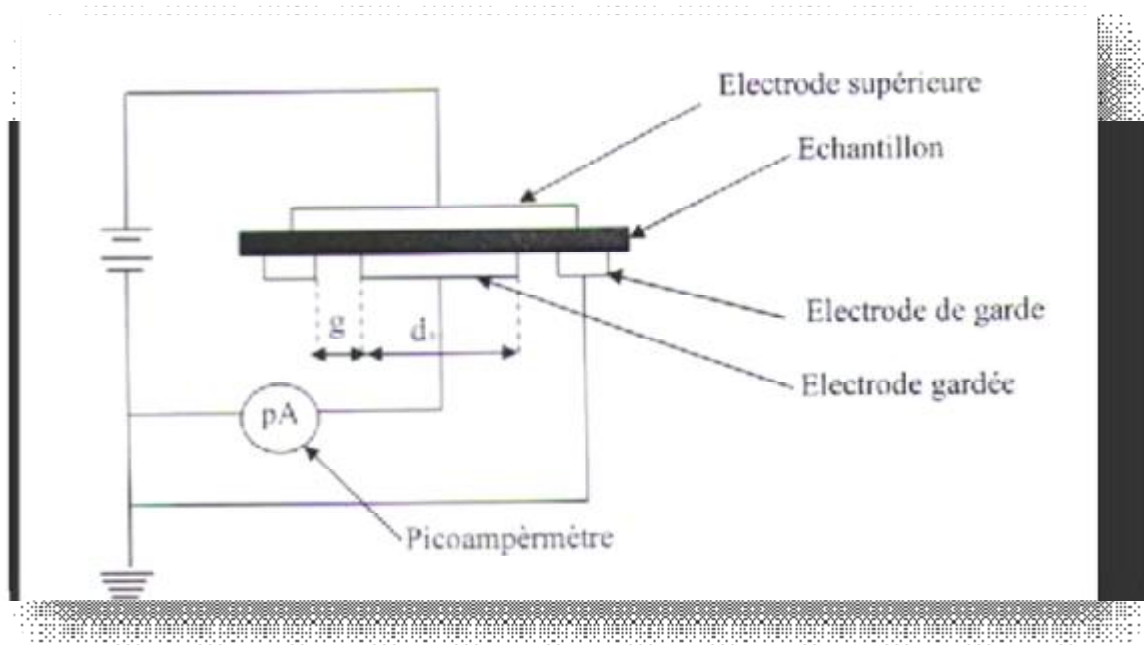


Fig.III.1. Circuit de mesure de la résistivité superficielle et de la résistivité transversale [16]

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

$$\rho_t = R_t S/e$$

$$S = \frac{(d_1 + g)^2}{4}$$

Avec :

d_1 : diamètre de l'électrode gardée,

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

e : épaisseur de l'échantillon.

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

III.4.1.1. Influence de la température [16]

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

$$\rho = \rho_0 \exp E_A / KT$$

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 donnée par la pente de la droite $\ln \rho = f(1/T)$.

III.4.1.2. Influence de l'humidité [16]

L'humidité a une grande influence sur la résistivité des polymères. Pour la résistivité transversale, il s'agit 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.

III.4.1.3. Influence du champ électrique appliqué [16]

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.

III.4.1.4. Influence de la nature des électrodes [16]

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.

III.4.2. Rigidité diélectrique [16]

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 $E = V/d$

V : tension maximum appliquée,

d : épaisseur d'isolant.

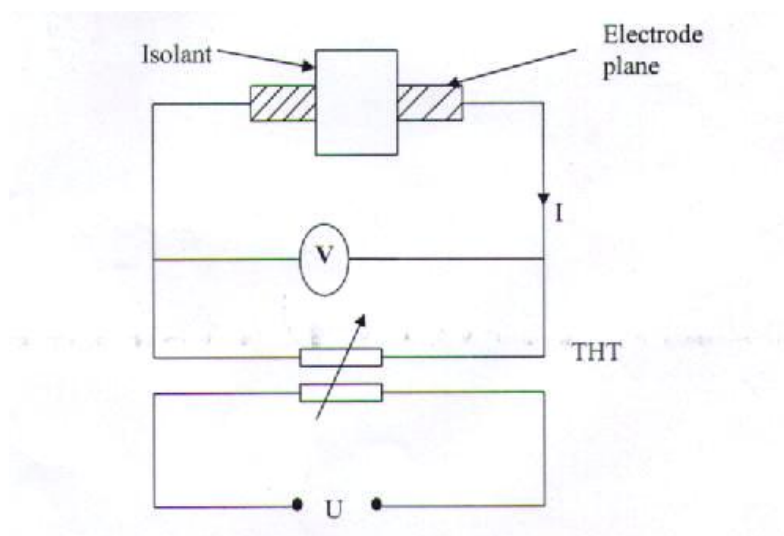


Fig.III.2. Principe de mesure de rigidité [16]

Des divers paramètres influent sur la rigidité diélectrique.

III.4.2.1. Influence de la tension appliquée [16]

La rigidité diélectrique est influencée par la tension appliquée selon sa forme d'onde et sa fréquence.

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.

III.4.2.2. Influence de l'épaisseur de l'éprouvette [16]

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.

III.4.2.3. Influence de la température [16]

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.

III.4.2.4. Influence du milieu ambiant [16]

Les caractéristiques électriques et thermiques du milieu ambiant interviennent par le biais des décharges superficielles qui peuvent se produire 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.

III.4.3. Permittivité [16]

La constante diélectrique ou la permittivité 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.

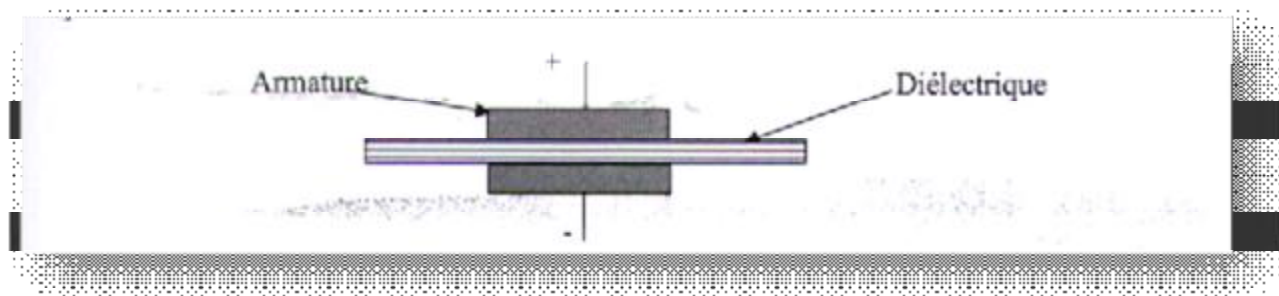


Fig.III.3. Principe de mesure de la permittivité [16]

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 : $C/C_0 = \epsilon_r$. La permittivité n'est influencée par aucun facteur extérieur qu'il soit physique ou chimique.

