

الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية
République Algérienne Démocratique et Populaire

Ministère de l'Enseignement Supérieur
et de la Recherche Scientifique
Université Akli Mohand Oulhadj - Bouira -
Tasdawit Akli Muḥend Ulḥağ - Tubirett -



وزارة التعليم العالي والبحث العلمي
جامعة أكلي محمد أولحاج
- البويرة -

Faculté des Sciences et des Sciences Appliquées

كلية العلوم والعلوم التطبيقية

Référence :/MM/2021

المرجع :م / م / 2021

Mémoire de Master

Présenté au

Département : Génie Électrique

Domaine : Sciences et Technologies

Filière : Electrotechnique

Spécialité : Electrotechnique Industrielle

Thème

Comportement d'un polymère soumis à un vieillissement thermique

Soutenu le: 10/07/2024

Devant le Jury composé de :

Mr :	H.HOUASSINE	Professeur	Univ. Bouira	Président
	N.KIRECHE	M.C.A	Univ. Bouira	Encadreur
	K.SAOUDI	Professeur	Univ. Bouira	Examineur

Réalisé par :

DERDAR Djamel
AOUDJIT Youcef

Encadré par:

Dr: N.KIRECHE

Année Universitaire: 2023-2024

Remerciements

En premier lieu, nous adressons nos sincères remerciements et notre profonde gratitude au Dieu Tout-Puissant pour les bienfaits de la science dont il nous a comblés. Nous sommes également ravis de remercier toutes les personnes qui, de près ou de loin, d'une manière ou d'une autre, nous ont inspirés et ont collaboré à ce travail par leur soutien et leurs avis judicieux. Nous tenons à exprimer notre reconnaissance et notre gratitude profonde à notre promotrice, le Docteur N. KIRECHE, pour ses précieux conseils, son aide, ses orientations et sa disponibilité tout au long de notre travail. Nous remercions également l'ensemble des membres du jury qui ont eu l'honneur de juger notre travail. Enfin, nous exprimons notre gratitude à tous ceux qui ont contribué, de près ou de loin, à la réalisation de notre projet.

Dédicaces

À mes parents, pour leur amour inconditionnel, leur soutien et leurs encouragements tout au long de ce parcours académique.

Vous avez été ma source de motivation et de force.

À mes amis, pour leur patience, leur écoute et leurs conseils précieux. Merci d'avoir été là dans les moments de doute et de célébration.

À mes professeurs et notre promotrice le docteur N. KIRECHE, pour leur enseignement, leur dévouement et leur passion pour la transmission du savoir. Vous avez enrichi mon parcours universitaire et m'avez inspiré à toujours chercher l'excellence.

Enfin, à tous ceux qui, de près ou de loin, ont contribué à l'aboutissement de ce mémoire. Votre présence et votre soutien ont été indispensables.

YOUCEF

Dédicaces

Je dédie ce mémoire à :

Mes parents, pour leur amour, leur soutien indéfectible et leur confiance en moi. Vous êtes ma plus grande source d'inspiration et de motivation.

Mes frères, pour leur présence constante, leurs encouragements et leurs précieux conseils. Vous avez toujours cru en moi et m'avez aidé à surmonter les obstacles.

Mes amis, pour leur soutien moral, leurs moments de détente et leur aide précieuse. Merci d'avoir rendu cette aventure plus agréable et enrichissante.

Mes professeurs et notre promotrice le docteur N. KIRECHE, pour leur guidance, leur patience et leur expertise. Vous avez joué un rôle crucial dans la réalisation de ce travail. À tous ceux qui ont contribué, de près ou de loin, à la réussite de ce mémoire, je vous exprime ma profonde gratitude.

Djamal

SOMMAIRE

Introduction générale	1
Chapitre I: Généralités sur les polymères	
I.1. Introduction	2
I.2. Historique	2
I.3.1. Monomère	3
I.3.2. Macromolécules	3
I.3.3. Unités constitutives	3
I.3.4. La polymérisation	3
I.3.5.1 Polymères linéaires	4
I.3.5.2 polymères ramifiés	4
I.3.5.3 polymères réticulés.....	4
I.3.5.4 Structure amorphe.....	5
I.3.5.5 Structure cristalline	5
I.3.5.6 Structure semi-cristalline	5
I.4. Les thermoplastiques.....	6
I.5. Les thermodurcissables	8
I.6. Différents types de polymères	10
I.6.1. Les copolymères	10
I.6.2. Les homopolymères	10
I.7. Avantages et inconvénients des polymères	11
I.7.1. Avantage des polymères.....	11
I.7.1.1. Renouvelabilité.....	11
I.7.1.2. Biodégradabilité.....	11
I.7.1.3. Sécurité alimentaire.....	11
I.7.1.4. Propriétés fonctionnelles	12
I.7.1.5. Compatibilité environnementale.....	12
I.7.2. Inconvénients des polymères	12
I.7.2.1. Coûts élevés.....	12
I.7.2.2. Limites de propriétés.....	12
I.7.2.3. Variabilité de qualité	12
I.7.2.4. Risques de contamination	12
I.7.2.4. Limites de recyclage	12
I.8. Conclusion	13

Chapitre II: Étude du polyméthacrylate de méthyle

II.1. Introduction.....	14
II.1.1. Historique.....	14
II.2. Définition	14
II.3. Polymérisation du PMMA	15
II.3.1. Polymérisation radicalaire en suspension	16
II.3.2. Polymérisation radicalaire en masse	16
II.3.2.1. Procédé plaques coulées	16
II.3.2.2. Procédé masse continu	17
II.3.3. Polymérisation radicalaire et anionique en solution	17
II.3.3.1. Procédé continu en solution	17
II.3.3.2. Polymérisation anionique en solution	17
II.4. Propriétés du PMMA	18
II.4.1. Propriétés physique	18
II.4.2 Propriétés chimiques	18
II.4.3. Propriétés électriques	18
II.4.4. Propriétés thermiques	18
II.4.5. Propriétés optiques	19
II.5. Utilisation du PMMA	19
II.5.1. Les applications industrielles	19
II.5.3. Le sanitaire	20
II.5.4. Le bâtiment concernant tout particulièrement	20
II.5.5. Les loisirs :.....	20
II.5.6. L'optique et l'électronique :	20
II.5.7. L'électrotechnique	20
II.5.8. La médecine	20
II.5.9. L'aéronautique	20
II.6. Conclusion	21

Chapitre III: partie expérimentale

III.1. Introduction	22
III.2. Propriétés diélectriques des polymères	22
III.2.1 Résistivité superficielles (ou de surface)	22
III.2.1.1 Résistivité diélectrique	23
III.2.1.2. Résistance et résistivité transversales (ou volumique)	23
III.2.2 Rigidité électrique	24
III.2.2.1 Définition	24
III.2.3. Permittivité diélectrique	24

III.2.3.1 Permittivité électrique	24
III.2.4. Facteur des Pertes diélectriques	25
III.2.4.1.Définition	25
III.2.4. 2. Pertes diélectriques	25
III.2.5. Facteur de Dissipation Diélectrique	27
III.2.5.1. Définition	27
III.3. Description du dispositif expérimentale	27
III.3.1. Définition d'un vieillissement	27
III.3.2. vieillissement thermique	28
III.4. Préparation des échantillons	28
III.5. Condition d'essais des éprouvettes.....	28
III.6. appareil d'analyse	29
III.6.1. Analyse par la spectroscopie d'impédance.....	29
III.7. Résultats expérimentaux et discussion	29
III.7.1 observation visuelle	29
III.7.2. Influence du vieillissement thermique sur les propriétés diélectriques	30
III.7.2.1. Permittivité relative	30
III.7.2.2. Facteur de dissipation diélectrique.....	31
III.7.2.3. Facteur de pertes diélectriques	33
Conclusion générale	37
Bibliographie	38
Résumé	47

LISTES DES FIGURES

Figure I.1: Monomère	3
Figure I.2: Modèle schématique de la synthèse d'un polymère.....	3
Figure I.3 : polymères linéaires.....	4
Figure I.4 : Homopolymère ramifié (a) et copolymère ramifié (b)	4
Figure I.5 : polymères réticulés	5
Figure I.6 : Structure moléculaire des polymères amorphes.	5
Figure I.7 : Structure moléculaire des polymères semi-cristallins	5
Figure I.8: Les Plaques de thermoplastiques et Quelques produits	6
Figure I.9: Quelques objets thermodurcissables	8
Figure I.10 : Les différentes familles des comopolymères : (a) mode statistique, (b) mode alterné, (c) mode séquencé, (d) mode greffé	10
Figure I.11 : les homopolymères linéaires.....	11
Figure I.12 : les homopolymères branchés.....	11
Figure I.13 : Les homopolymères étoilés	11
Figure II.1. Le plastique transparent de PMMA	15
Figure II.2 .Le dipôle de PMMA	15
Figure II.3 : polymérisation radicalaire du méthacrylate de méthyle.....	16
Figure II.4. Les plaques transparentes en Poly méthacrylate de méthyle	17
Figure II.5 : Les Matières et quelques applications de PMMA	20
Figure III.1. Schémas représentatifs des résistivités transversale et superficielle.....	24
Figure III.2 : Circuit équivalent parallèle représentant un diélectrique	25
Figure III.3 : Diagramme de Fresnel d'un condensateur présentant des pertes.....	26
Figure III.4 : Etuve pour le vieillissement thermique.	28
Figure III.5 : Dessiccateur.....	28
Figure III.6. Impédance-mètre de type Gw Instek LCR-817.	29
Figure III.7. Echantillon vierge.....	29
Figure III.8. Echantillon vieilli thermiquement Pendant 24heures	29
Figure III.9. Variation de la Permittivité relative en fonction de la fréquence	30
Figure III.10. Variation de permittivité relative en fonction du temps du vieillissement	31
Figure III.11. Variation du facteur de dissipation en fonction de fréquence.....	32
Figure III.12. Variation du facteur de dissipation en fonction de temps du vieillissement....	33
Figure III.13. Variation de facteur des pertes diélectriques en fonction de la fréquence.	34
Figure III.14. Variation du facteur de pertes diélectrique en fonction du temps de vieillissement.....	35

LISTES DES TABLEAU

Tableau I-1: Les différentes caractéristiques ainsi que l'usage de quelques Thermoplastiques. 7

Tableau I-2: Les différentes caractéristiques ainsi que l'usage de quelques Thermodurcissables .9

Tableau I-3: Exemples des polymères thermoplastiques et thermodurcissables10

Liste de symbole

PP : Polypropylène

PE : Polyéthylène

PS : Polystyrène

PVC : Polychlorure de vinyle

PMMA : Poly méthacrylate de méthyle

CD : Disque Compact

DVD : Disque numérique polyvalent

PT : Polyéthylène téréphtalate

PR : Polyéthylène réticulé

PEN : Polyéthylène naphtalène

PC : Polycarbonate

MF : Mélamine-formaldéhyde

UF : Urée- formaldéhyde

UV : Ultra-Violet

ρ : (rho) La résistivité diélectrique

R : La résistance superficielle

ρ_s : La résistivité superficielle

S : Section

d : épaisseur

σ : La conductivité électrique

C: Capacité d'un condensateur

ϵ_r : Permittivité relative

ϵ_0 : Permittivité du vide (=8,854x10⁻¹² F/m)

$\epsilon \epsilon_0$: Permittivité absolue

l : la longueur

Cs : capacité du condensateur parfait

R : résistance du diélectrique réel

\bar{I}_C : Le courant de charge

\bar{i}_p : Le courant de perte d'énergie dans le diélectrique

ω : Pulsation du courant alternatif

f : la fréquence électrique

δ :Angle de pertes diélectriques

θ : Angle de phase

U : La tension

\bar{U} : La tension complexe

\bar{i} : Courant complexe résultant

INTRODUCTION GÉNÉRALE

INTRODUCTION GÉNÉRALE

Les polymères, réputés pour leur excellente capacité d'isolation électrique, se sont largement imposés dans ce secteur. Ils sont largement utilisés dans diverses applications telles que les lignes de transport d'énergie, les câbles souterrains et les câbles sous-marins. Ces multiples utilisations tirent parti des propriétés isolantes des polymères [1].

Dans le processus de l'exploitation des matériaux polymères, le problème d'action du milieu extérieur influe sur les propriétés de ces derniers. C'est la raison pour laquelle la connaissance des mécanismes de comportement de ces matériaux est importante afin d'évaluer les processus physico- chimiques et de ce fait ouvrir un large éventail pour la prédiction et l'évaluation des propriétés de ces matériaux soumis à des conditions d'exploitation difficiles [2].

Notre étude concerne le polyméthacrylate de méthyle (PMMA), également connu sous le nom commercial de Plexiglas. Transparent, avec une grande résistance élastique, il est employé pour une grande variété d'applications, comme les pare-brise ou les blindages...etc. Dans cette optique, nous avons mené une étude comparative du PMMA en prenant en compte le processus de vieillissement thermique.

Le travail exposé dans ce mémoire se divise en trois chapitres :

-Dans le premier chapitre, nous abordons les généralités sur les polymères, en commençant par une définition claire et précise. Nous distinguons ensuite les deux grandes catégories de polymères : les thermoplastiques, qui peuvent être ramollis et remodelés à plusieurs reprises, et les thermodurcissables, qui durcissent de manière irréversible lors de leur première mise en forme. Une classification plus détaillée des différents types de polymères est présentée, mettant en lumière sur les avantages et les inconvénients spécifiques à chacun.