III.4.4. Pertes diélectriques [17]

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.

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 $\tan \delta$.

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

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

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

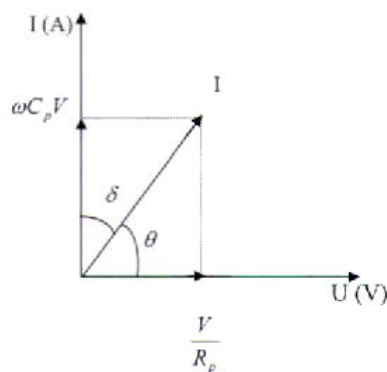


Fig.III.4. Schéma permettant le calcul de $\tan \delta$ [17]

$$I_p = V/R_p$$

$$I_c = \omega C_p V$$

III.5. Description général du polyméthacrylate de méthyle [18] [19]

Poly Methyl Meth Acrylate souvent abrégé en PMMA, a été inventé par BRADEL à la fin du XVIII^e siècle. C'est un thermoplastique amorphe dont le monomère est le méthacrylate de méthyle (MAM), il est transparent et sans couleur, dur et rigide mais fragile et sensible à l'entaillage, il a une bonne résistance à l'abrasion et aux ultra-violets et une excellente transparence optique mais une résistance médiocre aux basses températures et aux solvants. Bien que combustible, la quantité de fumée qu'il émet est faible.

Ce polymère est plus connu sous son nom commercial de plexiglas mais aussi sous les noms de plastique acrylique, perspex, limacryl, vitroflex, altuglas, diakon, lucite, oroglas...

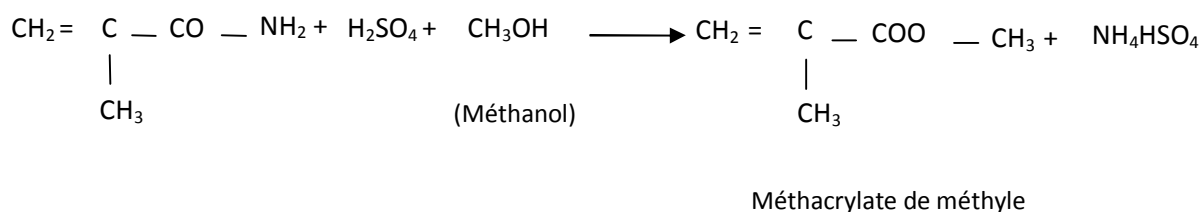
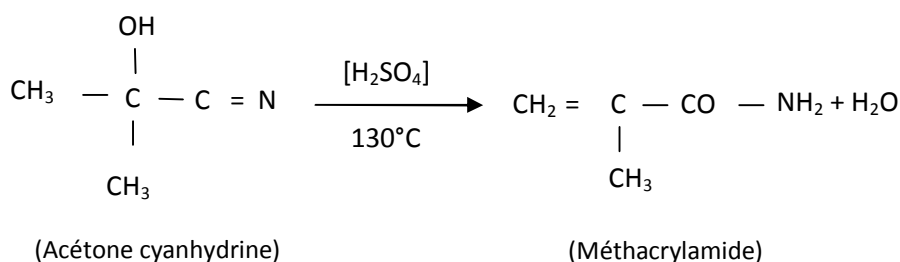
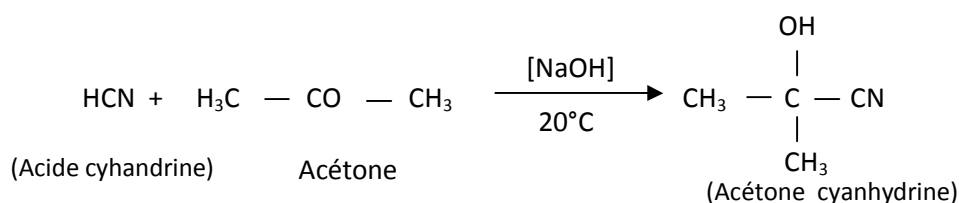
III.6. Procédé de fabrication

Le polyméthacrylate de méthyle est le produit de polymérisation du méthacrylate de méthyle.

III.6.1. Principe de production du monomère [20]

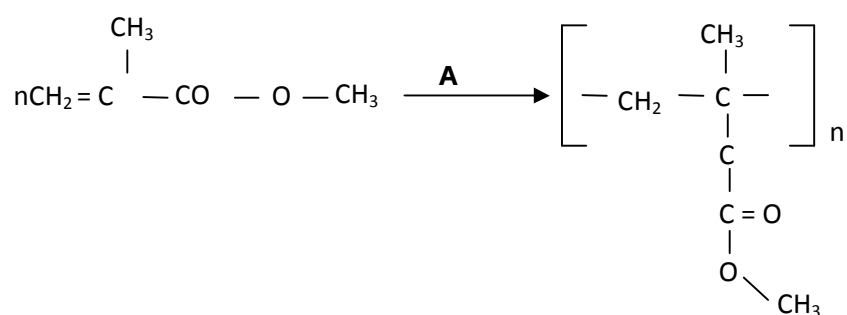
Le méthacrylate de méthyle, ou MAM, est un liquide à la température ordinaire, qui bout au voisinage de 100°C. C'est un produit peut toxique, les vapeurs peuvent être irritantes pour les yeux et les voies respiratoires, et tout contact avec la peau doit être évité.

Le principe du procédé de production de MAM repose sur les réactions suivantes :

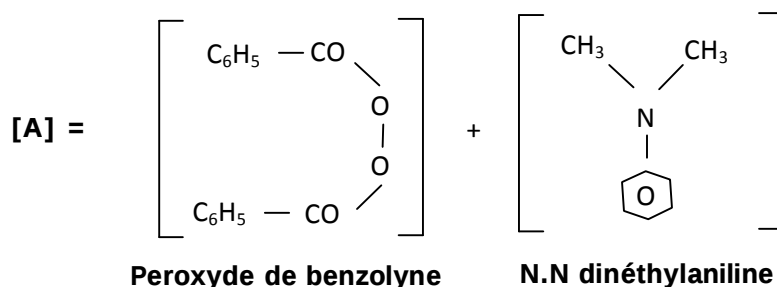


III.6.2. Production du polyméthacrylate de méthyle [20]

Le méthacrylate de méthyle sert essentiellement à produire le polyméthacrylate de méthyle (PMMA), la réaction de polymérisation est une polymérisation radicalaire amorcée par radicaux libres formés dans le milieu à partir de composés tels que peroxyde de benzoyle dont la décomposition peut être accélérée par la présence de certains réducteurs tels que le N, N dinéthylaniline. On a donc :



(Polyméthacrylate de méthyle)



III.7. Propriétés du polyméthacrylate de méthyle

III.7.1. Propriétés physiques [14] [19] [20]

- ▼ Le PMMA est surtout connu pour ces excellentes propriétés optiques. Ce polymère amorphe est d'une transparence remarquable dans le visible (92% de transmission lumineuse).
- ▼ L'absorption de lumière n'atteint que 50% pour une épaisseur de 3 mm (grande résistance aux U.V à la différence du verre).

- ▼ Il se colore facilement y compris dans les teintes fumées pour vitrage ; Il est brillant et lisse.
- ▼ L'angle de réflexion totale sur une surface intérieure est de : 41° à 42° ce qui permet la réalisation de fibres optiques.
- ▼ Le PMMA est hygroscopique : l'absorption d'eau en 24 h atteint 0,25%
- ▼ Le PMMA ne se brise pas, il a d'excellentes résistances aux agents atmosphériques et chocs.
- ▼ Peut être facilement formé en le chauffant à 100°C .
- ▼ Le plexiglas est léger, sa densité est de :
 - 1,195 à 0°C .
 - 1,190 à 20°C .
 - 1,188 à 25°C .

III.7.2. Propriétés mécaniques [14] [19] [21]

- ▼ Le PMMA est rigide à la température ambiante, dur et cassant avec un faible allongement à la rupture en traction de 4 à 10 %.
- ▼ Le PMMA se raye et se polit facilement, et s'entaille sensiblement ; les entretiens répétés peuvent altérer la qualité de surface.
- ▼ Son fluage est assez limité et présente une contraintes de rupture à la flexion de 9 à 12 daN/mm².
- ▼ Son module d'élasticité en traction est de 3140 N/mm².
- ▼ Excellente tenue aux ultra-violets d'où une grande résistance au vieillissement.
- ▼ Excellente usinabilité : le PMMA accepte les traitements mécaniques à froid et à chaud.
- ▼ La résistance aux chocs est relativement faible et le polymère est cassant.
- ▼ Son module de flexion est de 2.28 à 3.32 GPa.
- ▼ Sa contrainte de rupture en flexion 84 à 110 MPa.

III.7.3. Propriétés électriques [22] [23]

- ▼ Excellente résistance à l'arc électrique.
- ▼ Il est électrostatique, ce qui peut nuire à sa présentation (attraction de poussière) d'où on ajoute des produits antistatiques qui migrent en surface et le recouvre d'une couche conductrice.
- ▼ Sa rigidité diélectrique est de 5 à 20 kV/mm.

- ▼ Sa résistivité superficielle est de 10^{15} à 10^{16} Ω .cm.
- ▼ Sa résistivité transversale est de 10^{15} à 10^{16} Ω .cm.
- ▼ Constante diélectrique à 10^3 Hz : 2,9.
- ▼ Permittivité relative à 50 Hz : 3,3 à 3,9.
- ▼ Le facteur de dissipation diélectrique ($\tan \delta$) à 50 Hz : 0,04 à 0,05.

III.7.4. Propriétés thermiques [14] [21]

- ▼ Le plexiglas est combustible et brûle lentement sans fumée excessive.
- ▼ La température de fusion est de 210 à 240 $^{\circ}\text{C}$.
- ▼ La température d'utilisation en continue est 85 $^{\circ}\text{C}$.
- ▼ La température de déformation sous charge 1,85 N/mm² est de 105 $^{\circ}\text{C}$.
- ▼ La température de transition vitreuse est 110 à 135 $^{\circ}\text{C}$.
- ▼ La conductivité thermique : 0,18W/ $^{\circ}\text{C}$.
- ▼ La température maximale d'utilisation est faible < 80 $^{\circ}\text{C}$.
- ▼ le coefficient de dilatation thermique linéaire est faible et vaut $6.8 \cdot 10^{-5}$ mm/ $^{\circ}\text{C}$.

III.7.5. Propriétés chimiques [14] [19] [24]

- ▼ Le PMMA est sans odeur.
- ▼ Il est inchangé par les acides organiques, les minéraux dilués ainsi que les solutions alcalines dilués.
- ▼ Il est attaqué par les produits courants comme : l'acétone, l'alcool, l'alcool éthylique, le chlore liquide, le phénol, l'ammoniaque liquide, l'eau oxygénée à plus de 40 %, l'essence térébenthine, les hydrocarbures et le méthanol à 3 %.
- ▼ Le PMMA peut être exposé à l'extérieur sans problème.
- ▼ Le PMMA se met à feu à 460 $^{\circ}\text{C}$, il brûle complètement à l'anhydride carbonique et à l'eau.
- ▼ Pour produire 1Kg de plexiglas, il faut environ 2Kg de pétrole, en présence de l'air.

III.7.6. Propriétés optiques [14] [24]

- ▼ L'angle de réflexion totale sur une surface intérieure est de 41 à 42 $^{\circ}$, ce qui permet la réalisation de conducteurs de lumière, fibres optiques.
- ▼ Son indice de réfraction est de 1,491 ce qui en fait un matériau adapté à la fabrication optique.
- ▼ La transparence : 92 % de lumière transmise pour une épaisseur de 3 mm.

III.7.7. Propriétés acoustiques [24]

- ▼ La vitesse de propagation du son dans le PMMA est : $2.85 \cdot 10^5$ cm/s.