-Le deuxième chapitre est consacré à une étude approfondie du polyméthacrylate de méthyle (PMMA), un polymère largement utilisé dans diverses applications grâce à ses propriétés remarquables. Nous explorons sa définition, son processus de polymérisation, et ses propriétés distinctes, notamment physiques, chimiques, électriques, thermiques, optiques et mécaniques. En outre, nous examinons les multiples utilisations du PMMA, soulignant sa polyvalence et son importance industrielle.

-Le troisième chapitre sera consacré à une étude objective de ce mémoire, est de réaliser une étude expérimentale portant sur l'étude des propriétés thermiques du PMMA. Pour cela, nous exposons nos échantillons de PMMA que nous avons réalisé, à la température pour différentes durées de temps. Les échantillons de PMMA seront ensuite étudiés et analysés. Pour se faire, nous effectuerons des analyses (spectroscopie d'impédance), puis nous étudierons les propriétés diélectriques, à savoir le facteur de dissipation, la permittivité relative et l'indice de pertes diélectriques du PMMA avant et après vieillissement, et les résultats obtenus seront interprétés. La conclusion générale, la liste des références bibliographiques et la liste des annexes sont les éléments de fin du mémoire.

CHAPITRE I
GÉNÉRALITÉS SUR LES
POLYMÈRES

I.1. INTRODUCTION

Les polymères naturels ont été utilisés par les humains depuis les temps anciens pour fabriquer divers objets essentiels tels que les armes, les vêtements et les abris.

Au fil du temps, les polymères ont considérablement élargi leur domaine d'utilisation. Certains de ces produits sont devenus indispensables dans le domaine génie électrique en raison de leurs excellentes capacités d'isolation, particulièrement adaptées aux utilisations numériques, en plus de leur utilité dans l'industrie de l'emballage. Nous citons aussi quelques composants tels que les roulements, les pignons et les joints qui sont fabriqués en plastique.

Les polymères sont de plus en plus privilégiés par rapport aux métaux dans la production de tubes pour le transport des fluides et dans l'agriculture [3].

La connaissance de la structure compositionnelle et configurationnelle, ainsi que les caractéristiques physico-chimiques, permet d'améliorer l'utilisation des polymères. Dans ce chapitre nous étudierons en détail leurs aspects structurels et conformationnels, leurs catégories ainsi que leurs domaines d'utilisation [4].

I.2. HISTORIQUE

Le développement industriel des pièces en plastique avait commencé au milieu du XIXe siècle avec la production d'articles de mode en cellulose et en caséine. Dans les années 1920, de grandes découvertes ont joué un rôle dans l'évolution des matériaux plastiques, en créant la première résine synthétique, la bakélite, où Baekeland lança la première pierre dans le domaine de la fabrication en grande quantité de pièces en matière thermodurcissable [5]. Ces matières étaient principalement connues pour leur intérêt dans le domaine de l'électrotechnique à cette époque. Dès 1926, on a pu constater un développement remarquable, notamment pour les thermoplastiques, grâce aux recherches du chimiste allemand Staudinger. Lors des investigations de ce dernier, Staudinger a démontré que les matières plastiques sont en réalité constituées de longues chaînes moléculaires, connues sous le nom de macromolécules. Aujourd'hui encore, ce concept représente la fondation scientifique de l'analyse systématique des matières plastiques. La transformation d'une matière première, le charbon, en dérivés pétrochimiques constitue une nouvelle impulsion majeure pour le développement des matières plastiques à partir du milieu des années 1950. Les sous-produits sont utilisés pour obtenir des fractions légères, telles que l'éthylène. Les principaux dérivés thermoplastiques sont le polypropylène (PP), le polyéthylène (PE), le polystyrène (PS) et le polychlorure de vinyle (PVC) ainsi que le polyméthacrylate de méthyle. Ces matières ont pu être fabriquées de manière plus économique grâce à cette découverte [5].

I.3. DÉFINITION D'UN POLYMÈRE

L'expression polymère d'origine grecque *polus-meros* est formée de deux mots : « Polus » qui signifie plusieurs et « Méos » qui signifie partie. Par définition, une macromolécule organique ou inorganique est formée par l'enchaînement répété de monomères qui sont liés les uns aux

autres par des liaisons covalentes [6].

Les polymères sont des matériaux constitués de chaînes très longues appelées (macromolécules), qui sont constituées de molécules élémentaires (monomères) assemblées entre elles. Ces chaînes sont principalement composées d'atomes de carbone qui sont attachés à des éléments tels que l'hydrogène ou l'oxygène. D'autres composants, tels que le chlore, l'azote ou le fluor, peuvent encore être présents dans la structure de la chaîne, comme l'illustre la figure I.1 [7].

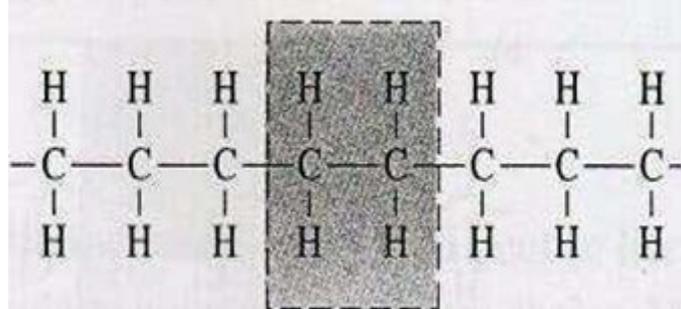


Figure I.1: Monomère [7]

I.3.1. Monomère

Une espèce chimique composée d'éléments moléculaires qui peuvent entraîner la formation d'une ou plusieurs unités constitutives d'un polymère [8].

I.3.2. Macromolécules

Les molécules de masse moléculaire élevée sont généralement formées par la répétition de nombreux atomes ou groupes d'atomes, appelés « unités constitutives ». Elles sont dérivées de molécules de masse moléculaire faible [8].

I.3.3. Unités constitutives

Atome ou ensemble d'atomes qui représente une composante essentielle de la structure d'une macromolécule [10].

I.3.4. La polymérisation

La polymérisation est l'action d'assembler des monomères afin d'obtenir des polymères (ou macromolécules) comme l'illustre la figure I.2. Parmi les organismes vivants, l'utilisation de la réaction de polymérisation [9].

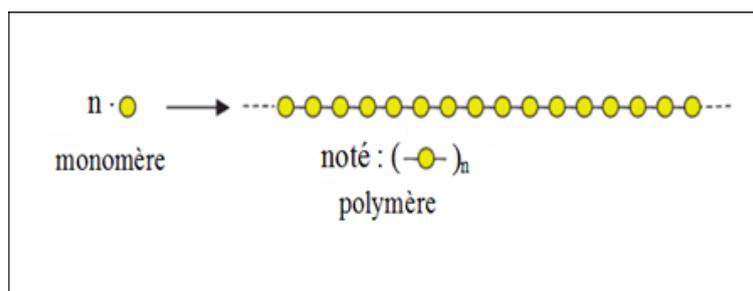


Figure I.2: Modèle schématique de la synthèse d'un polymère [9].

On désigne la lettre n comme le « degré de polymérisation » ou l'indice de polymérisation, et lorsque n atteint des valeurs élevées ($n > 100$), on parle de macromolécules.

Un polymère peut être identifié en fonction de sa concentration en polymères ou de sa masse moléculaire. La polymérisation est définie comme le nombre total de monomères présents dans une macromolécule [9].

I.3.5 Structure et architecture des polymères

Les polymères peuvent avoir des architectures très différentes. Ils peuvent être de forme linéaire, ramifiée ou réticulée. Ils sont généralement d'une structure amorphes, mais parfois ils peuvent être, au moins partiellement, cristallisés [10].

I.3.5.1 Polymères linéaires

La figure suivante (figure I.3) représente la forme d'un polymère linéaire.

- a- Homopolymère
- b- Copolymère statistique
- c- Copolymère alterné
- d- Copolymère séquencé

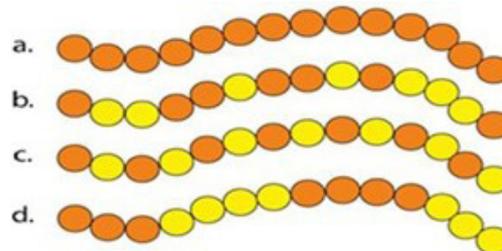


Figure I.3 : polymères linéaires [10].

I.3.5.2 polymères ramifiés

La figure suivante (figure I.4) représente la forme d'un homopolymère ramifié (a) et copolymère ramifié (b).

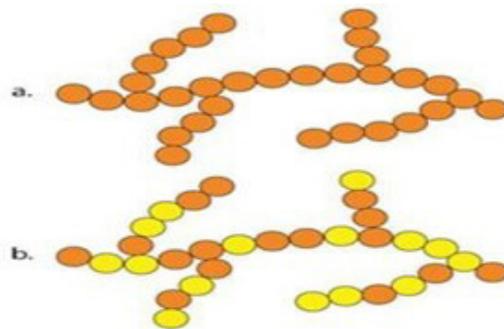


Figure I.4 : Homopolymère ramifié (a) et copolymère ramifié (b) [10]

I.3.5.3 polymères réticulés

La figure suivante (figure I.5) représente la forme d'un polymère réticulé.

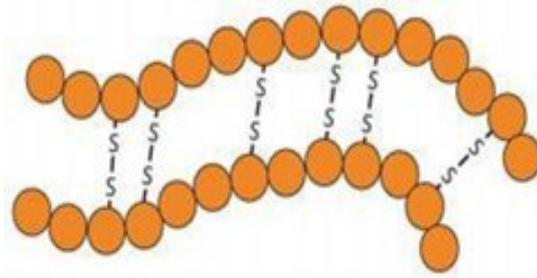


Figure I.5 : polymères réticulés [10]

I.3.5.4 Structure amorphe

La structure amorphe est une structure compacte et peu organisée. On peut trouver cette structure dans certains polymères organiques tels que le polyméthacrylate de méthyle (PMMA), le styrène acrylonitrile (SAN) et le polystyrène (PS) (figure I.6) [11].

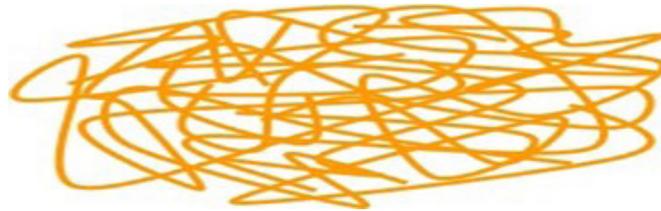


Figure I.6 : Structure moléculaire des polymères amorphes [12].

I.3.5.5 Structure cristalline

La structure cristalline se distingue par une distribution régulière et irrégulière des particules qui composent le matériau (ordre à longue distance, réseau cristallin). Tous les matériaux métalliques ainsi que de nombreuses céramiques présentent une composition cristalline comme par exemple, le nylon, le verre, le polypropylène et le polystyrène [11].

I.3.5.6 Structure semi-cristalline

Cette structure est complexe, car elle présente une proportion variable de phases amorphes et cristallines (présence de cristallinité). On peut observer cette structure dans de nombreux polymères organiques tels que le Polypropylène (PP) et le polyéthylène (PE) comme l'illustre la figure I.7 [18].

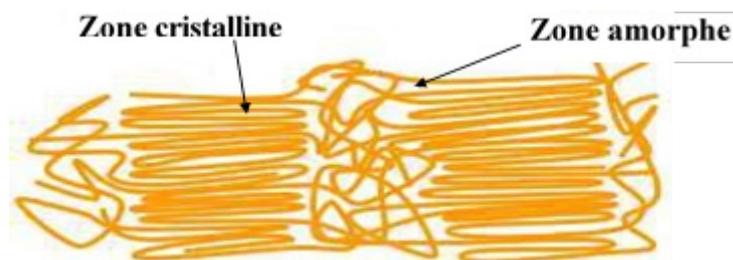


Figure I.7 : Structure moléculaire des polymères semi-cristallins [12]

Tableau I-1: Les différentes caractéristiques ainsi que l'usage de quelques Thermoplastiques [14]

Nom	Caractéristiques	Usages
Poly méthacrylate de méthyle (PMMA).	Malgré une épaisseur considérable pouvant atteindre jusqu'à 33 cm, ce matériau reste transparent, contrairement au verre. L'introduction de PMMA dissous dans sa composition garantit que les huiles lubrifiantes et les fluides hydrauliques maintiennent leur fluidité même à des températures extrêmement basses, pouvant aller jusqu'à -100°C.	Des marques telles que Plexiglas, Lucite et Altuglas sont couramment employées en remplacement du verre, notamment pour des applications nécessitant des surfaces incassables comme les vitres de baignoires et d'éviers, les parois d'aquariums de grande taille résistantes à la pression de l'eau, ainsi que pour des usages variés tels que les feux arrière et clignotants automobiles, les hublots d'avion, les fibres optiques et les enseignes lumineuses.
Polychlorure de vinyle(PVC)	Le PVC peut adopter des propriétés rigides ou flexibles en fonction des ingrédients ajoutés. Le PVC rigide se caractérise par sa texture lisse et sa solidité.	Dans les secteurs de l'ameublement, de la construction, du génie civil et de l'alimentation, divers articles sont fabriqués à partir de PVC, un matériau polyvalent. Les applications comprennent les pots de margarine, les blisters, les bouteilles d'eau, les emballages alimentaires, et bien d'autres. Le PVC rigide est couramment utilisé dans la fabrication de tuyaux de canalisation, tandis que le PVC souple est employé pour recouvrir certains manches de pinces, entre autres utilisations.
Polyesters et polyéthylène téréphtalate (PET)	Mou à moyenne température.	La production de fils textiles, de films ainsi que de bouteilles destinées à l'eau et aux sodas est sujette à des restrictions liées à la température d'utilisation.
Polycarbonate(PC)	Ces propriétés incluent une excellente résistance mécanique, une bonne tolérance thermique allant jusqu'à 120°C, une grande transparence, ainsi qu'une neutralité, physiologique. Cependant, elles présentent une faible résistance aux contacts prolongés avec l'eau, aux produits chimiques et aux rayons ultraviolets.	Des équipements de sécurité tels que les casques de moto et les boucliers de police, des supports de divertissement comme: les CD et les DVD, des éléments de protection comme les vitres pare-balles, des composants automobiles comme les phares, les feux arrière et les clignotants, des dispositifs médicaux et des prothèses, des articles domestiques comme les biberons incassables, des matériaux de construction comme les profilés de toiture, et des équipement Publics.