III.7.8. Autre propriétés [14] [24]

Le PMMA présente d'autres propriétés liées aux conditions pratiques :

- ▼ Le soudage : se limite au soudage haute fréquence, gaz chaud.
- ▼ Le collage : s'effectue soit avec des solvants (solvants chlorés, chloroforme), soit avec des colles dissoutes dans des solvants, soit avec des colles polymérisables.
- ▼ L'exposition prolongée du PMMA à l'humidité ou même l'immersion totale dans l'eau, n'affecte pas de manière significative les propriétés mécaniques et optiques.

III.8. 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 (MAM) celui-ci peut alors être réutilisé pour une nouvelle polymérisation.

III.9. Domaines d'utilisation [19] [24]

Le PMMA est utilisé dans de multiples domaines :

- ▼ Les applications industrielles : cadrans, 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.
- ▼ 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.
- ▼ Chirurgies cosmétiques pour réduire de manière permanente des rides.
- ▼ Objectifs intraoculaires de recharge dans l'œil : verre de contact, lentilles.
- ▼ L'aéronautique : utilisé dans les verrières, hublots, capots d'avions.

III.10. Avantages et inconvénients de plexiglas

III.10.1. Avantages [14]

Les avantages de plexiglas sont :

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

III.10.2. Inconvénients [14]

Les inconvénients de plexiglas sont :

- ▼ Cassant, fragile, rayable.
- ▼ Faible tenue en température limitée (80 °C).
- ▼ Résistance chimique très moyenne.
- ▼ Fendillements sous charge possible.
- ▼ Faible résistance aux hydrocarbures et aux solvants.
- ▼ Inflammabilité.
- ▼ Attraction de poussières.

III.11. Commercialisations [24]

Le PMMA se présente sous plusieurs formes commercialisées :

- ▼ La poudre dont la granulométrie est de l'ordre de 300µm.
- ▼ Le PMMA en granulés : issu de la polymérisation en suspension.

- ▼ Les plaques coulées : délivrée généralement en plaques d'épaisseur variant de 2 mm à 8 cm.
- ▼ Les plaques extrudées : qui se développent plus que celle des plaques coulées car elles sont moins chères.

III.12. Conclusion

Cette partie à été entièrement dédiée aux généralités sur les polymères, dans laquelle nous avons essayé de donner un aperçu sur les propriétés principales du polyméthacrylate de méthyle, que nous aurons à utiliser lors de nos expérimentations.

Chapitre IV

Essais et mesures

IV.1. Introduction

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

Nous nous intéresserons à l'étude de la décharge de surface. Nous décrirons d'abord le dispositif expérimental et les échantillons du PMMA que nous avons utilisés. Par la suite, nous présenterons les essais préliminaires que nous avons effectués afin de prendre nos précautions lors des essais expérimentaux.

IV.2. Montage expérimental

Le schéma de l'installation expérimentale utilisée dans cette étude est montré dans la figure IV.1. Une configuration pointe – plan est utilisée. L'électrode pointe a été relié à la haute tension et l'électrode plane à la masse via une résistance de mesure R , dont la valeur est de $940\ \Omega$, est utilisée pour mesurer les courants de préclaquage.

Les décharges glissantes ont été obtenues en faisant varier la tension d'alimentation d'un transformateur d'essai monophasé 100 kV, 50 Hz, 10 kVA.

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

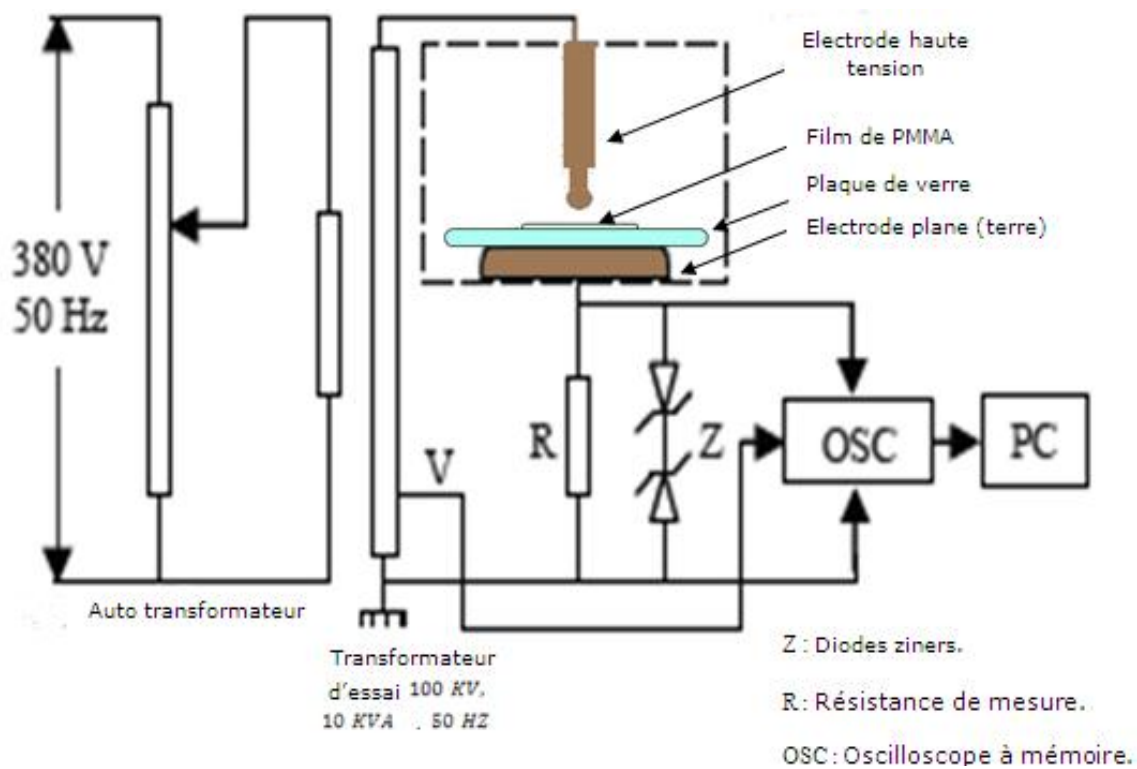


Fig.IV.1. Montage expérimental.

IV.3. Electrodes

Notre système d'électrodes se caractérise par :

- L'électrode plane en cuivre d'un diamètre égal à 5cm.
- L'électrode haute tension est une sphère en cuivre de diamètre égal à 1.44cm(Fig.IV.2).

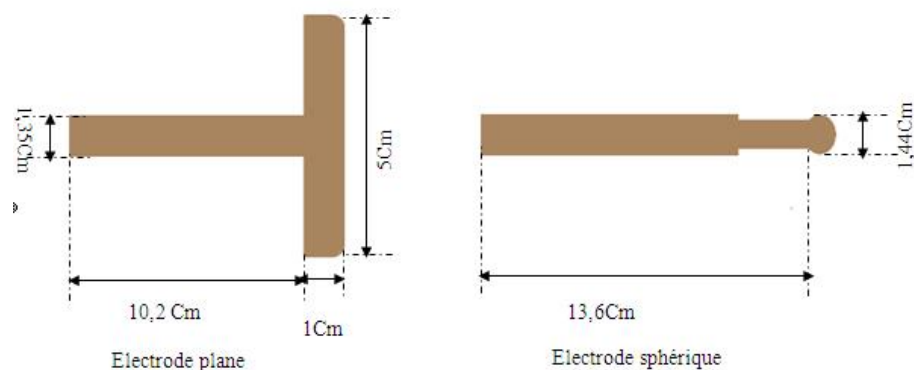


Fig.IV.2. Le système d'électrodes pointe-plan.



Fig.IV.3. Support des électrodes

IV.4. Echantillon utilisé

L'échantillon utilisé est un film en plexiglas d'une épaisseur de l'ordre de $20\mu\text{m}$. Afin de le préparer, nous avons dissout des petits morceaux de PMMA dans l'acétone ($\text{C}_3\text{H}_6\text{O}$), ensuite nous avons étalé la solution obtenue sur un disque en verre bien nettoyé auparavant. Après évaporation de l'acétone nous avons obtenu un film de PMMA d'une épaisseur de l'ordre de μm .

IV.5. Mesure du courant de préclaquage

Pour étudier le courant de décharge de surface, on a utilisé un oscilloscope numérique à mémoire, qui a été branché aux bornes de la résistance de mesure R . Du fait des faibles temps de montée des courants, sa bande passante a été choisie de sorte qu'il puisse enregistrer des signaux qui ont des temps de montée de l'ordre de quelques nanosecondes.

Son impédance d'entrée doit aussi être grande pour empêcher le courant de la traverser et ne pas fausser la mesure des courants. L'oscilloscope a été relié à un ordinateur pour pouvoir traiter les différents résultats obtenus.

IV.6. Protection de l'oscilloscope

Pour protéger l'oscilloscope contre d'éventuelles surtensions à l'entrée, nous avons placé en parallèle de la résistance de mesure des diodes zener qui court-circuiteront la résistance dès que la tension à ses bornes dépassera la tension admise.

IV.7. Essais préliminaires

Les essais préliminaires sont une nécessité pour la mise en œuvre des essais expérimentaux. Ils nous permettent de cerner le phénomène étudié et de se familiariser avec le matériel, ainsi que de déterminer la tension maximum à ne pas dépasser pour éviter tout contournement de l'isolant solide qui risquerait d'endommager l'oscilloscope et l'ordinateur.

Dans cette partie on effectuera plusieurs essais à savoir :

- Détermination de la tension de claquage du système d'électrodes.
- Système de protection de l'oscilloscope.

La détermination de la valeur de la tension de claquage est une nécessité qu'on prendra en considération lors de nos prochains essais, et cela afin de prendre une marge sécuritaire pour le matériel.

Lors des essais préliminaires, nous avons constaté la présence de parasites qui peuvent influencer les mesures, donc les fausser. Pour atténuer leur influence, à défaut de les éliminer complètement, nous avons couvert tous les appareils de mesure avec du papier aluminium que nous avons relié à la terre et torsadé les fils de connexion pour réduire la surface présentée aux champs perturbateurs.

Chapitre V

Interprétation des résultats

V.1. Introduction

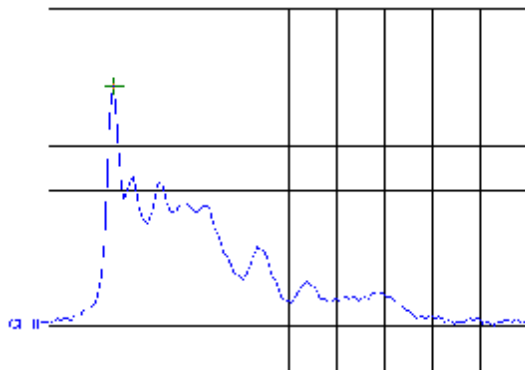
Les courants de décharge sont souvent responsables des défaillances et du vieillissement des isolations des systèmes électriques. Leur détection est difficile, elle nécessite un matériel sensible et précis qu'il faut manipuler avec une grande prudence.

Notre but est d'une part, de pouvoir détecter et mesurer ces courants avec les modestes moyens du laboratoire de haute tension, d'autre part, étudier l'influence de la tension appliquée, l'épaisseur de la couche d'air et le vieillissement sur le courant de décharge maximum.

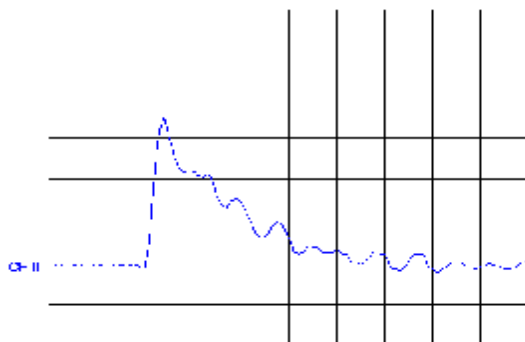
V.2. Formes des impulsions du courant de décharge