Polystyrène(PS)	Rigide et fragile, il existe trois types de polystyrène: Le polystyrène «crystal» transparent. Le polystyrène «choc». Le polystyrène «expansé», qui est inflammable et combustible.	Usages variés : mobilier, emballages, jouets, verres plastiques, pots de yaourt, nombreux types de boîtes, boîtiers CD...etc. Produits rigides, légers, moulés (bacs à douche....)
-----------------	--	---

I.5. LES THERMODURCISSABLES

Les thermodurcissables sont des matériaux plastiques qui se transforment en une forme définitive après avoir été refroidis. Il est impossible qu'ils soient réversibles de forme, car ils ne se décomposent plus une fois moulés. À des températures trop élevées, ils se détériorent et se brûlent (carbonisation). Les molécules de ces polymères sont structurées en longues chaînes où de nombreuses liaisons chimiques solides ne peuvent pas être rompues et se renforcent lorsque le plastique est pris au chaud (figure I.9) [13].



Figure I.9: Quelques objets thermodurcissables [13]

Tableau I-2 : Les différentes caractéristiques ainsi que l'usage de quelques Thermodurcissables [14]

Nom	Caractéristiques	Usages
Aminoplastes	Il existe deux types principaux de résines synthétiques : l'urée-formaldéhyde (UF) et la mélamine-formaldéhyde (MF), avec le formica étant le plus célèbre parmi eux. Ces résines se distinguent par leur remarquable dureté et rigidité, ainsi que leur résistance notable à l'hydrolyse et à la lumière. Elles offrent également une bonne résistance à l'abrasion, une tenue satisfaisante aux solvants et une difficulté à s'enflammer. De plus, elles peuvent être fabriquées dans des teintes claires.	Ce matériau polyvalent est utilisé dans une gamme diversifiée d'applications, notamment pour le mobilier de cuisine, les plans de travail, les liants dans les contreplaqués, les bois agglomérés et mélaminés, ainsi que pour le moulage de stratifiés décoratifs pour les revêtements. Il est également employé dans la fabrication d'ustensiles de cuisine moulés, de matériel électrique tel que les interrupteurs et prises de courant, les vernis pour parquets (pour la vitrification), les apprêts destinés à rendre les tissus indéfroissables ou plastifiés, les peintures, et bien d'autres applications encore.
Phénoplastes	Ce matériau présente une excellente résistance aux produits chimiques et à la chaleur, ainsi qu'une isolation électrique efficace. Il peut être façonné par moulage ou par compression. De plus, il est fréquemment teinté dans des tons bruns foncés.	Les avancées dans les domaines scientifiques ont permis de créer divers objets tels que les téléphones et les postes de radio, ainsi que de concevoir des éléments pratiques comme les poignées de casserole, les fers à repasser et les plaques de revêtement.
Polyesters insaturés	Un coût modéré, un durcissement relativement rapide sans élimination complète des sous-produits. Les fibres de verre s'imbibent aisément.	Diverses applications bénéficient de pièces plastiques renforcées par coulée, telles que les pales d'éoliennes, les coques et cabines de bateaux, les piscines, ainsi que les carrosseries automobiles. De plus, les textiles tels que le Dacron, le Tergal et le Térylène sont également utilisés.

Tableau I-3 : Exemples des polymères thermoplastiques et thermodurcissables [15]

POLYMERES		
THERMOPLASTIQUES		THERMODURCISSABLES
AMORPHE	CRISTALLIN	
<ul style="list-style-type: none"> • Polycarbonate • Polystyrène, • Polyméthacrylate de méthyle PMMA • Acrylonitrile • Styène 	<ul style="list-style-type: none"> • Polyéthylène • Polypropylène • Nylon • Polyoxométhylène 	<ul style="list-style-type: none"> • Epoxy • Polyester insaturé • Polyuréthannes

I.6. DIFFÉRENTS TYPES DE POLYMÈRES

Les polymères peuvent être classés en fonction de leur réaction à la température, de leurs unités constitutives ou de leur source d'origine.

Pour la classification selon leur unité, il existe deux types : les homopolymères et les copolymères [16].

I.6.1. Les copolymères

Les copolymères sont des polymères constitués de multiples unités et sont catégorisés en différentes familles qui comprennent cette figure (I.10) [16] :

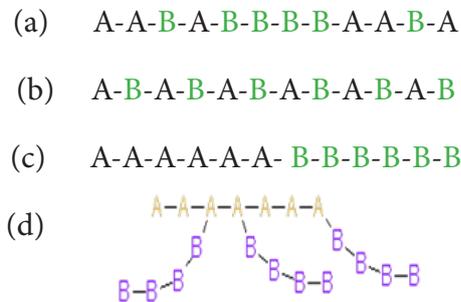


Figure I.10 : Les différentes familles des comopolymères : (a) mode statistique, (b) mode alterné, (c) mode séquencé, (d) mode greffé [16]

Les polymères, qu'ils soient homopolymères ou copolymères, ont la capacité d'être réticulés. Un polymère réticulé se compose de chaînes polymériques liées entre elles par des ponts chimiques covalents. Généralement, la réticulation est nécessaire avant l'utilisation des polymères. En effet, ces polymères sont initialement sous forme liquide et nécessitent une réticulation pour les stabiliser et les maintenir en place.

I.6.2. Les homopolymères

Les homopolymères sont constitués d'une seule unité de polymère, comme le polyéthylène

par exemple.

Au sein des homopolymères, on distingue plusieurs familles, notamment, les homopolymères linéaires (figure I.11), les homopolymères branchés (figure I.12), les homopolymères étoilés branchés (figure I.13) [17].



Figure I.11 : les homopolymères linéaires [17]



Figure I.12 : les homopolymères branchés [17]

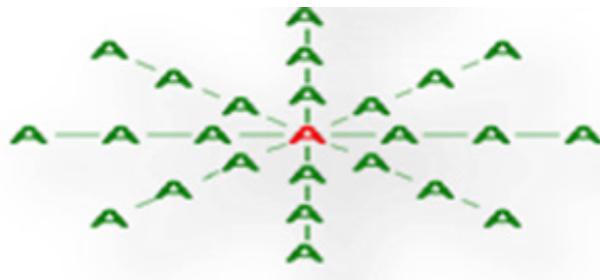


Figure I.13 : Les homopolymères étoilés [17]

I.7. AVANTAGES ET INCONVÉNIENTS DES POLYMÈRES

Les polymères naturels et synthétiques offrent une grande variété d'avantages et d'inconvénients qui dépendent de leur composition, de leur structure et de leur application [18].

I.7.1. Avantage des polymères [18]

I.7.1.1. Renouvelabilité

Les polymères, tels que les bioplastiques, proviennent de ressources renouvelables, réduisant ainsi la dépendance aux combustibles fossiles et l'impact environnemental.

I.7.1.2. Propriétés isolantes

Les polymères sont de bons isolants thermiques et électriques, ce qui les rend idéaux pour les applications nécessitant une isolation, comme les revêtements de câbles électriques et les matériaux d'isolation thermique.

I.7.1.3. Sécurité alimentaire

Certains polymères, tels que l'amidon et la cellulose, sont couramment utilisés dans l'industrie alimentaire pour leur biocompatibilité et leur innocuité, servant souvent comme agents d'épaississement, d'émulsion ou de stabilisation dans les produits alimentaires.

I.7.1.4. Flexibilité et élasticité

Beaucoup de polymères sont flexibles et élastiques, ce qui leur permet d'être utilisés dans des applications nécessitant des matériaux qui peuvent se plier ou s'étirer sans se casser.

I.7.1.5. Compatibilité environnementale

Les polymères sont généralement plus compatibles avec l'environnement que les polymères synthétiques, car ils sont souvent biodégradables et peuvent être recyclés.

I.7.2. Inconvénients des polymères [18]

I.7.2.1. Coûts élevés

Les polymères naturels peuvent être plus coûteux que les polymères synthétiques, en particulier si les sources de ressources sont rares ou difficiles à cultiver.

I.7.2.2. Absorption d'humidité

Certains polymères, en particulier les polyamides (nylons), peuvent absorber de l'humidité, ce qui peut entraîner une modification de leurs dimensions et de leurs propriétés mécaniques.

I.7.2.3. Compatibilité chimique

Les polymères peuvent être sensibles à certains solvants, huiles et produits chimiques qui peuvent les dégrader ou les dissoudre. Cette sensibilité limite leur utilisation dans certains environnements chimiques agressifs.

I.7.2.4. Risques de contamination

Les polymères naturels peuvent être contaminés par des substances chimiques ou biologiques, ce qui peut affecter leur sécurité alimentaire et leur compatibilité environnementale.

I.7.2.4. Limites de recyclage

Les polymères peuvent être difficiles à recycler, car dans certains cas ils sont mélangés à d'autres matières ou contiennent des impuretés, ce qui peut réduire leur valeur et leur utilisation.

I.8. CONCLUSION

Dans ce chapitre, nous avons donné un aperçu sur les polymères. Ce sont des matériaux qui sont souvent utilisés dans des applications où la résistance aux conditions environnementales extrêmes est primordiale, on cite, par exemple, les composants aérospatiaux et les pièces structurelles.

De ce fait, il est nécessaire de comprendre les propriétés distinctives de chaque type de polymère, afin de choisir le matériau le mieux adapté à chaque application spécifique, optimisant ainsi la performance, la durabilité et la rentabilité des produits finis.

CHAPITRE II
ETUDE DU POLYMÉTHACRYLATE
DE MÉTHYLE

II.1. INTRODUCTION

Le polyméthyle-méthacrylate (PMMA) est un matériau thermoplastique remarquable qui est employé dans de nombreuses industries (bâtiment, automobile, énergie photovoltaïque... etc.). Il présente une stabilité environnementale supérieure à la plupart d'autres matières plastiques courantes, il est utilisé dans des applications rigides car il a une excellente transparence. Le PMM est doté d'une bonne résistance aux chocs thermiques et aux UV (mieux que la plupart d'autres plastiques).

Le polyméthacrylate de méthyle (PMMA), également connu sous le nom de plexiglas par la société chimique, est un polymère thermoplastique dont le méthacrylate de méthyle (MAM) est le monomère [19].

Nous avons opté pour ce polymère car il y a peu de données disponibles sur son comportement sous contrainte thermique ou électrique. Ce polymère est un matériau thermoplastique présentant des propriétés thermomécaniques distinctes. Effectivement, le PMMA se distingue par sa morphologie et son aspect polaire [20].

II.1.1. Historique

Le polyméthacrylate de méthyle a été synthétisé pour la première fois vers 1900 par le Dr Otto Röhm en Allemagne, et son utilisation à grande échelle a commencé aux États-Unis dans les années 1930 en se basant sur les procédés de polymérisation [21].

Historiquement, En 1843, Redtembacher a découvert l'acroléine, qui, en s'associant à de l'oxygène, forme l'acide acrylique. Le méthacrylate de méthyle (MAM) a été fabriqué pour la première fois en 1865. Francland l'a produite en déshydratant l'ahydroxisobutyrate d'éthyle. Sept ans plus tard, la fabrication de divers acrylates a été développée (Casparry et Tollens, 1873), notamment l'acrylate d'allyle qui peut se polymériser [20].

La polymérisation de l'acrylate de méthyle a été reportée quelques années plus tard par Kahlbaum (1880). Au cours de la même période, Fittig (1879 et 1880) a réalisé la préparation de l'acide méthacrylique et a remarqué que certains de ses dérivés ont tendance à se dissoudre. O.Röhm a réalisé une étude sur le méthacrylate de méthyle en 1901. Röhm et Hass ont lancé une production restreinte de poly (méthacrylate de méthyle) en 1927 [20].