$T = 50\text{ns/div}$ $I = 106\text{ mA/div}$

Tension appliquée $U_a = 12\text{ kV}$



$U_a = 9\text{ kV}$ $I = 106\text{ mA /div}$



FigV.1. impulsion de courant positive

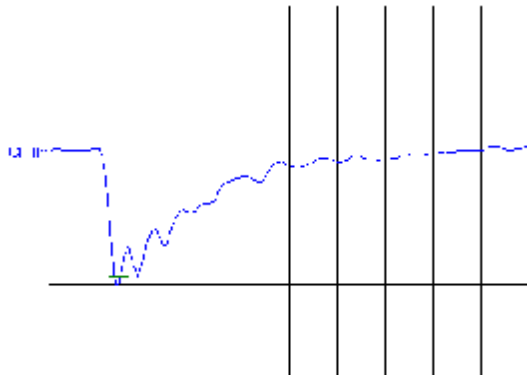
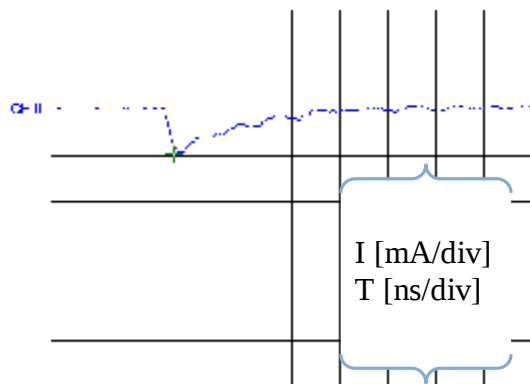
$U_a = 12 \text{ kV}$ $I = 106 \text{ mA/div}$  $U_a = 9 \text{ kV}$ $I = 106 \text{ mA/div}$ 

Fig.V.2. Impulsion de courant négative

Les figures V.1, V.2, montrent la forme des impulsions de courant positive et négative.

Les premières impulsions de courant de décharge devraient apparaître d'abord en alternance négative. Mais dans nos essais, nous n'avons pas pu voir ça, à cause de leur faible amplitude qui est brouillé par les oscillations parasites.

L'apparition des premières impulsions de courant de décharge sur l'alternance négative est due au fait que l'initiation du phénomène d'ionisation est plus facile en polarité négative qu'en polarité positive. En effet, la décharge en alternance positive nécessite une tension plus élevée pour arracher un électron d'un atome situé à une distance de la cathode.

Avec l'augmentation de la tension appliquée, on remarque que les impulsions apparaissent en alternance positive et négative, ces dernières augmentent de plus en plus en nombre et en amplitude. Ce qui indique que l'énergie des décharges augmente avec la tension.

Les caractéristiques des impulsions diffèrent d'une polarité à une autre ; les impulsions sont plus nombreuses en alternance négative, par contre leur amplitude est plus importante en alternance positive.

Pour une même tension, l'amplitude des impulsions positives est plus grande que celle des impulsions négatives.

Dans nos essais, nous avons remarqué qu'il n'est pas toujours aisé de repérer sur une impulsion, l'origine du temps de montée souvent brouillée par des oscillations parasites. De plus, la crête de l'onde était souvent déformée, l'instant où l'impulsion atteint le maximum ne peut pas être repéré avec précision.

On remarque que le temps de montée dans toutes les impulsions est toujours inférieur au temps de descente. Ceci peut être expliqué par le fait que le temps de montée des impulsions correspond à la mobilité des électrons qui est beaucoup plus grande que celle des ions positifs qui sont à l'origine du temps de descente.

Le temps de montée des impulsions positives est supérieur à celui des impulsions négatives.

V.3. Influence de la tension sur le courant maximum de décharge

La variation de l'amplitude du courant maximum de décharge de surface en fonction de la tension en polarité positive et négative est donnée par la figure V.3.

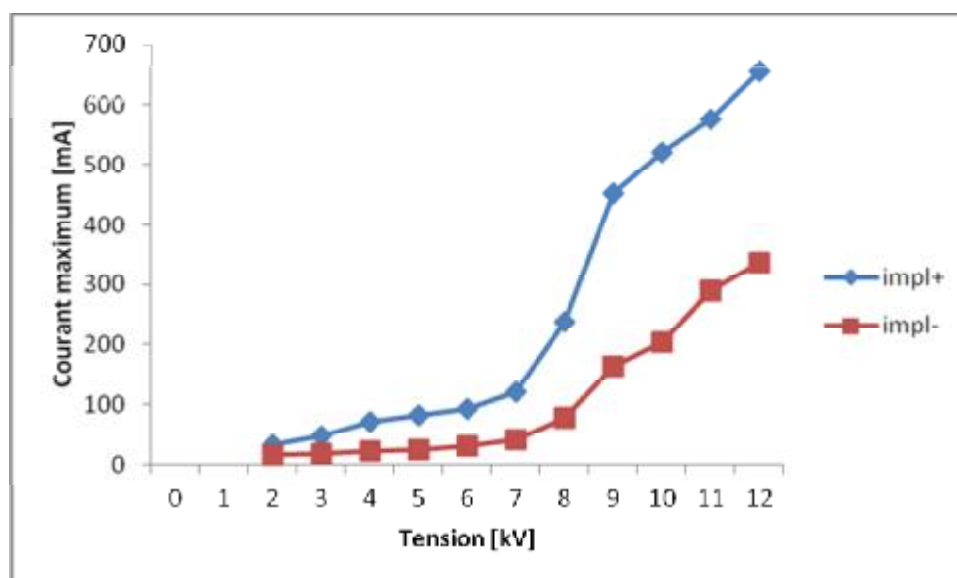


Fig.V.3. Courant maximum en fonction de la tension pour un film de PMMA avec un intervalle d'air de 3 mm

Nous constatons que l'amplitude du courant augmente avec la tension appliquée pour les deux polarités. Il croît légèrement avec la tension jusqu'à environ 7 kV. A partir de cette valeur, la croissance du courant devient plus prononcée.

L'amplitude des impulsions positives est 2 à 3 fois plus grande que celle des impulsions négatives.