II.2. DÉFINITION

Le poly méthacrylate de méthyle (PMAM) est un polymère thermoplastique composé méthacrylate de méthyle (MAM), qui est cassant et ayant une structure amorphe. C'est un matériau plastique léger et transparent qui est parfois employé comme substitut au verre.

Par rapport aux isolants classiques, le polyméthacrylate de méthyle PMMA présente Comme les autres polymères, l'avantage d'avoir des propriétés mécaniques améliorées, une mouillabilité réduite, une légèreté accrue et une mise en œuvre plus aisée (figure II.1) [22].

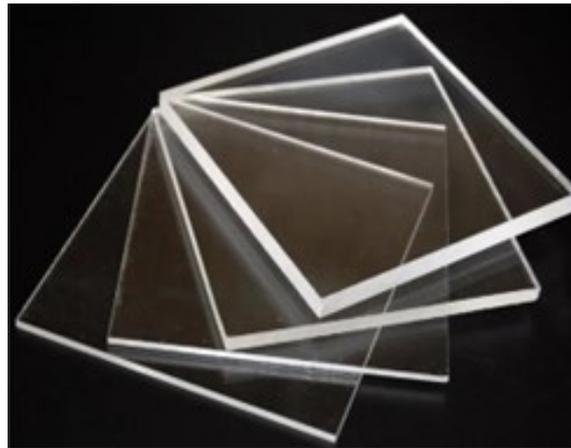


Figure II.1. Le plastique transparent de PMMA. [33]

Ce produit chimique polymère est composé d'un groupe ester (COOCH_3) et d'un groupe méthyle (CH_3). Le polymère est très polaire en raison de la présence du groupement ester, ce qui rend son dipôle, la chaîne latérale, flexible, comme illustré dans la figure II.2 [19].

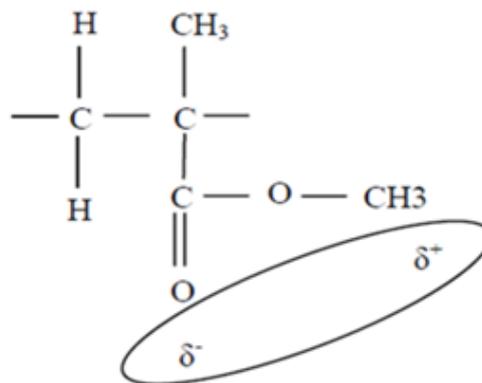


Figure II.2. Le dipôle de PMMA [19]

II.3. POLYMÉRISATION DU PMMA

Le PMMA est obtenu par polymérisation du méthacrylate de méthyle (MMA). Il est possible de polymériser par voie radicalaire ou par voie anionique dans un milieu anhydre. Le méthacrylate de méthyle peut être obtenu en utilisant la méthode de cyanohydrine acétone (ACH), qui consiste en l'utilisation de l'acétone et du cyanure d'hydrogène (qui est extrêmement toxique). La présence d'un proton de l'eau dans le milieu anhydre permet d'éviter que les chaînes de PMMA ne se terminent trop tôt lors de la polymérisation, ce qui entraînerait une diminution du degré de polymérisation (nombre de motifs de répétition dans les chaînes). Les polymères seraient donc trop courts et les caractéristiques du matériau seraient différentes.

La réaction de polymérisation est ensuite interrompue et le polymère est isolé par précipitation. On procède à la précipitation en introduisant un proton dans le milieu réactionnel, que ce soit par l'ajout d'un acide ou d'un autre monomère [23].

Dans la figure ci-dessous, nous observons le processus de polymérisation du PMMA [22] :

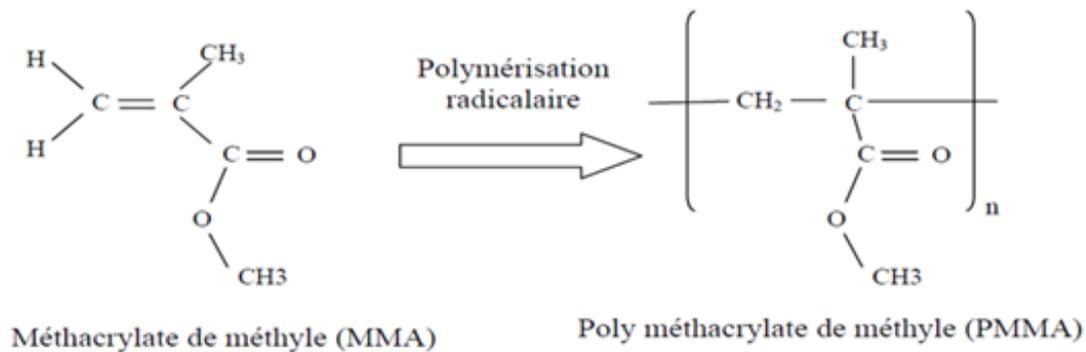


Figure II.3 : polymérisation radicalaire du méthacrylate de méthyle [22].

Il existe effectivement trois procédés de polymérisation dans la synthèse du PMMA [21] :

a- La polymérisation en suspension.

b- La polymérisation en masse : (qui peut inclure la production de plaques coulées ou de masses continues).

c- La polymérisation en solution.

Ces différentes méthodes offrent divers avantages et sont utilisées dans diverses applications industrielles pour produire du polyméthacrylate de méthyle selon les besoins spécifiques.

II.3.1. Polymérisation radicalaire en suspension

La polymérisation se produit lorsque l'eau est en suspension et donne lieu à l'obtention de poudres ou de «perles». Il s'agit d'un processus périodique qui nécessite la manipulation et le traitement de quantités considérables d'eau, mais qui est toujours employé par certaines entreprises qui ont apporté des améliorations (réutilisation des eaux de filtration).

II.3.2. Polymérisation radicalaire en masse

On distingue le procédé plaques coulées et le procédé masse continu.

II.3.2.1. Procédé plaques coulées

La polymérisation est effectuée dans des moules qui contiennent le sirop (monomère) ainsi que les additifs requis (catalyseur, agent anti-UV, colorants,...). La polymérisation du monomère avec catalyseur est réalisée entre deux plaques de verre qui servent de moule [24]. On obtient ainsi des plaques de dimensions (2 m × 3 m) et d'une épaisseur allant de 1 mm à 200 mm, offrant des qualités optiques et de surface exceptionnelles, (Figure II.4) [25].

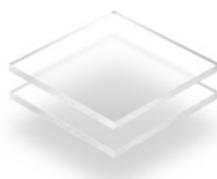


Figure II.4. Les plaques transparentes en Poly méthacrylate de méthyle [32]

II.3.2.2. Procédé masse continu

Ce procédé est l'un des plus utilisés. Les étapes en sont les suivantes [21]

-Élaboration d'un mélange de MMA et de ses composants, ainsi que l'ajout d'amorceur et d'autres ingrédients ;

- Le refroidissement de la solution varie de $-40\text{ }^{\circ}\text{C}$ à $-20\text{ }^{\circ}\text{C}$ en fonction du procédé ;

- En général, la polymérisation se produit dans un réacteur agité continu où le taux de conversion se situe entre 50 et 60 %

- Par l'utilisation d'une extrudeuse ou d'un dévolatiliseur flash, la solution est rapidement chauffée à $210\text{ }^{\circ}\text{C}$ et les monomères qui n'ont pas réagi sont évaporés.

- En fin de processus, des granulés sont obtenus. On condense les monomères évaporés, puis on les recycle ou on les distille afin d'alimenter le réacteur de mélange [21].

II.3.3. Polymérisation radicalaire et anionique en solution

II.3.3.1. Procédé continu en solution

La polymérisation se produit en présence d'un solvant utilisé pour le polymère, généralement un solvant aromatique tel que le toluène. La réaction se déroule en continu avec un procédé de masse (seules les températures de polymérisation varient). Les monomères réagissent presque intégralement. Il n'y a que le solvant à revendre. La polymérisation radicalaire contrôlée en solution permet d'obtenir une structure à bloc de type MABuM : poly (méthacrylique de méthyle) – bloc – poly (acrylate de butyle) – bloc – poly (méthacrylate de méthyle) [21].

II.3.3.2. Polymérisation anionique en solution

On observe également une polymérisation dans un solvant aromatique : la réaction est initiée par des composés organiques de lithium, contrôlés par des ligands également lithiés. Le polymère obtenu présente une grande syndiotacticité ($> 70\%$). Il s'agit de la méthode de production de copolymères à bloc poly (styrène)-bloc-polybutadiène-bloc-poly (méthacrylate de méthyle) (SBM) développée par ARKEMA à la suite des recherches menées dans les années 1990 par orkem [21].

II.4. PROPRIÉTÉS DU PMMA

II.4.1. Propriétés physique

Le PMMA est réputé pour ses caractéristiques optiques remarquables. La transparence de ce polymère amorphe est exceptionnelle (92 % de transmission lumineuse) dans le domaine visible de 380 à 780 nm. Ce matériau est largement utilisé dans le domaine optique en raison de son indice de réfraction de 1,491 (pour $\lambda = 587,6$ nm hélium). Le PMMA se ramollit à une température comprise entre 130 et 140 °C [30].

Dans des conditions extrêmes, le PMMA est sensible à l'humidité et l'eau absorbée jouera le rôle d'un plastifiant et altérera les caractéristiques du matériau [31].

II.4.2 Propriétés chimiques

- Le PMMA présente une innocuité et une absence d'odeur, et il est connu pour ses propriétés alimentaires [26] [25].

- Le PMMA est relativement résistant aux acides organiques et minéraux dilués ainsi qu'aux solutions alcalines diluées jusqu'à une température de 60 °C. Cependant, il est sensible aux produits courants tels que l'acétone, l'alcool, le pétrole, le phénol, le carburant d'avion et le méthanol à 30 °C [26] [25].

- Il est possible d'exposer le PMMA à l'extérieur sans aucun souci [27].

- La résistance aux conditions météorologiques est excellente [27].

II.4.3. Propriétés électriques

Les principales caractéristiques électriques du PMMA sont résumées dans la section suivante [28] :

- La rigidité diélectrique varie entre 15 et 20 kV/mm

- La résistivité transversale varie entre 10^{15} à 10^{16} Ω .cm

- La permittivité relative varie entre :

- 3,0 et 4,0 à des fréquences de 50 ou 60 Hz.

- L'élément de pertes diélectriques est représenté de :

- $4 \cdot 10^{-2}$ et $5 \cdot 10^{-2}$ à des fréquences de 50 ou 60 Hz.
- $3 \cdot 10^{-2}$ et $5 \cdot 10^{-2}$ à la fréquence de 1 kHz [28].

II.4.4. Propriétés thermiques

La section suivante résume les principales caractéristiques thermiques du PMMA [29] :

- Coefficient de dilatation thermique linéique, conformément à la norme NF T 51-221 ou

équivalente

- Conductivité thermique, conformément à la norme NF X 10-021 ou à une norme similaire.
- Température de fonctionnement en continu..... - 40 à 85 °C
- Température vitreuse de transition.....90 à 135°C
- La température de fléchissement sous charge TFC A est de 1,82 MPa, conformément à la norme NF T 51-005 ou à une norme comparable.....70 à 100 °C
- Selon ISO 75-2 ou norme équivalente, la température de fléchissement sous charge TFC B est de 0,46 MPa.....75 à 115 °C [29].

II.4.5. Propriétés optiques

- Une surface intérieure présentant un angle de réflexion total de 41 à 42 °C, ce qui autorise la création de «conducteurs» de lumière, tels que les fibres optiques [25].

- Il possède un indice de réfraction de 1,491 pour $\lambda = 587,7$ nm hélium, ce qui en fait un matériau approprié pour la fabrication optique [25].

- La transparence est de 92 % pour une épaisseur de 3 mm [27].

II.4.6. Propriétés mécaniques

Le PMMA est un polymère amorphe qui a une température de transition vitreuse de 110 à 135 °C. Cela signifie qu'à température ambiante, il est solide, rigide, cassant et présente une faible croissance.

Si le module est assez faible pour permettre une déformation facile sous efforts modérés, le thermoformage est réalisable.

À une température supérieure à la température de transition vitreuse, le module d'un polymère amorphe diminue considérablement et reste presque constant [29].

II.5. UTILISATION DU PMMA

Le PMMA est employé dans de nombreux secteurs tels que les loisirs, le bâtiment et l'aéronautique. Les principales applications sont les suivantes [27].

II.5.1. Les applications industrielles

Les cadres, les hublots et les capots des machines à laver, les chaînes Hi-Fi, les portes des fours à micro-ondes, les écrans de contrôle industriel ainsi que les schémas de contrôle du trajet routier et ferroviaire.

II.5.2. L'ameublement et décoration

Salons, tables, aménagements intérieurs, escaliers, mobilier hospitalier, litières...etc.

II.5.3. Le sanitaire

Les baignoires, les bacs à douche et les lavabos sont des éléments thermoformés et colorés.

II.5.4. Le bâtiment concernant tout particulièrement

- Les éléments transparents présents dans les immeubles contemporains (garde-corps de balcon, pare-soleil, barrières de vent).

- Le système d'éclairage : dômes, voûtes et vitrages.

- On utilise du PMMA extrudé pour la construction de toitures, de vérandas et de parois de locaux industriels.

II.5.5. Les loisirs :

Articles publicitaires tels que des enseignes, des présentoirs, des affiches, ... etc.

II.5.6. L'optique et l'électronique :

Les fibres optiques (dans les domaines de l'automobile, de l'aviation, de l'informatique, des connexions industrielles). Dans le domaine de l'optique, le PMMA est employé pour les lentilles, les épiscopopes, ... etc.

II.5.7. L'électrotechnique

Pour des utilisations comme : les condensateurs, l'enrobage de composants et différents supports.

II.5.8. La médecine

Le PMMA est parfaitement adapté au tissu humain :

- Des interventions chirurgicales pour atténuer de manière durable les rides.

- Appareils de rechange intraoculaires dans l'œil : verre de contact, lentilles.

II.5.9. L'aéronautique

Le PMMA est employé dans les fenêtres, les hublots et les capots d'avion.



Figure II.5 : Les Matières et quelques applications de PMMA

II.6. CONCLUSION

Dans ce chapitre suivant, nous avons exposé le matériau sélectionné pour ce projet (PMMA). Effectivement on a exposé les polymérisations et les définitions, et aussi les caractéristiques de PMMA, Et quelque Exemples de leurs applications dans le domaine de génie électrique et autres secteurs.

Le PMMA présente de nombreuses caractéristiques essentielles telles que la résistance à la rayure, l'isolation thermique et acoustique, ainsi que la transparence. Il est employé dans le domaine du génie électrique comme isolant en raison de leurs caractéristiques électromécaniques et physico-chimiques remarquables et de leur facilité de recyclage.

CHAPITRE III

PARTIE EXPÉRIMENTALE

III.1. INTRODUCTION

Les matériaux polymères diélectriques sont cruciaux pour de nombreuses applications électriques et électroniques grâce à leurs propriétés spécifiques, telles que la résistivité, la rigidité électrique, la permittivité et le facteur de pertes diélectrique. Ces caractéristiques sont déterminantes dans le choix et la conception de matériaux pour des utilisations spécifiques, comme les circuits imprimés, les câbles haute tension, les isolants pour transformateurs, les condensateurs, et bien d'autres encore.

La première partie a abordé les propriétés diélectriques des polymères telles que la résistivité, la rigidité électrique, la permittivité, et le facteur de pertes diélectrique, aussi facteur de dissipation.

Dans la deuxième partie, nous présenterons les différents dispositifs expérimentaux utilisés lors des essais de vieillissement thermique réalisés sur des échantillons de PMMA. Des résultats d'analyse et de mesure ainsi que des interprétations seront exposés pour mieux comprendre ce polymère.

III.2. PROPRIÉTÉS DIÉLECTRIQUES DES POLYMÈRES

III.2.1 Résistivité superficielles (ou de surface)

La résistivité superficielle, ou résistance superficielle, se réfère à la résistance électrique d'une certaine surface d'un matériau. Généralement exprimée en ohms par carré (Ω/square), elle sert à caractériser la conductivité électrique des matériaux conducteurs ou semi-conducteurs sur une surface spécifique.

Pour calculer la résistivité superficielle, on divise la résistance mesurée par la largeur de la surface (en mètres), multipliée par l'épaisseur du matériau (en mètres). Cette mesure est couramment utilisée dans le domaine de l'électronique pour évaluer la qualité des matériaux conducteurs utilisés dans la fabrication des circuits imprimés, des capteurs, et d'autres composants électroniques.

Pour un matériau homogène de résistivité ρ (rho) et d'épaisseur d (en mètres), la résistance R (en ohms) à travers une section de surface A (en mètres carrés) se calcule en utilisant la relation suivante :

$$\rho = R \frac{S}{d} \quad (1)$$

La résistivité superficielle (ou résistance superficielle) ρ_s est ainsi définie comme :

$$\rho_s = \frac{R}{A} \quad (2)$$

Où :

ρ_s : Résistivité superficielle en ohms par carré (Ω/square),

R : Résistance en ohms mesurée à travers la surface,

A : Surface en mètres carrés sur laquelle la résistance est mesurée.

III.2.1.1 Résistivité diélectrique

La résistivité diélectrique, souvent notée ρ (rho), est une propriété des matériaux diélectriques qui quantifie leur capacité à résister au passage du courant électrique lorsqu'un champ électrique est appliqué. Elle est définie comme la résistance électrique spécifique d'un matériau diélectrique, exprimée en ohm-mètre ($\Omega \cdot m$).

III.2.1.2. Résistance et résistivité transversales (ou volumique)

La résistance volumique est définie comme le rapport entre la tension à courant continu (V) appliquée entre deux électrodes placées sur deux surfaces opposées d'une éprouvette, et le courant en régime établi (A) entre ces électrodes. Elle s'exprime en ohms (Ω). En revanche, la résistivité correspond au rapport entre l'intensité de champ à courant continu (V/m) et la densité de courant en régime permanent (A/m) à travers le matériau. En pratique, elle équivaut à la résistance transversale d'un cube de longueur unitaire avec des électrodes placées sur ses surfaces opposées, souvent exprimée en ohms par mètre ($\Omega \cdot m$), bien que dans la pratique courante, elle soit souvent donnée en ohms par centimètre ($\Omega \cdot cm$).

La résistivité transversale ρ (en $\Omega \cdot cm$) est définie par la relation :

$$\rho = R \frac{S}{d} \quad (3)$$

Avec

$R(\Omega)$: résistance d'un bloc rectangulaire de polymère (figure II.1)

$S (cm^2)$: section

$d (cm)$: épaisseur

Bien que l'unité SI soit l'ohm-mètre, l'ohm-centimètre est plus fréquemment utilisé. La définition précédente est basée sur l'hypothèse que la loi d'Ohm est applicable en courant continu.

La conductivité est donnée par :

$$\sigma = \frac{1}{\rho} \quad (4)$$

σ : s'exprime en $\Omega^{-1} \cdot m^{-1}$ ou en $S \cdot cm^{-1}$ [34].

Cette grandeur revêt une importance particulière pour les dispositifs électroniques tels que les circuits imprimés souples ou rigides ainsi que les enrobages de composants.

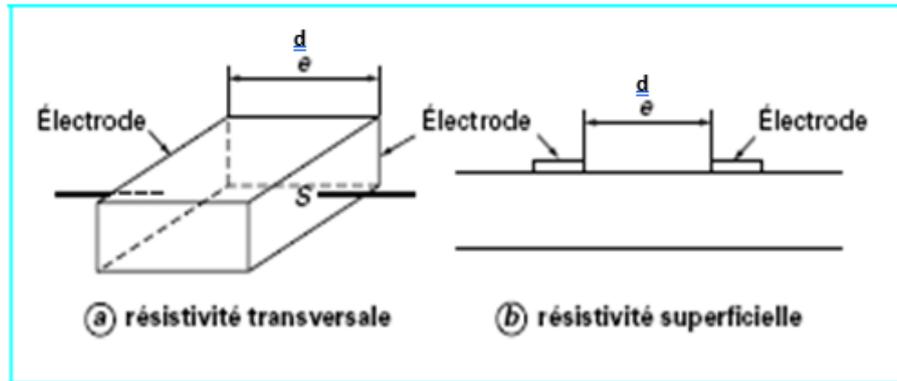


Figure III.1. Schémas représentatifs des résistivités transversale et superficielle [35].

III.2.2 Rigidité électrique

III.2.2.1 Définition

La rigidité électrique des polymères, aussi appelée rigidité diélectrique, désigne la capacité d'un polymère à supporter un champ électrique intense sans subir de décharge électrique, c'est-à-dire sans se rompre et devenir conducteur. Cette propriété mesure la limite du champ électrique que le matériau polymère peut tolérer avant de se décomposer électriquement. Elle s'exprime généralement en kilovolts par millimètre (kV/mm).

La rigidité diélectrique fait référence aux propriétés d'un diélectrique, qui est un isolant ou une substance non conductrice capable de se polariser sous l'effet d'un champ électrique.

Dans la plupart des cas, les caractéristiques du diélectrique sont attribuées à sa capacité à se polariser sous l'influence d'un champ électrique [36].

III.2.3. Permittivité diélectrique

La permittivité diélectrique d'un polymère quantifie sa capacité à stocker de l'énergie électrique sous l'effet d'un champ électrique appliqué. Cette propriété dépend de la polarisation des molécules du matériau et impacte le coefficient de permittivité relative crucial dans la conception de condensateurs et d'isolants électriques.

III.2.3.1 Permittivité électrique

La permittivité relative ϵ_r d'un matériau est définie par la relation suivante:

$$C = \epsilon_r C_0 \quad (5)$$

Où :

$\epsilon = \epsilon_r \epsilon_0$: La permittivité absolue du diélectrique.

$\epsilon_0 = 8.845 \times 10^{-12}$ F/m : la permittivité du vide.

On peut déterminer la valeur de C en fonction des caractéristiques géométriques (Surface

des armatures S et distance l entre elles) ainsi que de la nature du diélectrique du condensateur [37] :

$$C = \varepsilon \frac{S}{l} \quad (6)$$

L'augmentation de la capacité C résulte de l'introduction d'un diélectrique qui se polarise sous l'effet du champ électrique appliqué. Ce processus induit la formation de dipôles perpendiculaires aux armatures du condensateur. Ces dipôles contribuent à neutraliser une partie des charges électriques présentes sur les surfaces métalliques [38].

III.2.4. Facteur des Pertes diélectriques

III.2.4.1. Définition

Le facteur de pertes diélectriques d'un matériau mesure la quantité d'énergie électrique dissipée sous forme de chaleur lorsqu'il est soumis à un champ électrique alternatif. Il joue un rôle crucial dans l'évaluation de l'efficacité énergétique des matériaux diélectriques et peut être influencé par leur structure chimique, leur composition, ainsi que la fréquence du champ électrique.

La permittivité et le facteur de dissipation diélectrique d'un matériau sont influencés par divers paramètres physiques externes et internes, tels que la fréquence, la température, l'intensité du champ électrique, les rayonnements ionisants, l'humidité et la composition chimique [42].

III.2.4. 2. Pertes diélectriques

Dans un diélectrique imparfait, la polarisation résulte de mécanismes de déformation de la distribution des charges électriques sous l'influence d'un champ électrique. Dans le cas d'un champ électrique alternatif, la polarisation ne suit pas instantanément les variations du champ, entraînant ainsi une relaxation diélectrique qui induit une perte d'énergie. La figure (III.2) illustre un tel condensateur, équivalent à un circuit comprenant une résistance en parallèle avec la capacité [39] [40].

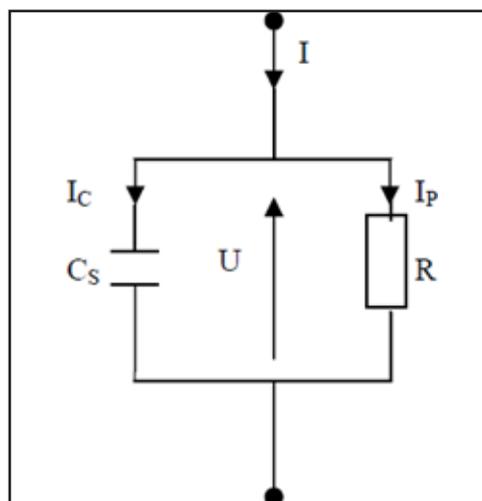


Figure III.2 : Circuit équivalent parallèle représentant un diélectrique

Avec :

C_s : capacité du condensateur parfait ;

R : résistance du diélectrique réel.

Dans le diagramme de Fresnel (figure III.3), le courant alternatif complexe \bar{I} résultant de l'application de la tension alternative complexe \bar{U} aux bornes d'un condensateur plan contenant un diélectrique se décompose en deux composantes [40]:

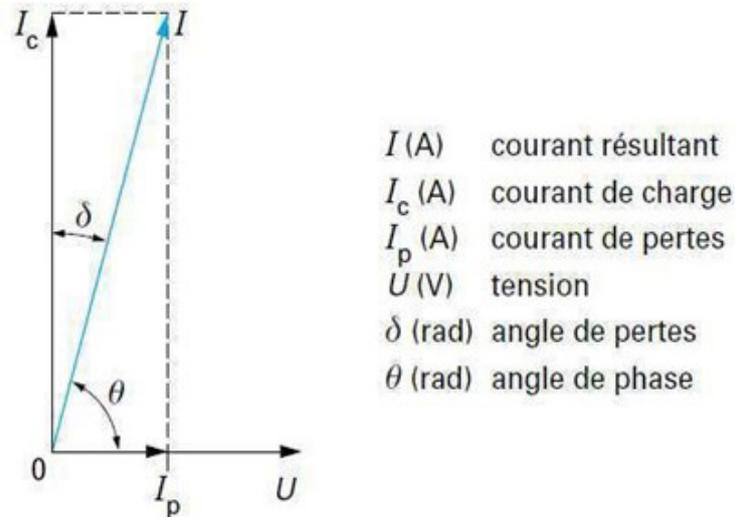


Figure III.3 : Diagramme de Fresnel d'un condensateur présentant des pertes.

$$\bar{I} = \bar{I}_c + \bar{I}_p \quad (7)$$

\bar{I}_c : Le courant de charge.

\bar{I}_p : Le courant de perte d'énergie dans le diélectrique (due à la polarisation).