V.4. Influence de l'intervalle d'air

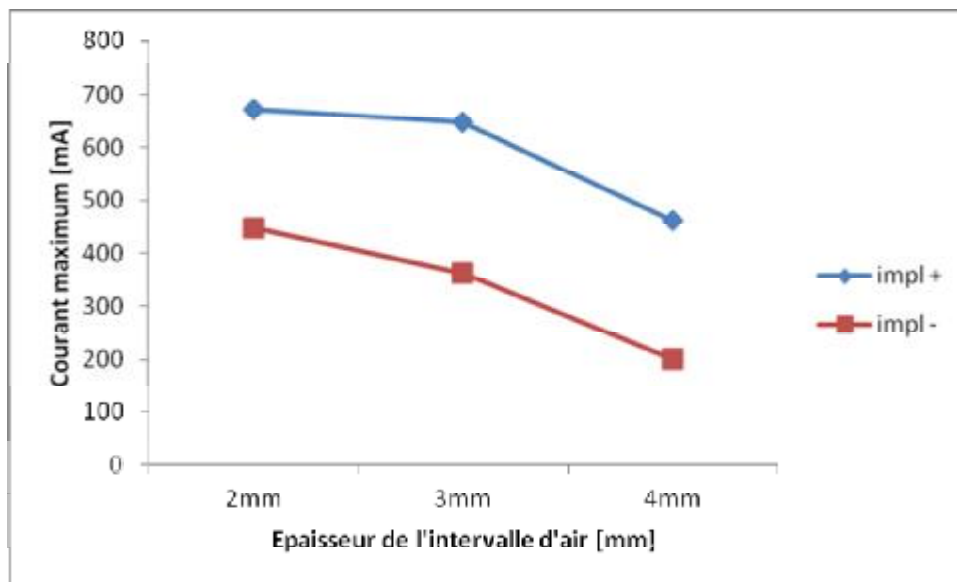


Fig.V.4. Courant maximum en fonction de l'épaisseur de la couche d'air pour une tension de 11 kV

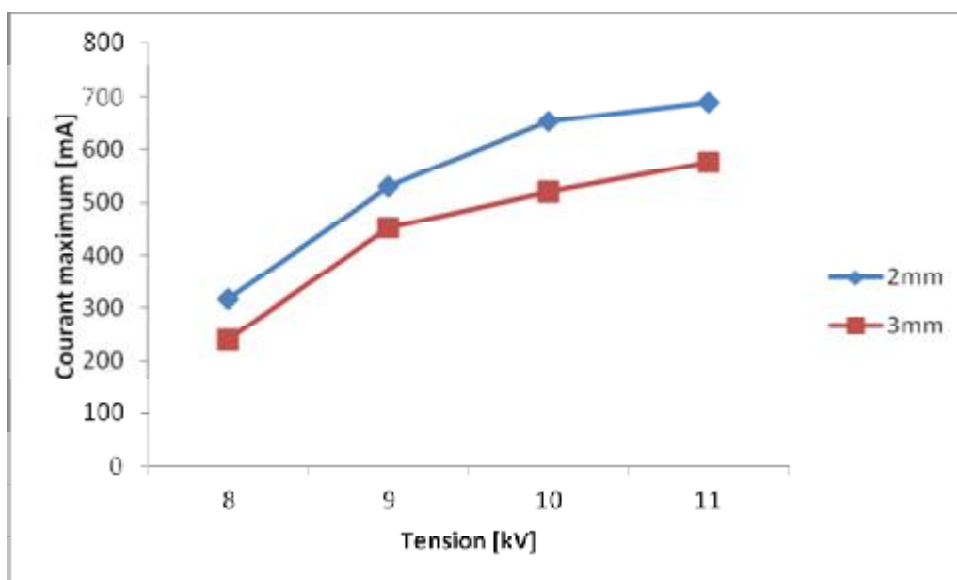


Fig.V.5. Influence de l'épaisseur de la couche d'air sur le courant maximum de décharge en alternance positive

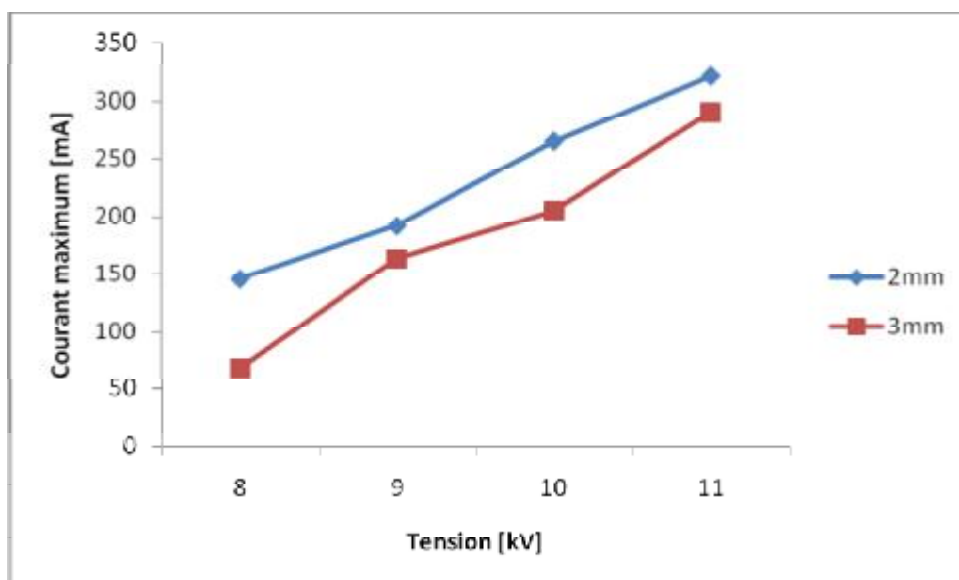


Fig.V.6. Influence de l'épaisseur de la couche d'air sur le courant maximum de décharge en alternance négative

La figure V.4 montre que le courant maximum diminue avec l'augmentation de l'épaisseur de l'intervalle d'air pour les deux polarités.

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

Comme on peut le voir sur les figures V.5 - V.6, le courant maximum des impulsions négatives et positives augmente avec la tension appliquée et diminue pour une même tension appliquée, quand l'intervalle d'air augmente.

L'augmentation du courant maximum avec la tension est dû au fait que l'augmentation de cette dernière favorise le phénomène d'ionisation. Par contre, sa diminution quand l'intervalle d'air augmente, est dû à l'impédance de l'espace qui augmente et du champ électrique qui diminue avec l'intervalle d'air, ce qui se traduit par la difficulté d'ionisation.