Les courants \bar{I}_c et \bar{I}_p sont définis par les relations suivantes [38] :

$$\bar{I}_c = j\omega C_s \bar{u} \quad (8)$$

$$\bar{I}_p = \frac{\bar{U}}{R} \quad (9)$$

Avec :

$\omega = 2\pi f$: Pulsation du courant alternatif.

f = la fréquence électrique

L'angle δ est appelé angle de pertes diélectriques. En pratique, \bar{I} est proportionnel à \bar{U} et peut-être [40] :

$$\bar{I} = j\omega(\epsilon' - j\epsilon'')\bar{u} \quad (10)$$

Ou :

$\epsilon^* = j\omega(\epsilon' - j\epsilon'')$: la permittivité relative complexe.

La partie réelle ϵ' représente la permittivité relative en courant alternatif à une fréquence et une température données, traduisant l'aptitude d'un matériau à stocker de l'énergie électrique. La partie imaginaire est l'indice de pertes diélectriques. La tangente de l'angle de pertes, le facteur de pertes diélectriques, est donnée par la relation.

$$\tan \delta = \frac{|I_p|}{|I_c|} = \frac{\epsilon''}{\epsilon'} \quad (11)$$

Elle est également connue sous le nom de facteur de dissipation diélectrique (sans dimension) [38].

III.2.5. Facteur de Dissipation Diélectrique

III.2.5.1. Définition

Le facteur de dissipation diélectrique quantifie la capacité d'un matériau diélectrique à convertir l'énergie électrique en chaleur lorsqu'il est exposé à un champ électrique alternatif. C'est une mesure directe des pertes d'énergie et joue un rôle crucial dans l'évaluation des performances des matériaux diélectriques, notamment dans les applications à haute fréquence et nécessitant un faible niveau de bruit.

Le facteur de dissipation diélectrique est défini comme le quotient $\frac{\epsilon''}{\epsilon'}$, Ce rapport est également appelé tangente de l'angle de pertes, ou δ ; est l'angle complémentaire du déphasage entre la tension appliquée au diélectrique et le courant qui en résulte, tel que $\tan \delta = \frac{\epsilon''}{\epsilon'}$ [41].

Enfin, les pertes diélectriques causées par la polarisation dans les polymères et les mouvements de charges doivent être minimales. Le facteur de dissipation, note $\tan(\delta)$, indique le rapport entre le courant de fuite résistif et le courant de fuite capacitif, et il doit être maintenu à un faible niveau [43].

III.3. Description du dispositif expérimentale

III.3.1. Définition d'un vieillissement

Le vieillissement est un phénomène irréversible qui provoque des changements de la structure physique et/ou chimique des matériaux au cours du temps. Il en résulte une modification des propriétés mécaniques et physico-chimiques du matériau. Il peut également provoquer la modification de la morphologie et de la composition des matériaux, selon l'échelle de temps du processus et la source d'énergie pour le vieillissement [44], pour toutes conditions extérieures (comme la température, les agents chimiques, les radiations UV ...etc.). Le polymère subit ces contraintes, au cours de la mise en forme et pendant l'usage.

Les différents mécanismes responsables du vieillissement des polymères peuvent être classés en deux grandes catégories : physique et chimique.

III.3.2. vieillissement thermique

Le vieillissement thermique des échantillons se fait dans une étuve thermo-ventilée à une température donnée, et une période bien déterminée.

III.4. PRÉPARATION DES ÉCHANTILLONS

Nous avons découpé les échantillons en forme carrée à l'aide d'une découpeuse, mesurant 3 cm de côté et 3 mm d'épaisseur.

Avant de procéder aux essais, chaque échantillon est bien nettoyé à l'alcool puis séché dans le but de réduire les poussières et les impuretés fixées sur la surface de l'isolant. Quatre échantillons ont été utilisés (un vierge, un deuxième vieilli pendant 24heures, un troisième vieilli thermiquement pendant 48heures et le dernier échantillon vieilli pendant 72heures).

Le vieillissement thermique de nos échantillons s'est effectué dans une étuve sous une température fixée à 90 °C (figure III.4).



Figure III.4 : Etuve pour le vieillissement thermique.

III.5. CONDITION D'ESSAIS DES ÉPROUVETTES

Avant les tests de mesure, les éprouvettes ont été conditionnées dans un dessiccateur

Pendant au moins 24 h afin d'éliminer toute présence d'humidité. La figure III.5 montre des échantillons en cours de conditionnement.



Figure III.5 : Dessiccateur.

III.6. APPAREIL D'ANALYSE

III.6.1. Analyse par la spectroscopie d'impédance

Nous avons étudié la variation de la permittivité relative, le facteur de dissipation $\text{tg}\delta$ (angle de pertes) et l'indice de perte diélectrique en fonction de la fréquence, en utilisant un analyseur d'impédance modèle Gw Instek LCR-817. Cet appareil nous permet de mesurer la résistance R, le facteur de dissipation $\text{tg}\delta$ et la capacité C en fonction de la fréquence qui peut varier entre 0.5 KHz et 10 KHz.



Figure III.6. Impédance-mètre de type Gw Instek LCR-817.

III.7. RÉSULTATS EXPÉRIMENTAUX ET DISCUSSION

III.7.1 observation visuelle

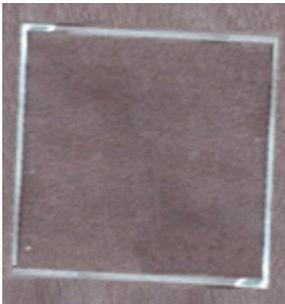


Figure III.7. Echantillon vierge

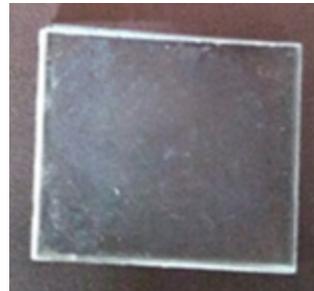


Figure III.8. Echantillon vieilli thermiquement
Pendant 24heures

a. Échantillon vierge

Cet échantillon semble être transparent et sans défauts apparents, la surface est lisse et uniforme, sans signes de dégradation ou de vieillissement.

b. Échantillon vieilli thermiquement pendant 24 heures

Cet échantillon montre des signes visibles de dégradation, avec une surface semble moins transparente, peut-être plus opaque ou brouillée. Il pourrait y avoir des traces de microfissures, de bulles ou de changements de couleur, indiquant un vieillissement thermique.

III.7.2. Influence du vieillissement thermique sur les propriétés diélectriques

III.7.2.1. Permittivité relative

a. Variation de permittivité relative en fonction de la fréquence

La figure III.9 nous donne la variation de la permittivité relative en fonction de la fréquence pour différentes durées de vieillissement (0h, 24h, 48h, 72h) à une température de vieillissement de 90°C.

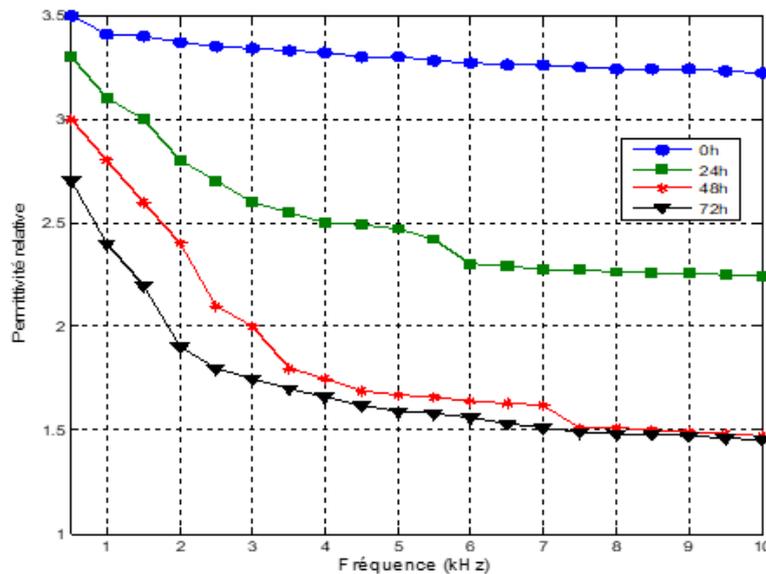


Figure III.9. Variation de la Permittivité relative en fonction de la fréquence

On remarque que :

- La permittivité relative diminue avec l'augmentation de la fréquence pour toutes les durées de vieillissement.
- La courbe correspondant à l'échantillon vierge (en bleu) donne une valeur de permittivité relative d'environ 3.5 à la fréquence de 0.5 kHz et diminue pour atteindre environ 3.2 à 10 kHz.
- La courbe correspondant à l'échantillon vieilli pendant 24h (en vert) quand, à elle, donne une valeur de permittivité relative d'environ 3.3 à la fréquence de 0.5 kHz et diminue pour atteindre environ 2.25 à 10 kHz.
- La courbe correspondant à l'échantillon vieilli pendant 48h (en rouge) montre une diminution plus prononcée, allant de 3 à 0.5 kHz à environ 1.47 à 10 kHz.
- La courbe correspondant à l'échantillon vieilli pendant 72h (en noir) donne une diminution passant de 2.7 à environ 1.45.

Nous remarquons que la permittivité relative diminue avec la fréquence pour toutes les durées de vieillissement.

b. Variation de la permittivité relative en fonction du temps du vieillissement

La variation de la permittivité relative en fonction du temps du vieillissement pour différentes valeurs de la la fréquence (0.5 kHz, 5 kHz et 10 kHz), est illustrée par la Figure III.10.

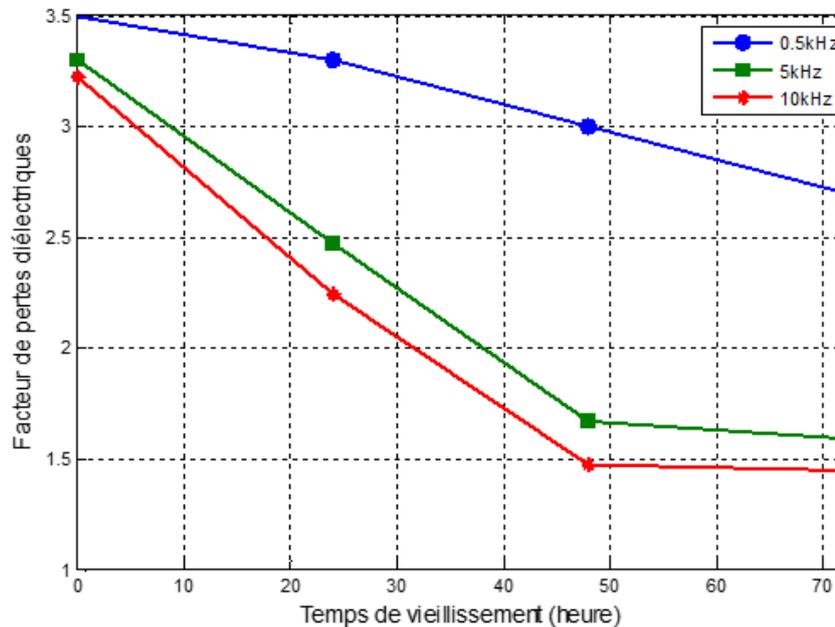


Figure III.10. Variation de permittivité relative en fonction du temps du vieillissement

Nous remarquons que :

Toutes les courbes présentent une diminution de la permittivité relative au fil du temps, indiquant une réduction des permittivités avec le vieillissement, et les courbes des fréquences plus basses (0.5 kHz et 5 kHz) montrent une diminution plus prononcée initialement, suivie d'une stabilisation après environ 48 heures, enfin la courbe à 10 kHz montre une diminution rapide et se stabilise plus tôt que les autres fréquences.

En effet, la permittivité relative diminue avec le temps de vieillissement pour toutes les fréquences étudiées, avec une diminution plus rapide aux fréquences plus élevées. Cette tendance suggère une amélioration de la qualité de l'isolant et une réduction de la mobilité moléculaire au fil du temps.

III.7.2.2. Facteur de dissipation diélectrique

a. Influence de la fréquence sur le facteur de dissipation du PMMA

Les valeurs du facteur de dissipation ($\text{tg}\delta$) sont relevées directement sur l'analyseur d'impédance-mètre. La figure III.11 représente la variation du facteur de dissipation en fonction de la fréquence pour différents temps de vieillissement de nos échantillons.

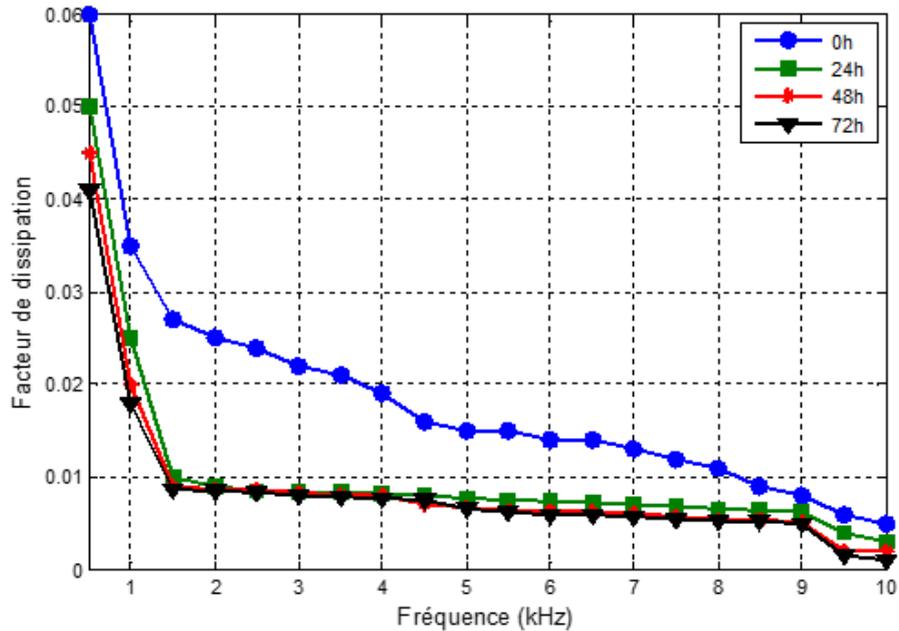


Figure III.11. Variation du facteur de dissipation en fonction de fréquence

Nous remarquons que :

- La courbe correspondant à l'échantillon vierge (en bleu) donne une valeur du facteur de dissipation d'environ 0.06 à la fréquence de 0.5 kHz et diminue pour atteindre environ 0.005 à 10 kHz.
- La courbe correspondant à l'échantillon vieilli pendant 24h (en vert) quand, donne une valeur du facteur de dissipation d'environ 0.05 à la fréquence de 0.5 kHz et diminue pour atteindre environ 0.004 à 10 kHz.
- La courbe correspondant à l'échantillon vieilli pendant 48h (en rouge) montre une diminution, passant de 0.045 à 0.5 kHz à environ 0.0035 à 10 kHz.
- La courbe correspondant à l'échantillon vieilli pendant 72h (en noir) donne une diminution allant de 0.0405 à environ 0.003.

En effet, Le facteur de dissipation diminue avec l'augmentation de la fréquence pour toutes les durées de vieillissement. Les courbes présentent toutes une tendance similaire.

b- Influence de facteur de dissipation du PMMA en fonction de temps du vieillissement :

La Figure III.12 montre la variation du facteur de dissipation en fonction du temps de vieillissement pour trois fréquences différentes : 0,5 kHz, 5 kHz et 10 kHz.

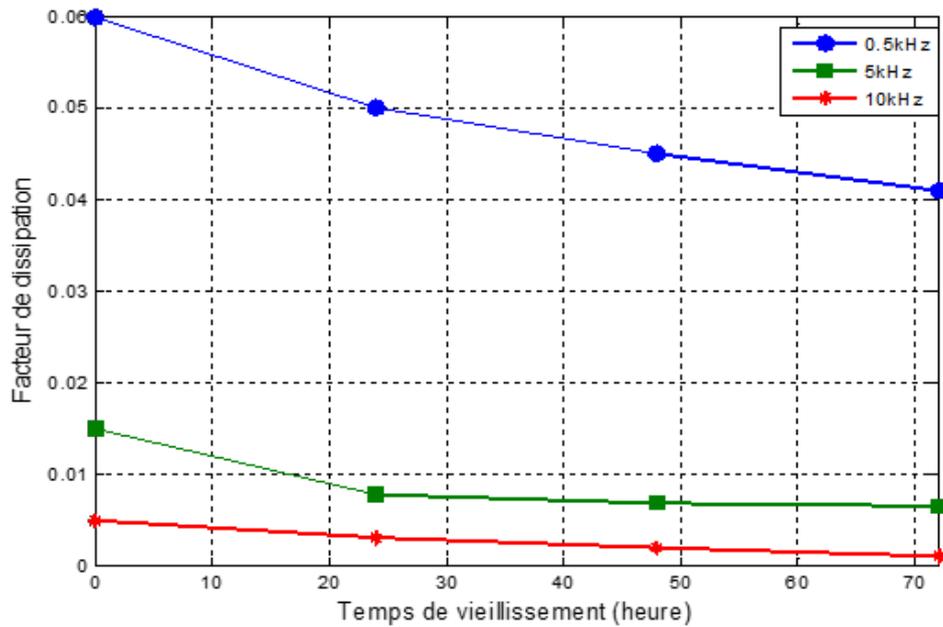


Figure III.12. Variation du facteur de dissipation en fonction de temps du vieillissement

On remarque que :

- Le facteur de dissipation diminue avec le temps de vieillissement pour toutes les fréquences.
- La diminution est plus prononcée pour les basses fréquences (0, 5 kHz) par rapport aux hautes fréquences (10 kHz).

En effet, La diminution du facteur de dissipation avec le temps de vieillissement indique une stabilisation du matériau ou système étudié au fil du temps.

III.7.2.3. Facteur de pertes diélectriques

L'indice des pertes diélectriques ou facteur de pertes diélectriques est donné par la relation suivante :

$$\varepsilon'' = \varepsilon' \cdot \operatorname{tg} \delta \quad (12)$$

Avec:

ε' : Permittivité relative ;

$\operatorname{tg} \delta$: Facteur de dissipation

a. Variation du facteur de pertes diélectrique en fonction de la fréquence

La figure III.12 représente les variations du facteur de pertes diélectrique en fonction de la fréquence.

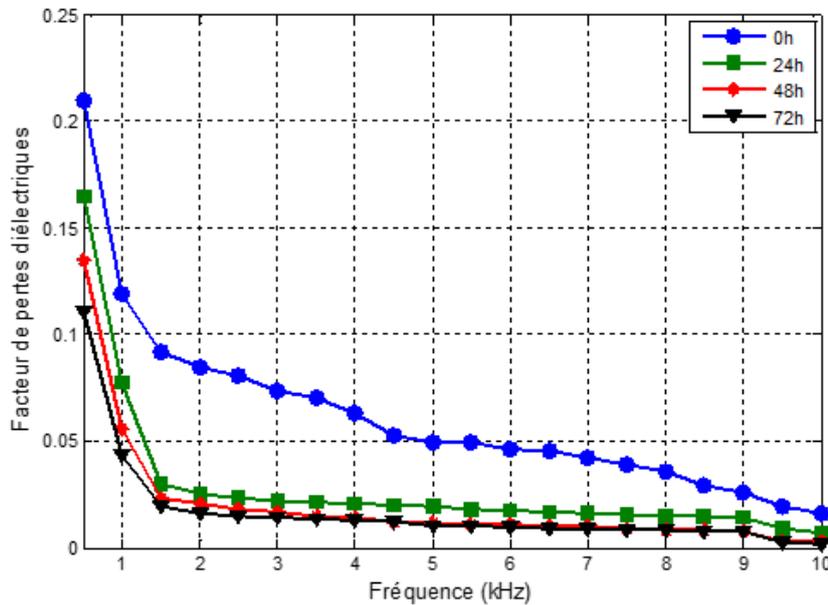


Figure III.13. Variation de facteur des pertes diélectriques en fonction de la fréquence.

On remarque que :

- La courbe correspondant à l'échantillon vierge (en bleu) donne une valeur initiale du facteur de pertes diélectriques d'environ 0,22 à la fréquence de 0,5 kHz, et diminue progressivement pour atteindre environ 0,02 à 10 kHz.
- La courbe correspondant à l'échantillon vieilli pendant 24h (en vert) commence à environ 0,15 à 0,5 kHz, et diminue pour atteindre environ 0,02 à 10 kHz.
- La courbe correspondant à l'échantillon vieilli pendant 48h (en rouge) montre une diminution similaire, débutant à environ 0,12 à 0,5 kHz, et atteignant environ 0,02 à 10 kHz.
- La courbe correspondant à l'échantillon vieilli pendant 72h (en noir) commence à environ 0,1 à 0,5 kHz, et diminue pour atteindre environ 0,01 à 10 kHz.

En effet, le facteur des pertes diélectriques diminue avec l'augmentation de la fréquence pour tous les échantillons.

b. Variation du facteur de pertes diélectrique en fonction du temps de vieillissement

La figure III.13 suivante montre l'évolution des valeurs du facteur de pertes diélectriques en fonction du temps de vieillissement pour différentes fréquences (0,5 kHz, 5 kHz, 10 kHz).

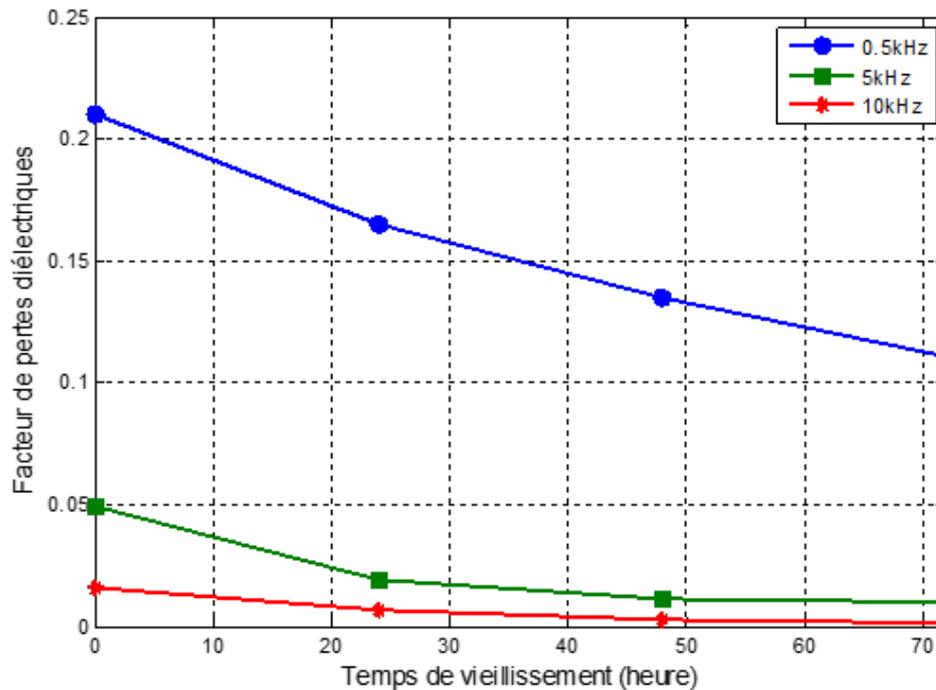


Figure III.14. Variation du facteur de pertes diélectrique en fonction du temps de vieillissement

Nous remarquons que :

L'augmentation du temps de vieillissement induit la diminution du facteur de pertes diélectriques quel que soit la valeur de la fréquence.

En effet, si nous considérons les différentes fréquences, soit 0.5, 5 et 10 kHz, le facteur de pertes diélectriques diminue de 3.5 pour 0 heures de vieillissement à 2.54 pour 72 heures de vieillissement, de 3.26 pour 0 heures de vieillissement à 1.6 pour 72 heures de vieillissement et de 3.22 pour 0 heures de vieillissement à environ 1.45 pour 72 heures de vieillissement respectivement.

III.8. CONCLUSION

Nous nous sommes intéressés, dans ce chapitre, à l'étude des propriétés diélectriques du polyméthacrylate de méthyle, à savoir, la permittivité diélectrique, le facteur de pertes diélectriques et le facteur de dissipation diélectrique. La préparation méticuleuse des échantillons et les conditions d'essai bien définies sont cruciales pour obtenir des résultats fiables. À l'aide d'un dispositif expérimental approprié, le spectroscope d'impédance, nous avons pu avoir différentes caractéristiques du polymère soumis au vieillissement sous la contrainte thermique. Cette étude permet non seulement de mieux comprendre le matériau étudié, mais aussi d'optimiser son utilisation dans des applications réelles où la performance diélectrique est critique.

CONCLUSION GÉNÉRALE

CONCLUSION GÉNÉRALE

Le travail présenté dans ce mémoire a été consacré à l'étude du polyméthacrylate de méthyle (PMMA) soumis au vieillissement thermique. Il s'inscrit dans le cadre de l'évaluation du comportement de notre polymère soumis aux vieillissements thermiques. Pour commencer donc, nous avons donné une vue générale sur les polymères, et le polyméthacrylate de méthyle en particulier.

Nous avons étudié les variations des paramètres diélectriques (permittivité relative, le facteur de pertes diélectriques et facteur de dissipation) en fonction de temps de vieillissement, où nous avons remarqué la dégradation physico-chimique subie par le solide isolant, PMMA, sous l'effet de la température.

En effet, nous avons constaté que la permittivité du polymère et son facteur de pertes diélectriques diminuent avec l'augmentation de la fréquence et augmentent avec l'augmentation de la durée de vieillissement. Le but était de prédire la durée de la vie de notre matériau (PMMA) et essayer donc d'améliorer ses propriétés diélectriques.