V.5. Influence du vieillissement

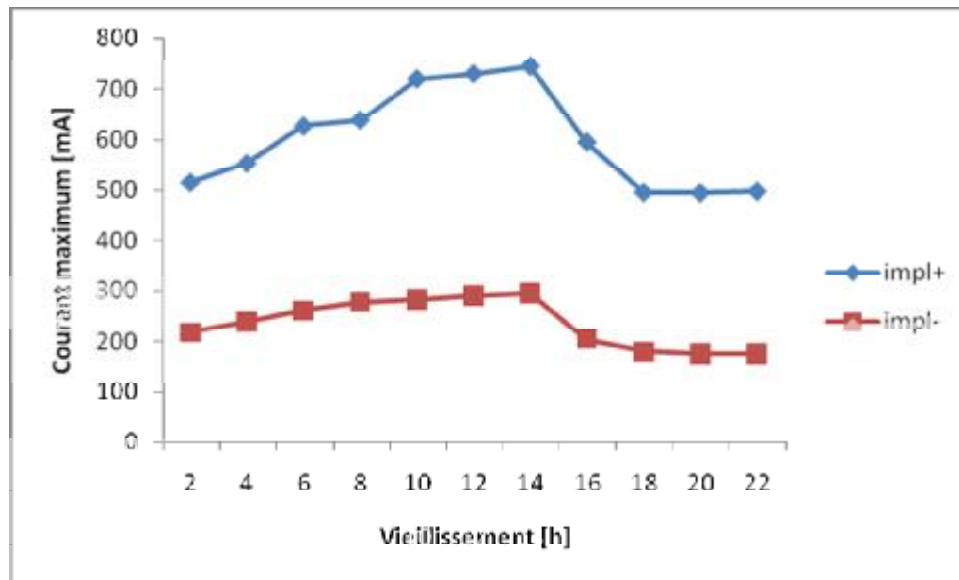


Fig.V.7. Influence du vieillissement sur le courant maximum

La figure V.7 montre l'influence du vieillissement sur le courant maximum en alternances positive et négative pour une tension de 12 kV et un intervalle d'air de 4 mm.

Nous constatons que l'amplitude du courant maximum augmente avec le vieillissement pour les deux polarités. Il croît avec le vieillissement jusqu'à environ 14 h, puis diminue légèrement jusqu'à 18 h. A partir de cette valeur il se stabilise.

Conclusion générale

Le travail que nous avons réalisé a porté sur l'étude des courants de décharge dans une isolation mixte solide/air.

Nous avons choisi d'étudier le courant de préclaquage parce qu'il constitue le facteur par lequel la décharge exerce une action de dégradation sur le solide isolant.

Les impulsions de courant associées aux décharges augmentent en nombre et en amplitude avec la tension. Leur nombre est plus important en alternance négative qu'en alternance positive. Cependant leur amplitude est plus grande en polarité positive.

Les temps de montée et de descente des impulsions positives sont plus grand que ceux des impulsions négatives.

Nous avons montré que le courant maximum associé à la décharge augmente avec la tension appliquée.

Le courant maximum associé à la décharge augmente avec la diminution de l'intervalle d'air.

Nous tenons à souligner le fait que lors de la réalisation de ce projet, nous avons rencontré différentes difficultés que se soit dans la partie théorique pour l'acquisition de la documentation ou dans la partie expérimentale pour l'acquisition du matériel, ajouté à la difficulté de l'étude des impulsions, vu leur sensibilité aux perturbations ainsi que les parasites qui ont rendu leur visualisation ardue.

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

Références bibliographiques

- [1] G. Le Roy, C. Gary, B. Hutzler, J.lalot et C. Dubanton, «Les propriétés diélectriques de l'air et les très hautes tensions», Edition Eyrolles, 1984.
- [2] Michel Aguet et Michel Lanoz, «Haute tension», Volume XXII, Presse polytechniques et universitaires romandes.
- [3] M.A.Handala, «Etude de la décharge de surface sous tension alternative 50Hz», Thèse de doctorat d'état, 2007.
- [4] S. Larigaldi, «Etude expérimentale et modélisation des mécanismes physiques de l'étincelle glissante», Office national d'études et de recherches aérospatiales français.
- [5] Michel Aguet et Michel Lanoz, «Traité d'électricité haute tension», Volume XXII, EditionGeorgie, 1982.
- [6] Cours de Mr M.A.Handala, Université Mouloud Mammeri de TiziOuzou.
- [7] A. Oumokhtar et R. Bouaraba, «Développement de la décharge superficielle en tension alternative 50 Hz», Mémoire d'ingénieure dirigé par M. M.A.Handala, 2004.
- [8] Toshiyuki Shimazaki, «Surface discharge processus of solid insulator under negative impulse voltage in atmospheric air», Proceedings of the 3rd international conference on properties and applications of dielectric materials, July 1991, Tokyo, Japan.
- [9] Philipe Robert, «Matériaux d'ETH », Volume II, Edition Dunod.
- [10] Technique de l'ingénieur D2 110a, «Alliages fer-silicium» par Jean-Claude Bavay et Jean-Verdun, Responsables de développement, tôles magnétiques, aciers électrique.
- [11] M. Moudoud, «Contribution à l'étude d'une isolation solide/air soumise à une tension alternative 50 Hz », Mémoire de magistère, dirigé par M. M.A.Handala, 1996.
- [12] Artificial pollution testing of HVDC and AOC insulators, «Analysis of factors influencing performance» Task force 04.04 of study committal 33.

- [13] «Actes de la deuxième conférences nationale sur la H.T», CNHT 1997 organisé par UMMTO.
- [14] J.P. Trignon, J. Verdu, A. Dobrazynski, «Précis de matériaux plastiques», 5^{ème} édition Afnor, 1994.
- [15] PH. Robert, «Matériaux d'électrotechnique», Edition Georgie, 1979.
- [16] C. Menguy, «Mesure des caractéristiques des matériaux isolants solides», Technique de l'ingénieur D2315, 2007.
- [17] R. Fournié, «Les isolants en électrotechnique concept et théorie», Edition Eyrolles, 1986.
- [18] N. Clinka, «Chimie générale», Tome1, Edition Mir-Moscou, 1981.
- [19] «Introduction aux matériaux polymères», Technique de l'ingénieur, Edition Michel Chatain, 2005.
- [20] R. Perrin et J.P. Scharff, «Chimie industrielle», Tome1, Edition Masson, 1995.
- [21] J.P. Trotignon, J. Verdu, Piperaud et Dobrazynski, «Précis de matières plastiques : structure, propriétés, mis en œuvre et normalisation», 2^{ème} édition Nathan, 1982.
- [22] B. Fallou, «Caractéristiques physiques et optiques des plastiques et composites», Technique de l'ingénieur A3145, 1996.
- [23] J. Trump, «Les matériaux diélectriques et leurs applications», technique de l'ingénieur D215, 1970.
- [24] M. Carrega, «Matériaux polymères», Edition Dunod, Juin 2000.