BIBLIOGRAPHIE

Bibliographie

- [1] J. C. Dubois, « propriétés diélectriques des polymères » , Technique de l'ingénieur, Référence E1850, Paris 1998.
- [2] Y.Lakhdar, « Etude de la stabilité et de la dégradation de polymères et mélanges de polymères à base de styrène », Thèse de Doctorat en sciences : chimie, Université de Biskra, 2015.
- [3] K. Hachour, « Contribution à l'élaboration d'un critère de plasticité pour le PEHD », Thèse de Doctorat en Génie Mécanique, Université Mouloud Mammeri Tizi Ouzou, 2010.
- [4] M.Bensaid, « Etude des Polymères par Dynamiques Moléculaire», Thèse Doctorat, Université d'Oran des Sciences et de la Technologie Mohamed Boudiaf, Algérie (2015).
- [5] I.Djoudi, « Etude de la stabilisation du polychlorure de vinyle (PVC) et les Phénomènes de dégradation », Mémoire Magister, Université de Biskra, Algérie (2007).
- [6] I. Zoubir, « Elaboration et caractérisation d'un matériau composite polymère-ZnO », Mémoire De Master, Université De Tlemcen, Algérie (2017).
- [7] A. Methia, M. Rezzoug, « Etude de la diffusion de l'irganox 1076 dans un polymère recyclé à base de PEHD », Mémoire de Master, Université Abderrahmane Mira – Bejaia, Algérie (2017).
- [8] P. Combette, Isabelle Ernoult, "Physique des polymères", Hernani Editeur.
- [9] A. Hadjer, « Effet du brunissage sur les propriétés mécaniques d'un PEHD2050 concentré à 2.5% de noir de carbone », Mémoire De Master, Université Badji Mokhtar Annaba, 2018/2019.
- [10] La chimie des polymères, «Support de Cours (Version PDF)», Université Médicale Virtuelle Francophone, Société Francophone de Biomatériaux Dentaires (2010).
- [11] K. Nora, « Etude de l'interaction décharge électrique/surface d'un solide isolant », Thèse de doctorat en sciences en électrotechnique, Université mouloud maamri de tizi ousou, Soutenu le 11 Juillet 2019.
- [12] A. Et Taouil; «Effets des ultrasons haute fréquence sur l'électrosynthèse des polymères conducteurs»; thèse de doctorat en chimie, université de Franche-Comté; 2011.
- [13] S.Ithri, L.Teklal, « Caractérisation d'une géomembrane soudée utiliser pour l'étanchéité d'une station d'épuration des eaux usées », Mémoire De master, Université Mouloud Mammeri De Tizi- Ouzou, Algérie (2016).
- [14] B. Yahia, « Prédiction des propriétés thermiques des Films PEHD vieillis avec SVM », Mémoire De Master, Université de Ibn Khaldoun Tiaret, Soutenu publiquement le 24/10/ 2019.
- [15] J. Hajer, « Etude par résonance paramagnétique électronique (RPE) de polyméthacrylate de méthyle (PMMA) irradié par des photons gamma issus de cobalt 60 », Mémoire Pour

l'obtention du Diplôme Du Mastère professionnelle en physique, Université de Monastir, Soutenu le 03/07/2013.

[16] - P. Combette et I. Ernoul, physique des polymères tome I : Structure, Fabrication Et Emploi Hermann éditeurs (2005).

[17] Naudin, C. A, « Nomenclature, classification et formules chimiques des polymères », Editions TI, (1995).

[18] P. Combette, I. Ernoul, « Physique des polymères - Volume 1 », Publié par Hermann en 2006.

[19] B. Abdelhak, « Etude comparative du polyméthacrylate de méthyle (PMMA) soumis aux différents vieillissements », Mémoire de fin d'étude en réseaux électrique, Université Akli Mohand Oulhadj de Bouira, Le 02 octobre 2018.

[20] M. Mustapha, "Etude de la Conduction électrique dans les polymères isolants" Thèse de doctorat, Université Mouloud Mammeri de Tizi-Ouzou, 2010.

[21] M. Carrega and Collectif Dunod, Matériaux polymères, Dunod, 2 ème édition, 2007.

[22] Z. Rezika, « Etude d'un transistor organique transparent avec PMMA comme isolant de grille », Mémoire de Magister en électronique, Université de Tizi-Ouzou.

[23] Polymérisation de PMMA, <https://ramenetessciences.wordpress.com/2017/05/09/le-polymethylmethacrylate-pmma/> [en ligne], Consulté le 11/06/2024.

[14] J. Bost, Matières plastiques, Lavoisier, Paris, 1985.

[25] J.P. Trotignon, J. Verdu, A. Dobraczynski, and M. Piperaud, « Précis Matières plastiques », AFNOR, 5 ème édition, 1994.

[26] J.P. Trotignon, J. Verdu, A. Dobraczynski, and M. Piperaud, « Précis Matières plastiques, structures-propriétés, mise en œuvre, Normalisation », Editions Nathan, Paris, 1996.

[27] M. Carrega, « Matériaux polymères. Editions Dunod », Paris, 2000.

[28] A. Anton, « Matériaux isolants solides - caractéristiques électriques », Techniques de l'Ingénieur, D 2315, 2003.

[29] M. Biron, « Propriétés des thermoplastiques », Tableaux.

[30] Kaczmarczyk, Bozena, B. Morejko-Buż, and A. Stolarzewicz. «Investigation of infrared calibration methods for application to the study of methyl methacrylate polymerization.» Fresenius' journal of analytical chemistry 370 (2001): 899-903.

[31] Mme B.Zouai Fatma-Zohra, « Etude des mélanges PVDF/PMMA et de leurs nanocomposites PVDF/PMMA/Maghnite en vue d'application comme revêtement », Thèse de Doctorat, Université Ferhat Abbas Setif-1, Soutenu le: 24 juin 2015.

[32] <https://plaqueplastique.fr/product/plaque-plexiglass-depoli-translucide-3mm/> [en linge], consulté le 29/06/2024

[33] <https://www.plastomere.com/pmma-plexiglass/> [en linge], consulté le 29/06/2024

[34] A. Boudefel , « POPRIÉTÉS DIÉLECTRQUES DE POLYMÈRES COMPOSITES ET LEURS APPLICATIONS EN MICROÉLECTRONIQUE », Thèse de doctorat en Réseaux électriques, Soutenue le 03 Mai 2009.

[35] J.C.Dubois, « Propriétés diélectriques des polymères », Techniques de l'ingénieur, E 1850.

[36] « Trésor de la langue française informatisé », sur le site du Centre national de ressources textuelles et lexicales, consulté le 3 mars 2019.

[37] N. Lahoud, « Modélisation du vieillissement des isolants organiques sous contrainte électrique Application à la fiabilité des matériaux », Thèse de Doctorat, Université de Toulouse, Mars 2009.

[38] F. D. B. Pinel, « Fonction isolation dans les matériels Electriques », Technique de l'ingénieur, D2302, 1999.

[39] E. Mboundou, « Etude des phénomènes liés à la dégradation des matériaux polymères sous champ électrique en présence d'humidité », Thèse de Doctorat, Université de Franche-Comté, Juillet 2006.

[40] I. E. P.Combette, « Physique des polymères I structure, fabrication, emploi HERMANN Editeurs », France, ISBN 2 7056 6481 5.

[41] M. Abdelhafid Bouhamla, « Caractérisation Des Matériaux De Construction Par Les Méthodes Electriques Cas Des Inclusions Dans Les Pates Pures », Mémoire De Magister, Université Mantouri De Constantine, Algérie, 2007.

[42] M. Abdelhafid Bouhamla, « Caracterisation Des Materiaux De Construction Par Les Methodes Electriques Cas Des Inclusions Dans Les Pates Pures », Mémoire De Magister. Université Mantouri De Constantine., Algérie ,2007.

[43] Élia, « sécurité des câble électrique », le 23 janvier 2013.

[44] Y. Dong, « Vieillissement des cordes d'assurance utilisées dans les équipements de protection contre les chutes de hauteur », Mémoire d'Ingéniorat de la maitrise en génie mécanique, Université de Québec (Canada) ,2013.

ANNEXE

Annexe 1

facteur des pertes dielectrique en fonction de frequence				
fr(KHZ)	vierge	24 h	48 h	72h
0,5	0,21	0,165	0,135	0,1107
1	0,11935	0,0775	0,056	0,0432
1,5	0,0918	0,03	0,0234	0,01914
2	0,08425	0,0252	0,02088	0,01615
2,5	0,0804	0,02295	0,01806	0,01494
3	0,07348	0,02184	0,0166	0,014175
3,5	0,06993	0,021165	0,01458	0,01343
4	0,06308	0,0205	0,014	0,012782
4,5	0,0528	0,020169	0,01183	0,01215
5	0,0495	0,019019	0,011356	0,010335
5,5	0,0492	0,01815	0,010624	0,009796
6	0,04578	0,01702	0,010496	0,00936
6,5	0,04564	0,016488	0,010269	0,009027
7	0,04238	0,016117	0,009882	0,008758
7,5	0,039	0,015663	0,008758	0,008195
8	0,03564	0,01469	0,008304	0,007844
8,5	0,02916	0,0144512	0,0081	0,007696
9	0,02592	0,0139872	0,007599	0,007203
9,5	0,01938	0,009	0,00296	0,00219
10	0,0161	0,006735	0,00294	0,00145

Annexe 2

FACTEUR DE DISSIPATION EN FONCTION DE TEMPS			
Tg	f=0.5	f=5	f=10
0h	0,06	0,015	0,005
24h	0,05	0,0077	0,003
48h	0,045	0,0068	0,002
72h	0,041	0,0065	0,001

Annexe 3

Permittivite relative en fonction de temps			
Pr	f=0.5	f=5	f=10
0 h	3,5	3,3	3,22
24 h	3,3	2,47	2,245
48 h	3	1,67	1,47
72 h	2,7	1,59	1,45

Annexe 4

facteur des pertes dielectrique en fonction de temps				
fr(KHZ)	vierge	24 h	48 h	72h
0,5	0,21	0,165	0,135	0,1107
5	0,0495	0,019019	0,011356	0,010335
10	0,0161	0,006735	0,00294	0,00145

Annexe 5

Prmitivite relative en fonction de frequence				
fr(KHZ)	vierge	24 h	48 h	72h
0,5	3,5	3,3	3	2,7
1	3,41	3,1	2,8	2,4
1,5	3,4	3	2,6	2,2
2	3,37	2,8	2,4	1,9
2,5	3,35	2,7	2,1	1,8
3	3,34	2,6	2	1,75
3,5	3,33	2,55	1,8	1,7
4	3,32	2,5	1,75	1,66
4,5	3,3	2,49	1,69	1,62
5	3,3	2,47	1,67	1,59
5,5	3,28	2,42	1,66	1,58
6	3,27	2,3	1,64	1,56
6,5	3,26	2,29	1,63	1,53
7	3,26	2,27	1,62	1,51
7,5	3,25	2,27	1,51	1,49
8	3,24	2,26	1,51	1,48
8,5	3,24	2,258	1,5	1,48
9	3,24	2,256	1,49	1,47
9,5	3,23	2,25	1,48	1,46
10	3,22	2,245	1,47	1,45

Résumé

Dans ce travail, nous nous sommes intéressés à l'effet du vieillissement thermique sur les propriétés diélectriques de polyméthyle-méthacrylate (PMMA) de utilisée dans isolation nombreuses utilisation (Substrats pour circuits imprimés, les enroulements machine électriques, Antennes, Écrans de protection...etc.). Nous avons d'une part, étudié les variations des paramètres diélectriques (permittivité relative, le facteur de pertes, le facteur de dissipation) en fonction de la fréquence et de la durée de l'application de la contrainte (température) et d'autre part, analysé avec les différentes techniques les dégradations subies par le solide isolant sous l'effet de la température pour connaître la durée de la vie de notre matériau PMMA et aussi essayer donc d'améliorer ses propriétés diélectriques. Nous avons conclu que PMMA a des avantages et propriétés importantes et recherchées en raison de caractéristiques uniques, qui sont: la transparence, les bonnes propriétés diélectriques, l'excellente résistance, la durabilité.

Summary

In this study, we focused on the effect of thermal aging on the dielectric properties of polymethyl methacrylate (PMMA) used in various insulation applications (substrates for printed circuits, electrical machine windings, antennas, protective screens, etc.). Firstly, we investigated the variations of dielectric parameters (relative permittivity, loss factor, dissipation factor) with respect to frequency and duration of temperature exposure. Secondly, we analyzed the degradation mechanisms of the insulating material under temperature stress to determine the lifespan of our PMMA material and explore ways to enhance its dielectric properties. Our findings indicate that PMMA possesses significant advantages and desirable properties due to its unique characteristics such as transparency, good dielectric properties, excellent resistance, and durability.

ملخص

في هذا العمل، تم التركيز على تأثير الشيخوخة الحرارية على الخصائص الكهربائية لبولي ميثيل ميثاكريلات المستخدم في عزل العديد من التطبيقات مثل (الأسطح للدوائر المطبوعة، لفات الآلات الكهربائية، الهوائيات، أو اشع الحماية...إلخ). لقد درسنا، من جهة، تغيرات المعايير الكهربائية (الثابت الكهربائي النسبي، معامل الخسارة، عامل التشتت) اعتماداً على التردد ومدة تطبيق الضغط (درجة الحرارة)، ومن جهة أخرى، قمنا بتحليل التدهورات التي يتعرض لها المعزل الصلب تحت تأثير درجة الحرارة لمعرفة مدة حياة مادتنا لبولي ميثيل ميثاكريلات ومحاولة تحسين خصائصه الكهربائية.

لقد خلصنا إلى أن لبولي ميثيل ميثاكريلات لديها مزايا وخصائص هامة ومطلوبة بسبب خصائصها الفريدة، والتي تشمل: الشفافية، الخصائص الكهربائية الجيدة، المقاومة الممتازة، والمتانة.